

Schlussbericht zum Förderprojekt im BMBF Rahmenprogramm „Vom Material zur Innovation“ und im BMBF-Dachkonzept Batterieforschung

Vorhabenbezeichnung:

KritBatt–Inline-Klassifizierung von Beschichtungsfehlern zur Ermittlung der Kritikalität in der Elektrodenherstellung

Zuwendungsempfänger:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., München

Förderkennzeichen

03XP0360A

Projektleiter & -mitarbeiter

Dr. Beatrice Bendjus (Projektleiterin)
 Dr. Ulana Cikalova (Wissenschaftlerin)
 Dr. Lili Chen (Wissenschaftler)
 Dr. Stefan Münch (Wissenschaftler)
 Riona Stüwe (Wissenschaftlerin)
 Lennard Sumner (Wissenschaftler)
 Muhammad Momotazul Islam (Wissenschaftler)

Berichtszeitraum

01.03.2021 –
 31.08.2024

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03XP0360A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.

Teil I: Kurzbericht

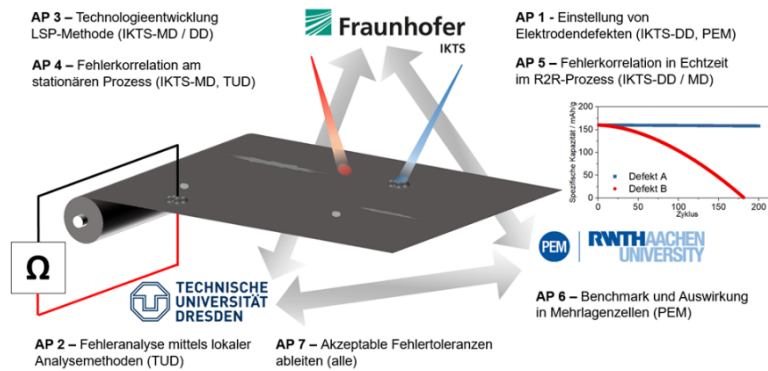
1. Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Im Rahmen des Projekts KritBatt hat das IKTS-DD eine industrietaugliche Defektsimulation erstellt, indem es kontrollierte Variationen in der Elektrodenproduktion eingeführt hat, um das Verständnis der Defektbildung und der Batterieleistung zu verbessern. Ergänzende optische Analysemethoden, einschließlich eines verbesserten Laser-Speckle-Photometrie-Systems (LSP), wurden für die In-situ-Überwachung getestet und mit innovativen Defekt-Erkennungstechniken korreliert. Die systematische Erzeugung, Klassifizierung und Bewertung von Defekten sollte die Vergleichbarkeit von Defektursachen und -typen verbessern und die Qualitätskontrolle bei der Elektrodenherstellung optimieren.

Aufgabe des Teilprojekts ist es, ein qualifiziertes LSP-System zur AI-basierten in-situ Überwachung der Beschichtungsqualität von Elektrodenfolien zu entwickeln und mit innovativen Fehlererkennungsmethoden zu korrelieren. Zu diesem Zweck wurden spezifische Defektmuster, die von den Projektpartnern (IKTS-DD und PEM der RWTH Aachen) in der Elektrodenproduktion provoziert wurden, mittels LSP im Labor am IKTS-MD charakterisiert und so eine Datenbasis für die Entwicklung von AI-Algorithmen geschaffen. Lokale Analysemethoden (z.B. Thermographie) des Projektpartners TUD und IKTS-DD wurden zur Verifizierung der LSP-Ergebnisse eingesetzt. Im Rahmen des Projekts wurde in Freiberg ein Inline-LSP-Messsystem für eine Echtzeitkontrolle während des Herstellungsprozesses von Elektrodenfolien realisiert. Entsprechende Kritikalitätskriterien sollten aus den Gesamtergebnissen abgeleitet werden. Diese Effekte und Kritikalitätskriterien fehlen im industriellen Fertigungsprozess. Anschließend sollten standardisierte Qualitätsmaßnahmen bzw. Arbeitsabläufe für die In- und Offline-Überwachung von Elektrodenfolien abgeleitet werden.

2. Ablauf des Vorhabens

Die Arbeiten wurden entlang von 7 Arbeitspaketen (siehe Schema) strukturiert und erfolgten in enger Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern. Das IKTS-MD hat Elektroden mit eingestellten Defekten von den Projektpartnern (IKTS-DD und PEM) erhalten. Diese wurden mit dem LSP-Laborsystem zur Entwicklung von KI-Algorithmen gemessen. Auf der Grundlage des entwickelten Laboraufbaus wurde in Freiberg ein Inline-Prüfsystem zur In-situ-Messung von Elektrodenfolien während des Herstellungsprozesses implementiert. Die Ergebnisse der LSP wurden dann durch die Inspektionsergebnisse des Projektpartners PEM mit einem Benchmarking-System validiert.



3. Wesentliche Ergebnisse und die ggf. Zusammenarbeit anderen Forschungseinrichtungen

In den AP 1 und 2 wurden systematisch Defekte erzeugt, indem Misch- und Beschichtungsverfahren sowie Betriebsparameter angepasst wurden. Die erzeugten Fehler wurden dann an die Projektpartner TUD, IKTS-MD und PEM zur weiteren Analyse geschickt. In UAP 3.1 wurde ein LSP-Labora Aufbau entwickelt, um eine LSP-Datenbank zu erstellen. Systematische Messungen wurden an 334 Defektproben von IKTS-DD und PEM durchgeführt. Die Daten wurden später in UAP 3.2 für die Entwicklung von AI-Algorithmen verarbeitet. Zu den wichtigsten und herausragenden Ergebnissen gehören:

- Systematische Fehlerproduktion und Identifizierung von 10 Defekttypen in Zusammenarbeit mit IKTS-DD und PEM.
- Labeling von über 11.000 Speckle-Bildern für das Maschinelle Lernen. Trainieren eines KI-Modells mit YOLOv5 auf Basis der LSP-Datenbank.
- Erreichung von über 90 % Präzision und Genauigkeit.
- Echtzeit-Auswertegeschwindigkeit von ~11 m/min unter Laborbedingungen.

Im Arbeitspaket 4 wurden die Materialeigenschaften und die Homogenität analysiert. Speziell im UAP 4.3 wurden Proben in Form von Knopf- und Pouchzellen getestet. In UAP 4.2 erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit der TUD bezüglich der Fehler-/Funktionskorrelation am statischen LSP-System. Die von der TUD ermittelten Toleranzgrenzen, die das LSP-System erfassen muss, wurden übermittelt. In AP 5 wurde in Freiberg ein auf der LSP basierendes Inline-Prüfsystem implementiert, um während des Herstellungsprozesses eine 100-prozentige Echtzeit-Fehlererkennung der Elektrodenoberfläche durchzuführen. Die Messergebnisse wurden in UAP 6.1 validiert, indem die Ergebnisse mit einem kommerziellen optischen System verglichen wurden, das bei PEM installiert war.

Abschließend wurden die Toleranzbereiche und Kritikalitätskriterien aus allen Erkenntnissen abgeleitet und in AP 7 zusammengestellt.

Teil II: Eingehende Darstellung

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

AP1: Einordnung von Beschichtungsdefekten und Kausalitäten

UAP 1.1: Auswirkungen von Mischungsprozessfehlern und Defekten in den Ausgangspulvern

Im UAP wurden verschiedene Versuchsreihen zur Optimierung der Kathodensuspension durchgeführt, wobei der Fokus auf den Bereichen Mischen, Rezeptur und Lagerung lag.

Eine wesentliche Untersuchung beschäftigte sich mit der Reduktion der Mischzeiten, um die Prozesseffizienz zu steigern. Hierbei wurde die Mischdauer in den entscheidenden Prozessschritten systematisch verkürzt. Die Ergebnisse zeigten, dass sich die rheologischen Eigenschaften der Suspension nur geringfügig veränderten und keine signifikanten Agglomerationen entstanden. Trotz der leicht erhöhten Viskosität konnten aus den hergestellten Suspensionen Elektrodenfolien gefertigt werden, die für weiterführende Untersuchungen bereitgestellt wurden.

Ein weiterer Schwerpunkt war die Kontamination der Kathodensuspension durch Fremdpartikel wie Eisen, Stahl und PTFE. Diese Simulation sollte mögliche Verunreinigungen im Produktionsprozess nachbilden. Dabei wurde festgestellt, dass insbesondere bei höheren Schichtdicken Haftungsprobleme und Rissbildungen auftraten. Die zugrunde liegenden Mechanismen dieser Defekte wurden in nachfolgenden Untersuchungen in den Arbeitspaketen AP2 und AP4 weiter analysiert.

Zusätzlich wurde eine Versuchsreihe zur Agglomeration von Leitadditiv durchgeführt. Hierbei wurden gezielt Agglomerate in der Kathodensuspension erzeugt, um Fehlerbilder für das KI-Training bereitzustellen. Dabei kam es neben großen Agglomeraten auch zu Liniendefekten, die durch eine Verstopfung des Gießkastens entstanden. Um gezielt kleinere Agglomerate unter 0,2 mm zu erzeugen, wurde ein Teil der Suspension gesiebt. Die hergestellten Elektroden wurden für weiterführende Untersuchungen an Projektpartner übergeben.

Ein weiteres wichtiges Untersuchungsfeld war die Lagerung der Elektrodensuspension und deren Sedimentation. Aufgrund der hohen Materialdichte von NCM 622 besteht eine ausgeprägte Neigung zur Sedimentation, die zu einer lokalen Entmischung führt. Über einen Zeitraum von 21 Tagen wurde die Viskosität und der Feststoffgehalt der Suspension analysiert. Dabei zeigte sich zunächst eine Abnahme der Viskosität, gefolgt von einer späteren Zunahme durch Gelierungsprozesse. Nach zehn Tagen Lagerung traten zudem deutliche Schwankungen im Feststoffgehalt auf, was die Langzeitstabilität der Suspension beeinflusst. Diese Erkenntnisse sind für eine effiziente Nutzung von gelagerten Suspensionen essenziell.

Abschließend wurde der Einsatz eines wasserbasierten Binders getestet, indem Alginat als alternative Bindermatrix verwendet wurde. Während die Nassbeschichtung vergleichbare Ergebnisse zu den standardmäßig eingesetzten Materialien zeigte,

traten nach der Trocknung erhebliche Haftungsprobleme auf. Die Elektrodenfolien wiesen große Fehlstellen auf, was die Eignung dieser Rezeptur für die weitere Anwendung stark einschränkt.

UAP 1.2: Beschichtungsfehler in der Substratbeschichtung und Trocknung

In diesem Unterarbeitspaket wurden verschiedene Beschichtungs- und Trocknungsparameter analysiert, um deren Einfluss auf die Schichtqualität und mögliche Defekte zu verstehen. Dabei wurden gezielte Variationen im Flächengewicht und Wärmeeintrag vorgenommen, um deren Auswirkungen zu evaluieren. Es zeigte sich, dass moderate Anpassungen der Parameter keine Rissbildung verursachten, während eine Kombination aus sehr hohen Schichtdicken und maximaler Trocknungsleistung zu Rissen führte. Ein optimales Parameterfenster für eine hochwertige Beschichtung konnte erarbeitet werden.

Tabelle 1.2-1: Detaillierte Parametergruppe für Beschichtung und Trocknung

Themenblock	Versuchsbeschreibung
Beschichtung	Effekt der Reduzierung (50%) des Flächengewichts auf die Schichtqualität
	Effekt der Erhöhung (150, 200%, 400%) des Flächengewichts auf die Schichtqualität
	Variation der SchlitzdüsenEinstellung als Ursache für Randfehler
	Simulation von Liniendefekten über Hemmnisse in der Beschichtung
Trocknung	Effekt der Erhöhung des Wärmeeintrags auf die Schichtqualität

Tabelle 1.2-2: Detaillierte Parametergruppe für Beschichtung (Schlitzdüsen)

Schlitzdüsenabstand [µm]	Äquivalente Bahngeschwindigkeit [mm/s¹]	Volumenstrom [ml/min¹]
25 bis 1000	5 bis 40	100 bis 300

Zusätzlich wurden zwei weitere Versuchsreihen zur Beschichtung durchgeführt. Mit dem Tabletop-Beschichter wurden verschiedene SchlitzdüsenEinstellungen untersucht, wobei ein Parameterbereich identifiziert wurde, der eine homogene Beschichtung ermöglicht. Einstellungen außerhalb dieses Bereichs führten zu Rand- und Flächendefekten. Parallel dazu wurde durch künstliche Hemmnisse in der KMS-Beschichtungsanlage die Entstehung von Liniendefekten simuliert, um deren Einfluss auf die Elektrodenperformance zu bewerten.

Für die Simulation von Liniendefekten wurden gezielt Materialverschiebungen in der Elektrodenbeschichtung erzeugt. Dabei konnten bei dünnen Elektroden verschiedene Defektgrößen erfolgreich implementiert werden, während es bei dicken Elektroden zu Materialansammlungen kam, die die Defektgeometrie beeinflussten. Die hergestellten

Proben wurden anschließend an die Projektpartner für weiterführende Untersuchungen zur Haftkraft und Zellperformance weitergeleitet.

AP 2: Fehler-/Funktionskorrelation am stat. LSP-Gerät

UAP 2.3: Fehlerklassifizierung und -quantifizierung mit Offline-Methoden

In diesem Arbeitspaket arbeitete das IKTS-MD mit dem IKTS-DD und PEM zusammen, um die TUD bei der Bestimmung lokaler Defekte auf den vom IKTS-DD in AP1 hergestellten Elektroden zu unterstützen. Die Ergebnisse der Defektcharakterisierungen wurden genutzt, um die Systemparameter der LSP-Technologie, z.B. die optische Auflösung und die Detektierbarkeit, anzupassen.

Das IKTS-MD verwendete ein 3D-Profilometer, um die Topographie der Elektrodenoberfläche zu analysieren und Defekte wie Agglomerate zu erkennen. Ein Abschnitt der Elektrode wurde mit einer Auflösung von 60 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ gescannt und die Oberflächenhöhenwerte wurden zur Berechnung der Oberflächenrauheit (S_a) verwendet. Zur Identifizierung von Agglomeraten, die als erhöhte Bereiche erscheinen, wurde ein Schwellenwert von 2,5-mal S_a festgelegt. Die Daten wurden in ein binäres Bild umgewandelt, wobei weiße Pixel Bereiche oberhalb des Schwellenwerts und schwarze Pixel Bereiche unterhalb des Schwellenwerts markierten. Rauschen wurde herausgefiltert, sodass weiße Pixelcluster übrigblieben, die Agglomerate darstellten. Die kleinste nachweisbare Agglomeratgröße betrug etwa 120 μm , basierend auf der Auflösung des Profilometers.

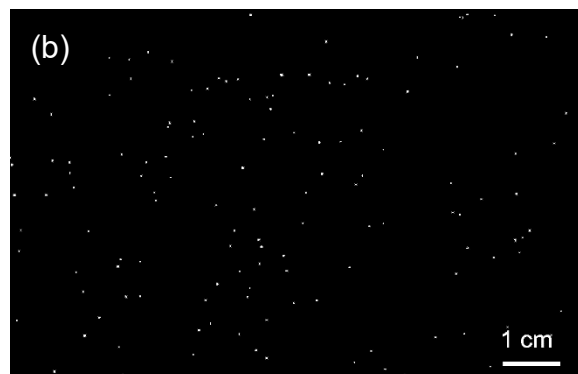
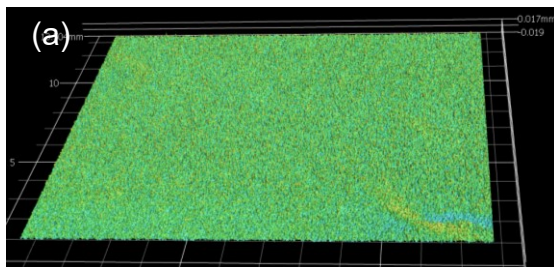


Abbildung 2.3-1: Messung durch Profilometer und das Bildergebnis der Auswertung. (a) eine Bilddarstellung der mit dem Profilometer gemessenen Topographie einer Elektrodenoberfläche. (b) ein Bildergebnis der Auswertung von topographischen Daten, weiße Punkte zeigen die Positionen von Agglomeraten.

Als Beispiel wurde eine Fläche von 10 cm x 6 cm der Elektrode mit dem Profilometer gescannt, wie in Abbildung 2.3-1 dargestellt. Die Profilometriemessung wurde weiter verbessert, um eine höhere Auflösung zu erreichen, die die Bewertung von Algorithmen auf der Grundlage von Bildverarbeitungsmethoden ermöglicht. Diese Verbesserung gewährleistete die Kompatibilität mit verschiedenen Fehlertypen und ermöglichte eine präzisere und umfassendere Analyse.

UAP 2.4 Ableitung von Prozess-Struktur-Wechselwirkungen zur Defektentstehung

In diesem Arbeitspaket wurde der Zusammenhang zwischen Defekten und Prozessbedingungen während der Elektrodenherstellung untersucht. Die

Anodenproduktion (SMG-A5) fand unter Berücksichtigung des Arbeitspakets 4 statt, in den Pouch-Zellen gebaut wurden. Es wurde versucht, die Auswirkungen der Prozessparameter auf die Elektrodenproduktion zu verstehen.

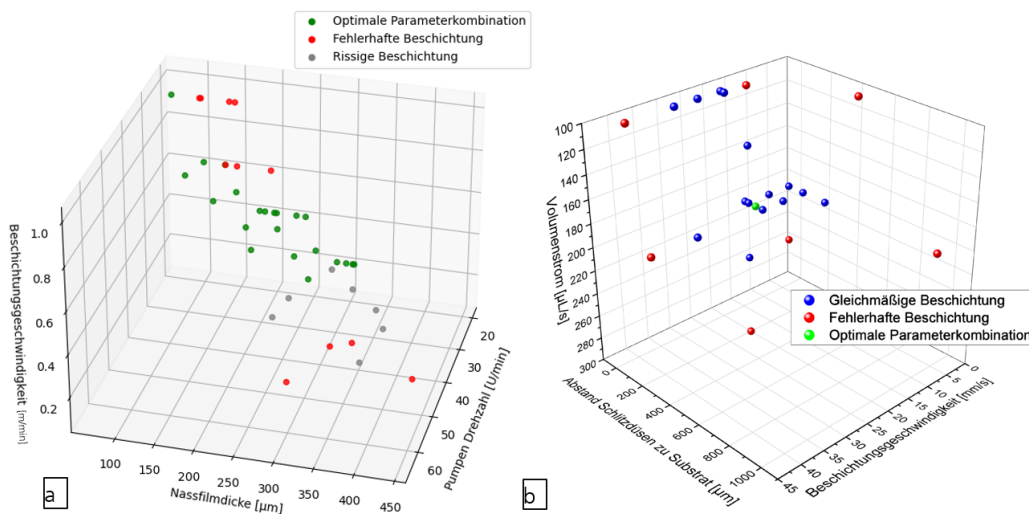


Abbildung 2.4-1.: Analyse der Fehlerauftritte in der Beschichtung einer Anodensuspension bei variierenden Einstellungen der Parameter. (a) Anode. (b) Kathode

Die Abbildung 2.4-1(a) zeigt den definierten dreidimensionalen Parameterraum. Die Auswirkungen von Variationen der Schlitzdüsenereinstellungen auf die Beschichtungsqualität wurden auf der Grundlage von Adhäsionseigenschaften, Homogenität und Geometrie analysiert. Darüber hinaus wurden die für AP1 und AP4 hergestellten Kathoden hinsichtlich der Prozessparameter untersucht und die Elektroden in zwei Kategorien eingeteilt: fehlerhaft oder gleichmäßig beschichtet. In Abbildung 2.4-1(b) ist der 3D-Parameterraum für die NCM622-Kathode mit einer bestimmten Zusammensetzung dargestellt, und es wurde ein optimaler Parameterbereich ermittelt, der eine qualitativ hochwertige Beschichtung ermöglicht.

AP3: Anpassung LSP-Technologie für die R2R-Anlage

UAP 3.1 Hardware LSP - Anforderungen, Realisierung und Test des LSP-Laboraaufbaus

In diesem Arbeitspaket sollte das IKTS-MD den vorhandenen Laboraufbau so modifizieren, dass er den Anforderungen der Inline-Messungen entspricht. Zu Beginn des Arbeitspakets wurden einige Schlüsselparameter des LSP-Prüfsystems festgelegt. Diese umfassen insbesondere den Zielfehlertyp, die optische Auflösung (11 μm) des Systems, die Messgeschwindigkeit (4 m/min) sowie die entsprechenden Auswertungen. Der Zweck des Laboraufbaus war es, alle Messeinstellungen zu testen und darauf vorbereiten, sie auf den realen Fertigungsprozess zu übertragen, um Inline-Inspektionen durchzuführen. Darüber hinaus wurde ein Konzept für ein Multikamerasystem vorgeschlagen, um die optische Auflösung des LSP-Messsystems zu erhöhen. Im Projektzeitraum wurde der Laboraufbau weiter optimiert, um die Anforderung eines Rolle-zu-Rolle-Systems zu erfüllen. Der Schwerpunkt der Forschung lag auf der Automatisierung und Verbesserung des Messsystems im Labor. Im Projekt wurde ein Konzept entwickelt und getestet, das auf dem Einsatz von

Drehgebern basiert. Der Vorteil bestand darin, dass die vom Drehgeber erzeugten Signale zur Steuerung der Zeilenkamera verwendet wurden, was es der Kamera ermöglichte, Daten in Bezug auf die Elektrodenposition genauer zu erfassen und 100 % des Oberflächenbilds zu erfassen, ohne redundante Informationen zu erzeugen. Nach mehreren Versuchen wurde folgender Ablauf ermittelt: das Trigger-Signal wird an die Kamera bzw. an eine Zeitsteuerung gesendet, so dass die Kamera sofort aktiviert ist und Bilder mit einer vordefinierten Belichtungszeit aufnimmt. Nach Erhalt des Trigger-Signals sendet die Zeitsteuerung digitale Signale an die Laser- und LED-Lichtquellen mit einer konstanten Zeitverzögerung, um die Beleuchtung beider Lichtquellen in einer vordefinierten Weise zu aktivieren (einmalige Beleuchtung oder alternierende Beleuchtung). Darüber hinaus ist es möglich, durch die Verwendung der verschiedenen Ausgangskanäle des Drehgebers die Laufrichtung der Elektrodenfolie zu unterscheiden, so dass das LSP-Messsystem nur ausgelöst wird, wenn sich die Elektrodenfolie vorwärtsbewegt. Zusätzlich wurde der Laboraufbau verbessert. In der neuen Konstruktion sind die Kamera und die LED-Quelle über eine Adapterplatte verbunden, die auf einem einzigen Lineartisch montiert ist, der die Höhe beider Komponenten gemeinsam anpasst. Dadurch sind die von unterschiedlichen Proben erzeugten Daten vergleichbar, selbst wenn der Aufbau geringfügig verändert wird. Die Abbildung 3.1-1 zeigt den Laboraufbau mit den einzelnen Komponenten: Zeilenkamera sowie ein Objektiv für die Aufnahmen der LED- und Speckle-Bilder. Der Linienlaser der Klasse 3 dient zur Erzeugung der Speckle-Muster. Ein Linien-LED-Gerät beleuchtet die Probe, um ein entsprechendes referentielles Weißlichtbild zu erzeugen. Die Rollbahn als Probenträger kann schrittweise mit einer maximalen Bewegungsauflösung von 1,5 μm gesteuert werden.

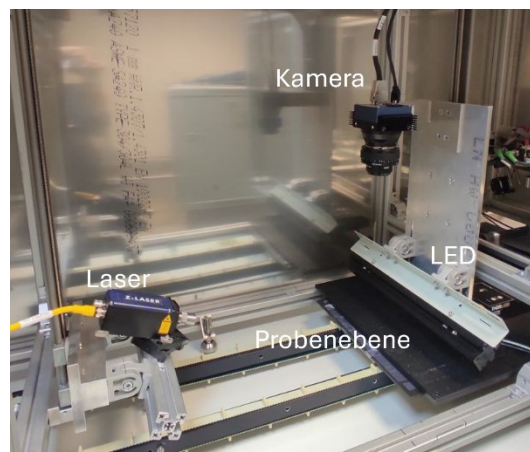


Abbildung 3.1-1: Laboraufbau für die Prüfung von Elektrodenfehlern. Der Aufbau bestand im Wesentlichen aus drei Komponenten: Linienlaser, Linien-LED und Zeilenkamera. Die Proben werden mittels eines kleinen, steuerbaren Förderbands bewegt.

In diesem Arbeitspaket wurde der Laboraufbau zur Aufnahme von Elektrodenbildern für die Erstellung einer LSP-Datenbank verwendet, die wiederum zur Entwicklung eines KI-Modells zur automatischen Inline-Fehlererkennung genutzt wurde. Zu diesem Zweck wurden vom IKTS-DD und PEM Elektrodenfolien mit verschiedenen vordefinierten Fehlern (z.B. Agglomerate, Pinholes, Risse, Linienfehler und Fremdpartikel) hergestellt. In Tabelle 3.1-1 sind alle Proben aufgeführt, die mit dem

LSP-Aufbau im Labor am IKTS-MD gemessen wurden. Darüber hinaus sind in Abbildung 3.1-2 mehrere Messbilder des LSP dargestellt. Es ist zu erkennen, dass einige Defekte in den gezeigten Ergebnissen leicht zu erkennen sind. Die Entwicklung einer kompatiblen KI-Auswertungssoftware unter Verwendung der gemessenen Bilder wird im nächsten Abschnitt dieses Berichts detailliert vorgestellt.

Tabelle 3.1-1: Gemessene Proben im Rahmen des Projekts mit Laboraufbau.

Typ	Bezeichnung	Anzahl (1 m lang Proben)	Hersteller
Kathode	KnNCM_025	38	IKTS-DD
Kathode	KnNCM_023_KB	58	IKTS-DD
Kathode	KnNCM_023_FremdM	56	IKTS-DD
Kathode	K-Agl_KB_1	4	IKTS-DD
Kathode	KnNCM_N025_KB-FG	58	IKTS-DD
Kathode	KnNCM_N028_KB	8	IKTS-DD
Kathode	KnNCM_N30 und N31	5	IKTS-DD
Anode	KW 39 und 40	71	PEM
Anode	KW 50	36	PEM
Summe		334	

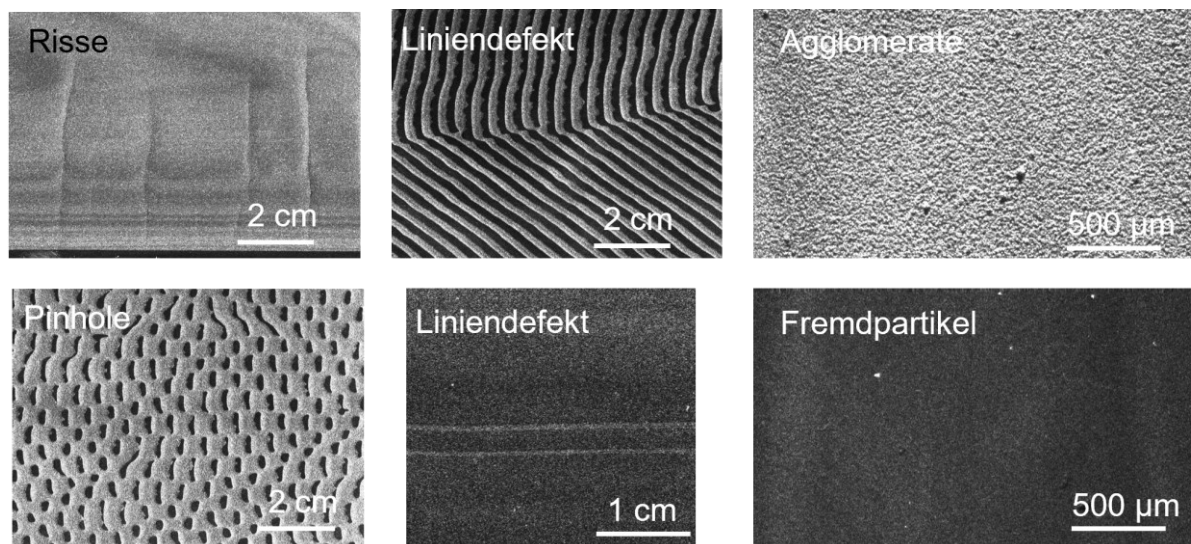


Abbildung 3.1-2: Speckle-Bilder, die von Elektrodenproben mit verschiedenen Defekten aufgenommen wurden.

UAP 3.2 Software LSP - Anforderungen, KI-Realisierung und Test von Algorithmen

In diesem Arbeitspaket entwickelte das IKTS-MD die Software für das LSP-Inline-Überwachungssystem einschließlich eines auf Techniken der künstlichen Intelligenz basierenden Bewertungsalgorithmus und einer entsprechenden graphischen Benutzeroberfläche (GUI). Zu Beginn des Projekts wurde eine ausführliche Untersuchung durchgeführt, um ein geeignetes KI-Modell auszuwählen, das die automatischen Auswertungen während der Inline-Inspektion durchführt. Nach Literaturrecherche und Demotests wurde auf der Grundlage der Auswahlkriterien für die Leistungsparameter, wie z. B. Inferenzgeschwindigkeit, Genauigkeit, Trainingsgeschwindigkeit und Latenzzeit, das Objekterkennungsmodell „YOLO (You Look Only Once)“ ausgewählt. YOLO ist ein hochmoderner Objekt-Erkennungsalgorithmus, der die Art und Weise revolutioniert hat, wie Objekte in

Bildern und Videos erkannt werden. Im Gegensatz zu traditionellen Methoden der Objekterkennung, die Klassifizierer auf verschiedene Teile eines Bildes anwenden, behandelt YOLO die Erkennungsaufgabe als ein einzelnes Regressionsproblem. Es teilt das Bild in ein Raster und sagt gleichzeitig die Begrenzungsrahmen und Klassenwahrscheinlichkeiten für jede Rasterzelle voraus, was eine Echtzeitverarbeitung ermöglicht. Da es sich bei YOLO um ein supervised learning Verfahren handelt, wurden die im UAP 3.1 erfassten Bilddaten zur Aufbereitung der Trainingsdaten nach einem Labeling-Prozess verwendet. Beim Labeling wurden die Defekte manuell mit der Software „Labelstudio“ markiert und die erfassten Informationen wie Typ und Position des Defekts entsprechend dokumentiert. Nach der Diskussion mit dem Projektpartner, der die Elektroden herstellt, wurden 10 typische Fehlerarten für die Prüfaufgaben der LSP definiert. Die Fehlertypen und die entsprechenden Klassennummern sind: 0-Agglomerate, 1-Pinhole-Längs, 2-Pinhole-Quer, 3-Pinhole-Rund, 4-Risse-Längs, 5-Risse-Quer, 6-Line-Längs, 7-Line-Quer, 8-Line-Diag und 9-Fremdpartikel.

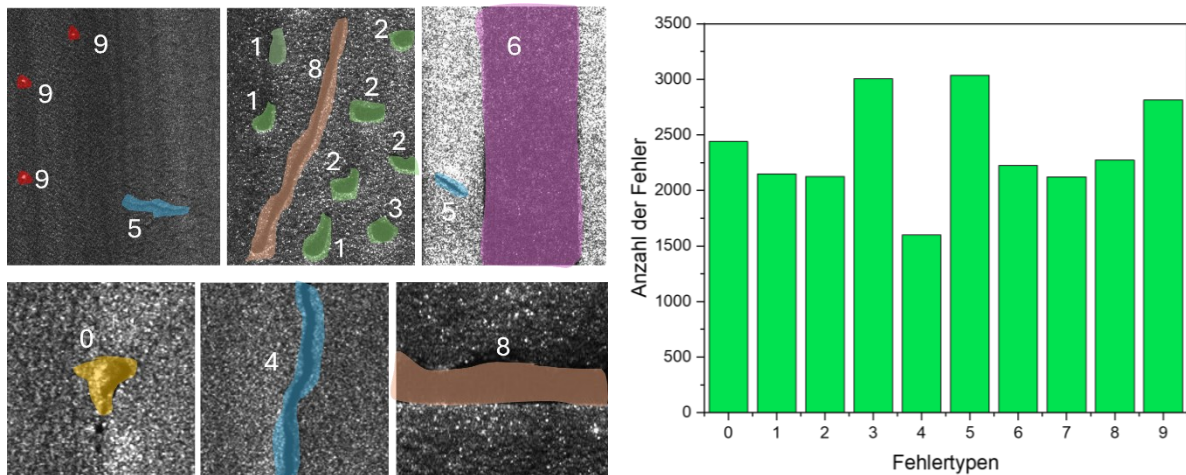


Abbildung 3.2-1 (links): Beispiele für alle mit Speckle-Bildern erfassten Fehlertypen (0-Agglomerate, 1-Pinhole-Längs, 2-Pinhole-Quer, 3-Pinhole-Rund, 4-Risse-Längs, 5-Risse-Quer, 6-Line-Längs, 7-Line-Quer, 8-Line-Diag und 9-Fremdpartikel). (rechts): detaillierte Anzahl der einzelnen Fehlertypen, die für das Training des KI-Modells verwendet wurden.

Abbildung 3.2-1 (links) zeigt die Beispiele aller Defekttypen und ihr Aussehen auf den aufgenommenen Speckle-Bildern. Im Rahmen dieses Projekts wurden mehr als 11.000 Speckle-Bilder für den Aufbau der LSP-Datenbank gelabelt. Da für ein optimales Training des KI-Modells vergleichbare Fehlermengen für jeden Fehlertyp erforderlich sind, wurde ein Teil der gelabelten Speckle-Bilder sowie der synthetischen Bilder für das Training verwendet. Um die Anzahl der Fehler für jeden Typ auszugleichen, wurde ein Teil der markierten Daten für den Trainingsprozess ausgewählt. Dabei wurde eine durchschnittliche Anzahl von 2500 für jeden Fehlertyp berücksichtigt (detaillierte Informationen siehe Abbildung 3.2-1 (rechts)). Bilder mit verschiedenen Defekten wurden nach dem Trainingsprozess vom KI-Modell erkannt. Im Projekt wurden die Ergebnisse anhand des trainierten Modells auf mit YOLOv5 ermittelt.

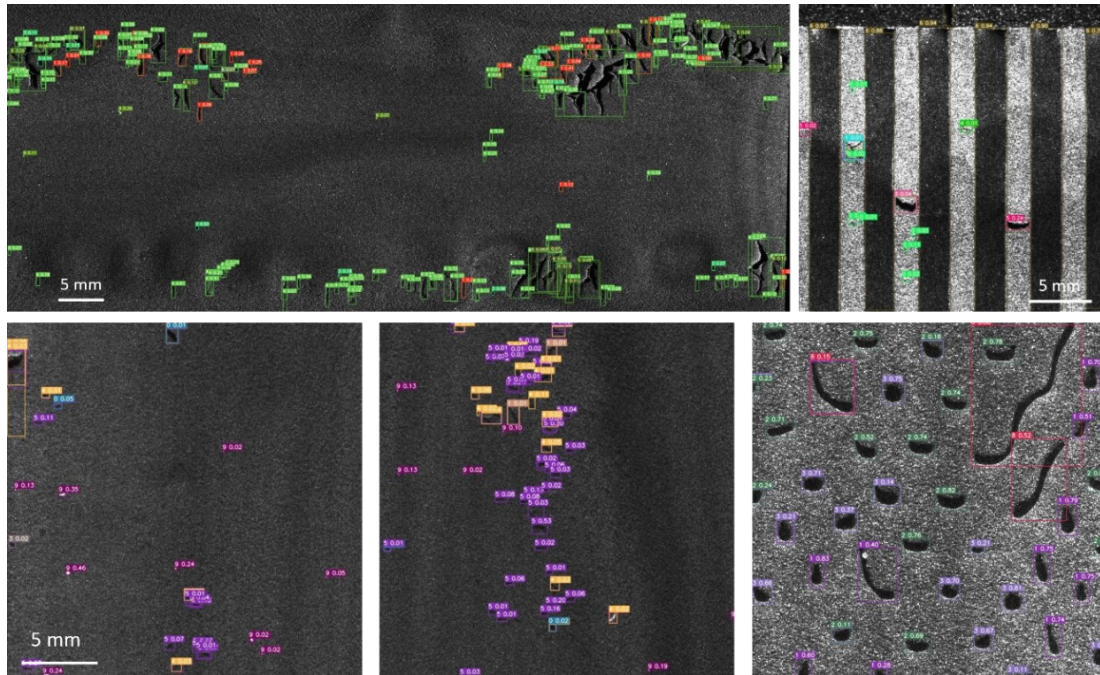


Abbildung 3.2-2: Beispiele der Ergebnisse der KI-Auswertung, wobei verschiedene Fehler auf den Bildern markiert sind.

Abbildung 3.2-2 zeigt dazu einige Beispiele. Die Originalbilder für die Erkennung wurden von der Elektrode aufgenommen, die im Rahmen des Projekts "KritBatt" hergestellt wurden und nicht in den Trainingsprozess einbezogen waren. Die Defekte sind durch Kästchen gekennzeichnet und die Typen sind mit den entsprechenden Nummern klassifiziert. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass alle definierten Fehlertypen korrekt erkannt und klassifiziert werden. Die Geschwindigkeit der Auswertung ist ein weiterer wichtiger Punkt, der berücksichtigt werden sollte. Um die Geschwindigkeit der Inferenz zu erhöhen und den Anforderungen einer Inline-Echtzeitauswertung gerecht zu werden, wurde das Modell in das Format von Open Neural Network Exchange (ONNX) konvertiert und anschließend in die Inferenzplattform TensorRT implementiert. Während des Inferenzprozesses reduziert TensorRT die benötigte Zeit und den Speicherplatz durch die Verwendung von Optimierungstechnologien der GPU-Hardware wie Halbpräzisionsrechnung, dynamische Grafikplanung und effiziente Speicherverwaltung für jede spezifische Hardware-Architektur. TensorRT ist ein sehr effektives Tool, das Deep-Learning-Entwicklern und Forschern dabei helfen kann, ihre Modelle schnell auf GPUs zu deployen und zu betreiben, um die Inferenzprozesse zu beschleunigen, die Effizienz und Leistung zu verbessern. Bei der derzeitigen Rechenleistung im Labor dauert die Erkennung jedes Bildes mit einer Größe von 640 x 640 Pixeln etwa 8 ms. Die gesamte Breite der Elektrode (30 cm) besteht aus 13 Bildern (640 x 640 Pixel, mit einer Auflösung von 37 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$) und in diesem Fall, für eine 23 mm lange Elektrodenfolie, beträgt die Auswertzeit ca. 120 ms, was einer Auswertegeschwindigkeit von 11 m/min entspricht.

Zur weiteren Bewertung der Leistung des AI-Modells wurden die Zuverlässigkeit der Ergebnisse, die Präzision und die Genauigkeit der Erkennungen mit Hilfe der Konfusionsmatrix berechnet. Erkannte Fehler (TP), falsch erkannte Fehler (FP) und

nicht erkannte Fehler (FN) sind die Einträge der Konfusionsmatrix. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.2-1 dargestellt. Das trainierte KI-Modell erreicht eine Gesamtpräzision von 97 % und eine Gesamtgenauigkeit von 90 %, was als akzeptabel gilt. Die Fehlertypen Agglomerat, Pinholes und Risse werden mit einer Präzision von über 97 % und einer Genauigkeit von über 94 % zuverlässig erkannt. Bei Linienfehlern liegt die Genauigkeit jedoch nur bei etwa 70 %, da deren Breite stark variiert. Der verwendete Datensatz umfasste nicht alle möglichen Breiten der Linienfehler, weshalb die Modellleistung in diesem Bereich eingeschränkt ist. Darüber hinaus wurden einige Bereiche mit einem Intensitätskontrast aufgrund der Intensitätsabweichung des Laserprofils vom KI-Modell als Liniendefekt erkannt. Eine Verbesserung wäre möglich, indem das Training mit zusätzlichen Daten erweitert wird, die unterschiedliche Breiten von Linienfehlern abdecken. Im Allgemeinen zeigen die im Rahmen dieses Projekts erstellte LSP-Datenbank und das KI-Modell eine zuverlässige Leistung bei der Fehlererkennung und -klassifizierung auf Elektroden von Lithium-Ionen-Batterien.

Tabelle 3.2-1: Ergebnisse der Leistungsbewertung des trainierten KI-Modells

Typ	Anzahl der Fehler	TP	FP	FN	Präzision [%]	Genauigkeit [%]
0	138	137	2	1	98,6	97,8
1	944	920	24	24	97,5	95,1
2	1102	1073	29	29	97,4	94,9
3	1797	1733	53	64	97,1	93,7
4	123	114	4	9	96,6	89,8
5	133	122	1	11	99,2	91,1
6	823	535	39	288	93,2	62,1
7	261	194	17	67	91,9	69,8
8	996	982	4	14	99,6	98,2
9	66	64	8	2	88,9	86,5
Summe	6383	5874	181	509	97.1	89.5

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

UAP 4.1 Systematische Messungen zu Materialkennwerten

Im UAP 4.1 wurden neben der prozessbegleitende Probencharakterisierung auch mikroskopische Aufnahmen von den getrockneten Proben und deren Fehler gesammelt. Dabei wurden sowohl ein Lichtmikroskop als auch einen Laser Scanning Mikroskop zu Visualisierung der Defekte verwendet. Nachfolgend wird das Beispiel Liniendefekte exemplarisch dargestellt.

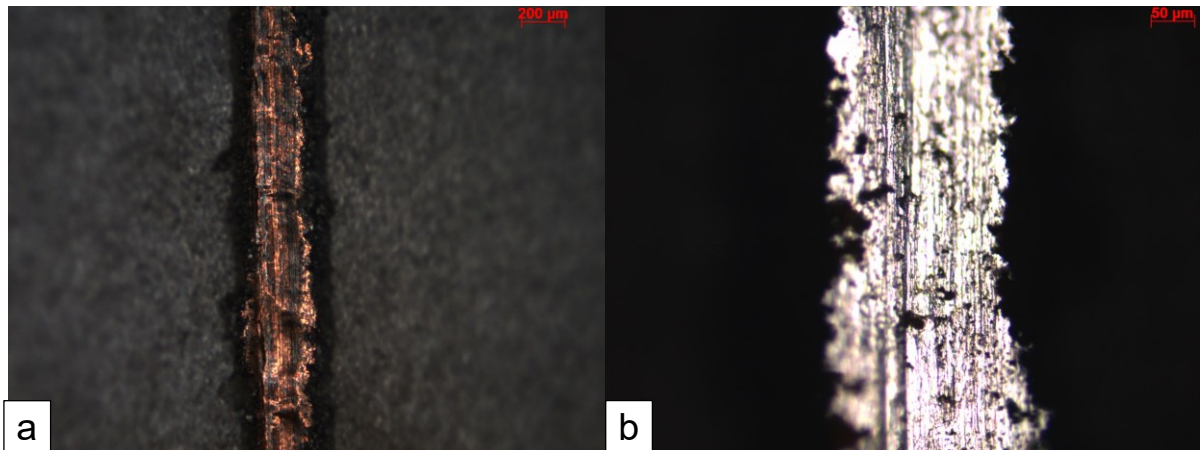


Abbildung 4.1-1: (a) Liniendefekt in einer Anode 1L33 (Graphit auf Cu-Folie) mit 5x und (b) einer Kathode V1D6 (NCM auf Al-Folie) mit 20x Vergrößerung.

Die Liniendefekte in der Abbildung 4.1-1 sind Lichtmikroskop-Aufnahmen von Modellproben der TU Dresden. Diese wurden durch die Überarbeitung defektfreier beschichteter Proben hergestellt und unbeschädigten Elektroden gegenübergestellt.

Mit der Messung konnten Verformungen der Ableiterfolie durch mechanische Beanspruchung während der lokalen Entschichtung sichtbar gemacht werden. Des Weiteren wurde der Defektrand genau abgebildet und vermessen. Die Defektränder sind sowohl bei Anoden als auch bei Kathoden unregelmäßig, was qualitativ in den Bildern und quantitativ an der hohen Standardabweichung von 10 bis 15% in der Breitenmessung (siehe Tabelle 4.1-1) deutlich zu erkennen ist. Insgesamt sind in den Proben Flächenanteile von jeweils 2,4 bis 2,7 % bei den 1-Liniendefekten und 4,7 % bei den 2-Liniendefekten entschichtet worden. Anhand dieser Proben und Parameter soll die Verschlechterung der elektrochemischen Performance im Verhältnis zur beschädigten Fläche in AP 2 untersucht werden.

Tabelle 4.1-1 : Geometrische Defektmerkmale der Modellproben der TUD.

Probe	Defektbreite (MW) [μm]	Standardabw. [μm]	Defektfläche
Anode 1L33	273	28	2,7%
Anode 2L34	236	45	4,7%
Kathode V2B4-1L	186	25	2,4%
Kathode V1D6-2L	188	27	4,7%

Weitere Defektarten wie Pinole und Fremdpartikel wurden dokumentiert und dem Probenhersteller für die Auswertung in den entsprechenden APs zur Verfügung gestellt.

Die Abbildung 4.1-2 zeigt eine mikroskopische Ansicht, die mit einem LEXT-Mikroskop aufgenommen wurde und die Oberfläche einer Elektrode zeigt. Die Analyse wurde an verschiedenen Anodenproben des PEM (RWTH Aachen) mit Beschichtungsfehlern, insbesondere Nadellöchern, durchgeführt. Die hervorgehobenen Bereiche sind die angezeigten Defekte. Darüber hinaus kann die Ausrichtung dieser Defekte anhand der Topologie der Separator-Folien identifiziert

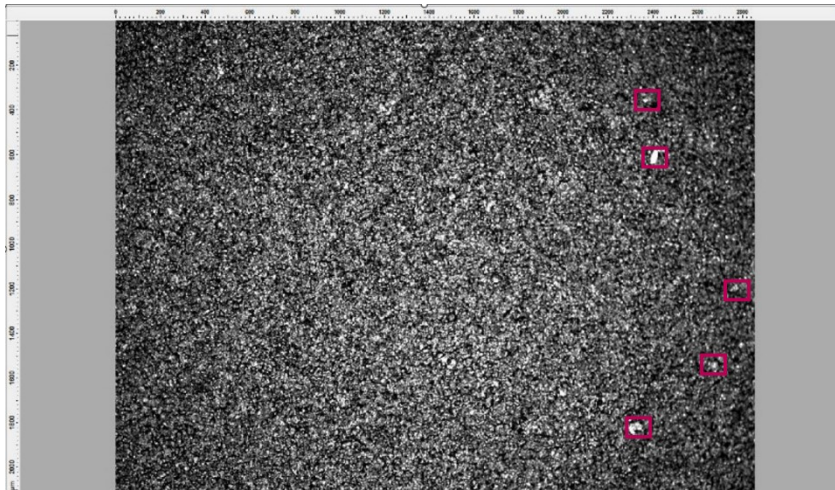


Abbildung 4.1-2: Mikroskopische Analyse von Anodenproben von PEM.

werden. Die erste Abbildung 4.1-3 zeigt die Kathodenelektrode, die durch Aufspritzen von 1,5 Gew.-% Cu-Partikeln ($<75 \mu\text{m}$) hergestellt wurde. Die mikroskopische Analyse zeigt das Vorhandensein identifizierbarer Partikel mit einer Größe von etwa $64,77 \mu\text{m}$ auf der Elektrodenfolie. Alle Elektrodenfolien wurden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern mit einer bestimmten Flächenkapazität entwickelt, um ihre Eignung für den Aufbau von Knopf- und Pouch-Zellen zu gewährleisten. Diese Standardisierung ermöglichte einen direkten Leistungsvergleich mit Referenzelektroden oder -zellen.

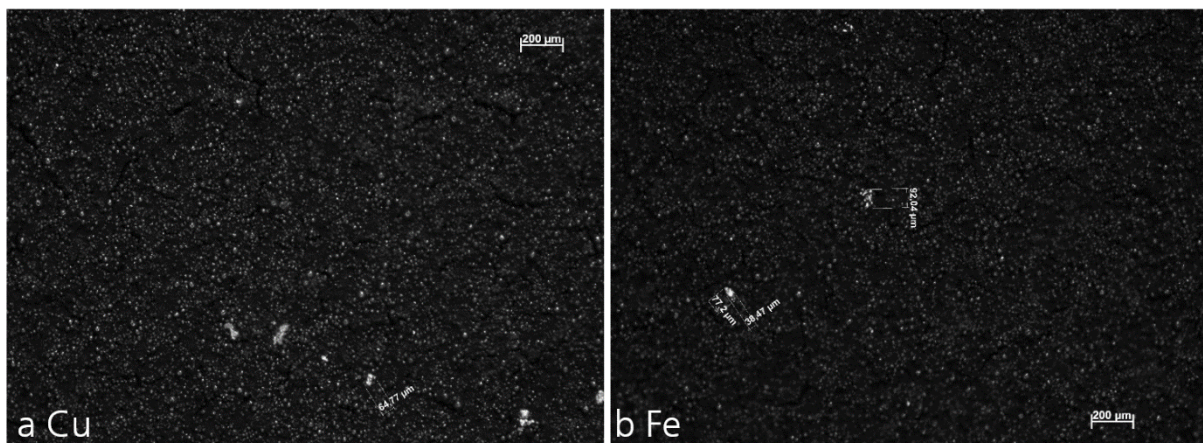


Abbildung 4.1-3: Mikroskopische Analyse von Kathodenproben (a) Cu auf der Elektrodenoberfläche, (b) Fe auf der Elektrodenoberfläche.

Das zweite mikroskopische Bild zeigt Fe-Partikel ($< 60 \mu\text{m}$), die ebenfalls mit einer Konzentration von 1,5 Gew.-% aufgesprüht wurden, wobei die gleiche Flächenkapazität beibehalten wurde.

UAP 4.2 Abgleich der LSP-Defekterkennung mit elektrochemischen Messungen

Auf Grundlage der Ergebnisse der vom Projektpartner TUD durchgeführten elektrochemischen Analyse wurde die kritische Größe einiger Arten von Defekten bestimmt. Die Schlussfolgerungen lauten:

- (1) Eisenpartikel > 6 µm sind für die Qualität der Kathode kritisch.
- (2) Die Toleranzgrenze für Stahlpartikel liegt bei 45 µm.
- (3) Darüber hinaus wurden als kritische Werte für Linien- und Punktdefekte 0,5 % für die Anode und 1 % für die Kathode ermittelt.

Angenommen, die Breite der Elektrodenbeschichtung beträgt 300 mm, dann entsprechen 0,5 % einer Breite von 1,5 mm. Ausgehend von der optischen Auflösung des in die Produktionslinie integrierten LSP-Systems, sollten diese kritischen Fehler mit Ausnahme der Eisenpartikel, die weniger als 6 µm groß sind, erkennbar sein.

UAP 4.3 Funktionskorrelation der Zellperformance von Einlagenzellen

In diesem Unterarbeitspaket konzentrierte sich das IKTS-DD auf die Untersuchung der Elektroden in Einzelschichtzellen, in Knopfzellen und Pouch-Zellen. Die Struktur von Knopf- und Pouch-Zellen wurde in Abstimmung mit PEM definiert und die Parameter bereitgestellt. Nachstehend folgt die Zusammenfassung der Ergebnisse der Zyklisierung von Knopf- und Pouch-Zellen, basierend auf den kritischsten Defekten:

(1) Kathoden mit Liniendefekten

Liniendefekte in der Kathode wurden durch Freilegen von 1 oder 2 Stromabnehmerlinien von jeweils etwa 1 mm Breite erzeugt. Ungefähr 2-4% der Fläche der Liniendefekte wurden berücksichtigt. Die Abbildung zeigt die Elektrode (Kathode) mit 2 x 1mm und 1 x 2mm breiten Liniendefekten.

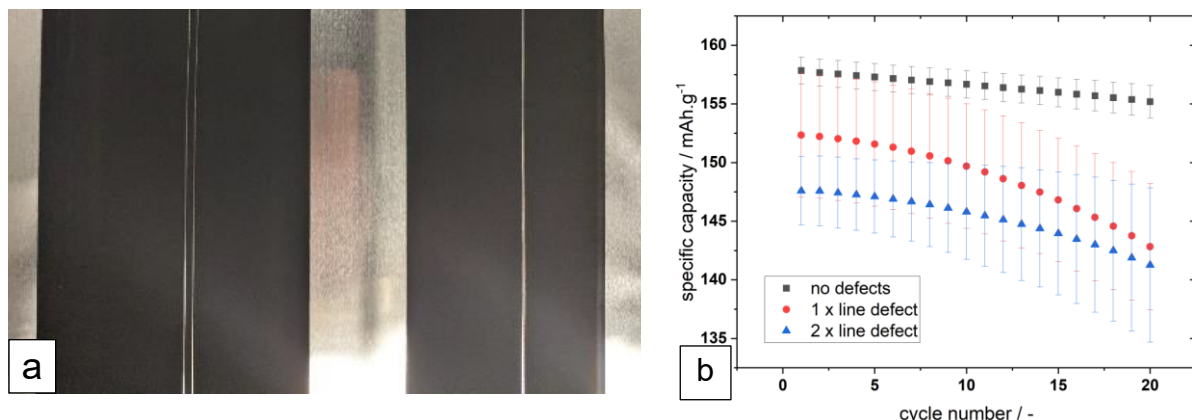


Abbildung 4.3-1: (a) Liniendefekte (2x und 1x) und (b) Zyklentest der Kathode mit Liniendefekten und Referenz-Kathode.

Mit dieser Elektrode wurden Knopfzellen hergestellt und verschiedene Lade- und Entladevorgänge durchgeführt, um die spezifischen Eigenschaften der Zelle zu bestimmen (zum Verfahren der Zyklustests siehe letzter Zwischenbericht).

Aus der Abbildung 4.3-1 ist ersichtlich, dass aufgrund der geringeren Menge der aktiven Materialien die spezifische Kapazität in den Zellen mit Liniendefekten (1x und 2x) geringer ist. Bei den Zellen mit Liniendefekten wurde jedoch eine starke Streuung und ein schnelles Alterungsverhalten beobachtet.

Nach der Untersuchung der Knopfzellen wurden Elektroden mit den Liniendefekten und zusätzliche Referenzelektroden in großem Maßstab hergestellt. Diese Elektroden wurden an die Partner PEM zum Bau von Monolayer-Pouch-Zellen, TUD zur elektrochemischen Charakterisierung und IKTS-MD zur Untersuchung der Elektrodenoberfläche mittels LSP-Sensor geliefert. Bei dieser Produktion wurde ein optimierter Parameter eingestellt, der aus dem vorangegangenen Experiment abgeleitet und ausgewertet wurde. Die Elektrode wurde mit den folgenden Parametern hergestellt:

Tabelle 4.3-1. Parameter der Elektrode (Ref-Kathode und Kathode mit Liniendefekten).

Eigenschaften	Kathode mit Liniendefekten	Referenz-Kathode
Kapazität [mAh/cm ²]	2,49	2,49
Flächengewicht [mg/cm ²]	16,5	16,61
Nassfilmdicke [µm]	246	246
Kalandrierung (Porosität)	30%	30%

Außerdem wurden Pouch-Zellen mit einem Format von 5 cm x 5 cm hergestellt. Tabelle 4.3-2 zeigt den erwähnten prozentualen Fehler in der Fläche.

Tabelle 4.3-2. Parameter der Elektrode - Prozentsatz fehler (Referenz-Kathode und Kathode mit Liniendefekten).

Eigenschaften	Prozentsatz Fehler	Gewicht Beschichtung [mg]
Referenz-Kathode	0%	380,26
Kathode mit Liniendefekten	4%	345,56

Innerhalb der untersuchten Pouch-Zellen gab es Liniendefekte mit einer Gesamtlänge von 2x 1 mm. Diese Defekte nahmen zusammen etwa 4 % der Probenfläche ein. Durch die fehlende Aktivmasse in dem Bereich der Liniendefekte, ist das Gesamtgewicht um 9,12 % reduziert. Die Pouch-Zellen sind unten in Abbildung 4.3-2 zu sehen.

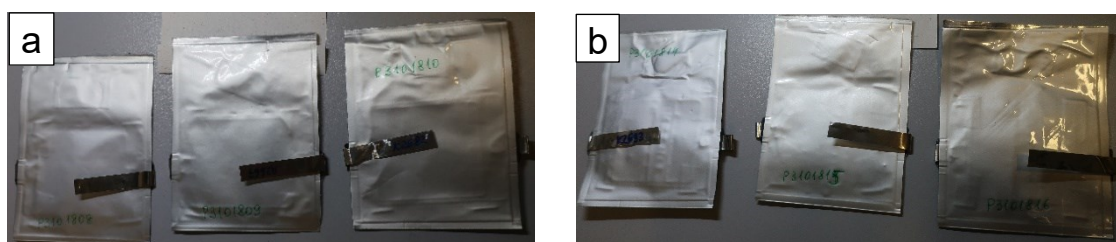


Abbildung 4.3-2: Pouch-Zellen (a) mit Referenz- Kathode und (b) mit Liniendefekten.

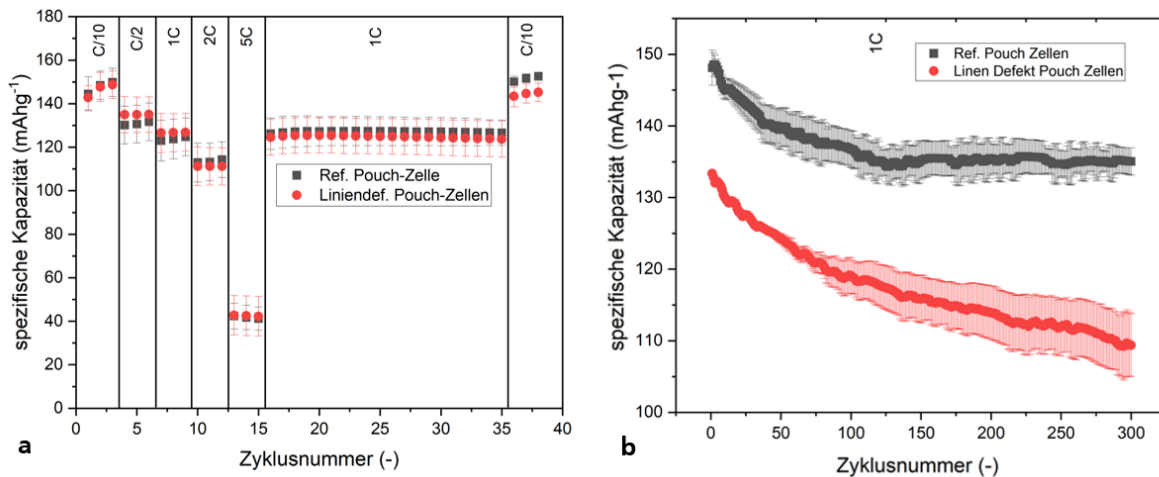


Abbildung 4.3-3: Elektrochemische Charakterisierung von Pouch-Zellen mit Referenz-Kathode und Liniendefekten (a) erste 40 Zyklen; (b) 300 Zyklen in 1C.

Die Pouch-Zellen wurden verschiedenen Lade- und Entladeregimen unterzogen, um die spezifischen Eigenschaften der Zelle zu bestimmen. Aus der Abbildung 4.3-3 (a) ist ersichtlich, dass die Pouch-Zellen mit Liniendefekten in der C/10-Phase (Phase der Kapazitätswiedergewinnung) etwas schlechter abschnitten als die Referenz-Kathode. Das Alterungsverhalten wurde jedoch nicht in einem kleineren Bereich der Zyklenzahl in Abbildung 4.3-3 (a) beobachtet, in dem der Formationstest C/10, der C-Rate-Test in C/2, 1C, 2C, 5C, der Stabilitätstest in 1C und die Abschlussphase in C/10 durchgeführt wurden. Diese Zellen werden dann für weitere 300 Zyklen in 1C zyklisiert. In Abbildung 4.3-3 (b) beginnen die Zellen mit Liniendefekten (rote Kreise) mit einer geringeren Anfangskapazität von etwa 130 mAh/g und weisen eine stärkere Degradation auf, die am Ende des Tests etwa 110 mAh/g erreicht. Im Gegensatz dazu weisen die Referenzzellen eine langsame und kontrollierte Degradation auf, was auf ein stabiles Zyklusverhalten hindeutet. Die defekten Zellen degradieren schneller und weisen einen höheren Kapazitätsverlust pro Zyklus auf, was auf verstärkte Nebenreaktionen, einen höheren Innenwiderstand oder strukturelle Degradation schließen lässt. Darüber hinaus weisen die Referenzzellen eine enge Streuung der Fehlerbalken auf, was auf eine gleichbleibende Leistung der getesteten Zellen hindeutet, während die defekten Zellen eine größere Streuung aufweisen, was auf eine größere Variabilität bei der Degradation hindeutet, die wahrscheinlich auf die durch die Defekte verursachten Unstimmigkeiten zurückzuführen ist.

(2) Metallkontamination in der Suspension und während der Beschichtung

In diesem Teil wurden zwei verschiedene Methoden angewandt, um eine Metallkontamination in die Elektrode einzubringen.

Tabelle 4.3-3. Elektrodenparameter für Kathode mit Eisen (1-6 µm) und mit Eisen (60 µm).

Eigenschaften	Kathoden mit Eisen (1-6 µm)	Kathoden mit Eisen (60 µm)
Kapazität [mAh/cm ²]	3,6	3,6
Flächengewicht [mg/cm ²]	31,6	31,6

Einbringen von Eisenpartikeln durch Mischen:

Im ersten Ansatz wurden am Ende des Mischvorgangs Eisenpartikel, etwa 30 % (9,43 g Fe in 50 g Suspension), mit einer Größe von 1-6 μm und 60 μm in die Slurry eingearbeitet. Die Eigenschaften sind in der Tabelle dargestellt. Anschließend wurden Halbzellen hergestellt und während der Zyklustests verschiedenen Lade- und Entladevorgängen unterzogen. Bei der ersten Probe, die eine geringere Größe (1-6 μm) an Eisenpartikeln enthielt, wurde die spezifische Kapazität nach dem Zyklustest bei C/10 gegen Ende des Tests wiederhergestellt. Die Probe mit den größeren Eisenpartikeln (60 μm) hingegen, wies während der Zyklen eine erhebliche Kapazitätsverschlechterung auf, die besonders bei höheren Lade- und Entladeraten (C/2, 1C, 2C) deutlich wurde. Überraschenderweise wurde trotz dieser Verschlechterung ein Wiederanstieg der Kapazität bei C/10 beobachtet, wenn auch auf einem niedrigeren Niveau als bei der anderen Probe. Diese Ergebnisse unterstreichen den signifikanten Einfluss der Partikelgröße auf die Elektrodenleistung. Das Vorhandensein größerer Eisenpartikel hatte eine ausgeprägtere nachteilige Wirkung auf die elektrochemische Leistung.

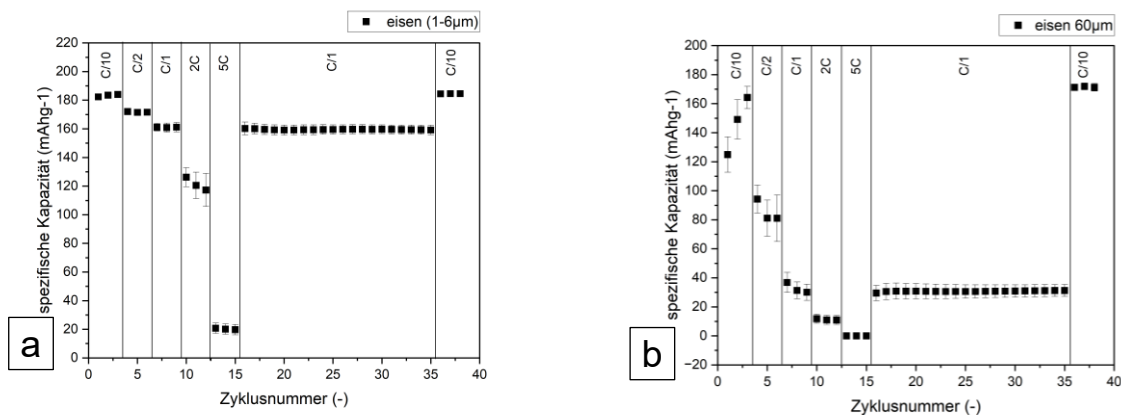


Abbildung 4.3-4: Elektrochemische Charakterisierung von Knopfzellen mit Kathode (a) mit Fe-Partikel (1-6 μm), (b) mit Fe-Partikel (60 μm).

Einbringen von Eisenpartikeln mittels Beschichtung:

Im zweiten Teil wurden Elektroden mit Fe-Kontamination und zusätzlich Referenzelektroden hergestellt. In diesem Versuch wurden die Fe-Partikel während des Beschichtungsprozesses aufgesprüht. Die Elektrode wurde mit den gleichen Parametern in Bezug auf Oberflächenkapazität und Flächenbelastung wie bei der Herstellung der Kathode mit Linienfehlern für den späteren systematischen Vergleich hergestellt.

Anschließend wurden mit Eisenpartikeln verunreinigte Knopfzellen hergestellt. Aus der für den zweiten Teil hergestellten Elektrode wurden sechs Knopfzellen hergestellt, wobei die Eisenkontamination etwa 10 % der Fläche der Knopfzellen ausmachte. Die Auswertung der Zyklentests in Abbildung 4.3-5 zeigt einen deutlichen Kapazitätsabfall und eine Beeinträchtigung der Kapazitätserhaltung nach 40 Zyklen in C/10. Dies gilt jedoch nicht für alle Zellen.

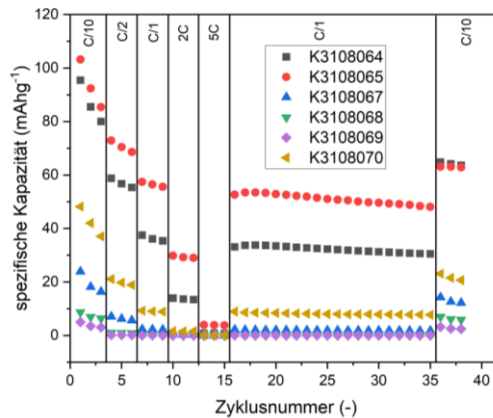


Abbildung 4.3-5: Elektrochemische Charakterisierung der Knopfzellen mit Eisenpartikeln.

Außer bei den Zellen K3108064 und K3108065 kam es bei allen Zellen zu einem Totalausfall. Diese Kapazitätsabnahme und der anschließende Ausfall sind wahrscheinlich auf die katalytische Rolle der Eisenpartikel in den Elektrolytwegen zurückzuführen. Diese katalytische Aktivität führt zu einem erhöhten irreversiblen Verbrauch während des Bildungszyklus, was die Gesamtleistung und die Lebensdauer der Zellen beeinträchtigt.

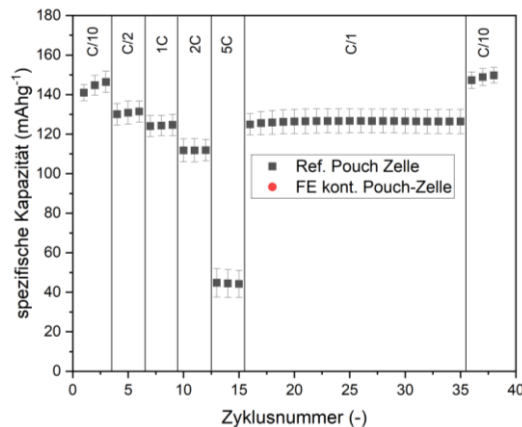


Abbildung 4.3-6: Elektrochemische Charakterisierung von Pouch-Zellen mit Ref-Kathode und Fe-Kontamination.

Nach dem Zusammenbau der Pouch-Zellen wurden die Lade- und Entladeprotokolle durchgeführt, um die spezifischen Eigenschaften jeder Zelle zu bewerten. Die Pouch-Zellen mit Eisenkontamination wiesen durchschnittlich 14 % Eisenpartikel in der Fläche auf, was mit einer Gewichtszunahme der Beschichtung um 6,31 % im Vergleich zur Beschichtung der Referenzkathodenzelle einhergeht. Die mit Eisenpartikeln verunreinigten Pouch-Zellen fielen während des Zyklustests vollständig aus. Wie aus der Abbildung 4.3-6 ersichtlich ist, hat nur die Referenzkathode die Zyklenleistung

erreicht. Dieses Versagen gibt Anlass zur Besorgnis über eine mögliche Ablagerung von Eisenpartikeln auf den Elektrodenoberflächen, die zu einer Dickeninhomogenität und einem anschließenden Kurzschluss führen könnte, insbesondere in Anbetracht der Verwendung dünner Separatoren. Die genaue Ursache des Versagens muss jedoch noch weiter untersucht werden.

Tabelle 4.3-4. Elektrodenparameter für Kathode mit Fe-kontamination und Referenz-Kathode.

Eigenschaften	Prozentsatz Fehler	Gewicht Beschichtung [mg]
Referenz-Kathode	0%	353,36
Kathode mit Fe Kontamination	14%	375,68

Einführung von Eisen-/Kupferpartikeln durch Beschichtung:

Kathoden mit Metallverunreinigungen wurden systematisch untersucht, indem Cu- (<75 µm) und Fe- (<60 µm) Partikel in einem kontrollierten Prozess eingebracht wurden. Die Metallpartikel wurden unmittelbar nach der Beschichtung vorsichtig mit einer Pinzette auf die Elektrode aufgebracht, wobei der Verunreinigungsgrad bei 1,5 Gew.-% lag. Die Elektroden hatten eine Flächenkapazität von 2,5 mAh/cm² und eine Flächenbeladung von 16,57 mg/cm².

Die mit Fe kontaminierte Pouch-Zelle überlebte den C/10-Bildungszyklus nicht und zeigte eine Schwellung. Bei der Untersuchung wurde ein dendritisches Wachstum an der Stelle des Fe-Partikels beobachtet, was zu einem Kurzschluss führte. Auch die mit Cu kontaminierten Pouch-Zellen schafften es, den C/10-Bildungszyklus zu durchlaufen, versagten aber kurz darauf auf die gleiche Weise wie die mit Fe kontaminierten Zellen. Diese Ergebnisse verdeutlichen den kritischen Einfluss der Metallpartikelkontamination auf die Leistung und Zuverlässigkeit der Zellen.

(3) Kathoden mit Agglomeraten

Kathoden, die Leitruß-Agglomerate enthalten, wurden durch ein kontrolliertes Mischverfahren hergestellt. Um die durch unsachgemäßes Mischen verursachte Agglomeration zu verhindern, wurde die Schlicker mit 0,25 Masseprozent Ruß formuliert. Die Kathodenformulierung besteht aus

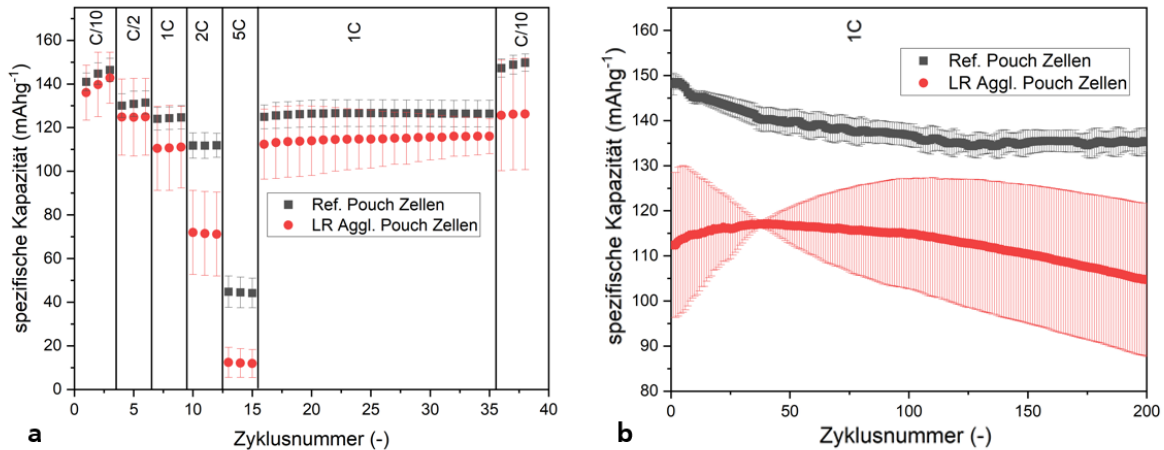


Abbildung 4.3-7: Elektrochemische Charakterisierung von Pouch-Zellen mit Referenz-Kathode und Leitruß-Agglomeraten (a) erste 40 Zyklen (b) 200 Zyklen in 1C.

91,44 % NCM 622, 4,43 % Super C65 mit zusätzlichen 0,25 %, um die Agglomeration zu fördern, und 4,13 % PVDF. Diese kontrollierte Mischmethode wurde eingesetzt, um Agglomerationseffekte zu vermeiden, die durch eine unsachgemäße Dispersion von Ruß in der Elektrodenaufschlämmung verursacht werden. Die Elektroden erreichten eine Flächenkapazität von 2,5 mAh/cm² und eine Massenbeladung von 16,57 mg/cm². Die Abbildung 4.3-7 zeigt die elektrochemische Analyse der mit Leitruß-Agglomeraten hergestellten Pouch-Zellen.

Aus Abbildung 4.3-7(a) ist ersichtlich, dass die Pouch-Zellen mit leitfähigen Rußdefekten in der C/10-Phase (Kapazitätswiederherstellungsphase) etwas schlechter abschnitten als die Referenzkathode, wobei der Fehlerbalken für die defekten Zellen höher war. In Abbildung 4.3-7(b) beginnen die mit Leitruß-Agglomeraten hergestellten Pouch-Zellen (rote Kreise) mit einer geringeren Anfangskapazität von etwa 110 mAh/g, und das Zyklusverhalten weicht im Laufe der Zeit erheblich ab, was durch die zunehmende Streuung der Fehlerbalken belegt wird. Im Gegensatz zu den Referenzzellen zeigten Pouch-Zellen mit Agglomeraten zunächst eine Verbesserung der Kapazität, bevor diese schnell abnahm. Dieses Verhalten deutet auf eine inkonsistente elektrochemische Leistung hin, die wahrscheinlich durch die inhomogene Verteilung der leitfähigen Ruß-Agglomerate verursacht wird und zu lokalen Schwankungen der Leitfähigkeit und des Lithiumionentransports führt. Dies deutet darauf hin, dass die Ruß-Agglomeration zu einer ungleichmäßigen Elektrodenleitfähigkeit führt, wodurch sich die Zellen viel schneller abnutzen als andere.

AP5: Fehlererkennung in Echtzeit im R2R-Prozess

UAP 5.1 Implementierung Inline-LSP und Defektmarkierung

Um die Anforderungen der LSP-Messtechnik zu erfüllen, die zu Beginn des Projekts definiert wurden, wurden einige Anpassungen auf der Grundlage des Laboraufbaus am IKTS-MD für die Inline-Implementierung vorgenommen, die im Technikum des IKTS in Freiberg durchgeführt wurde. Die wichtigste Optimierung war die Verbesserung der Systemauflösung durch den Einsatz eines Mehrkameranagements. Da

die optische Auflösung des Messsystems durch die Gesamtzahl der Pixel der Zeilenkamera und das entsprechende Sichtfeld bestimmt wird, besteht der Weg zur Erhöhung der Auflösung entweder in der Erhöhung der Gesamtzahl der Pixel der Kamera oder in der Verringerung des Messbereichs der Kamera. Um ein Gleichgewicht zwischen den Investitionskosten für die Hardware und der Messbreite der Elektrodenfolie herzustellen, wurde ein Konzept für ein später zu realisierendes Mehrkamarasystem entwickelt. Eine schematische Darstellung des entworfenen Systems zeigt Abbildung 5.1-1. In dem neuen System wurden zwei Kameras verwendet, um eine Breite von 360 mm abzudecken. In diesem Fall beträgt die Messbreite jeder Kamera 180 mm, und die angestrebte optische Auflösung von 11 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ wurde erreicht.

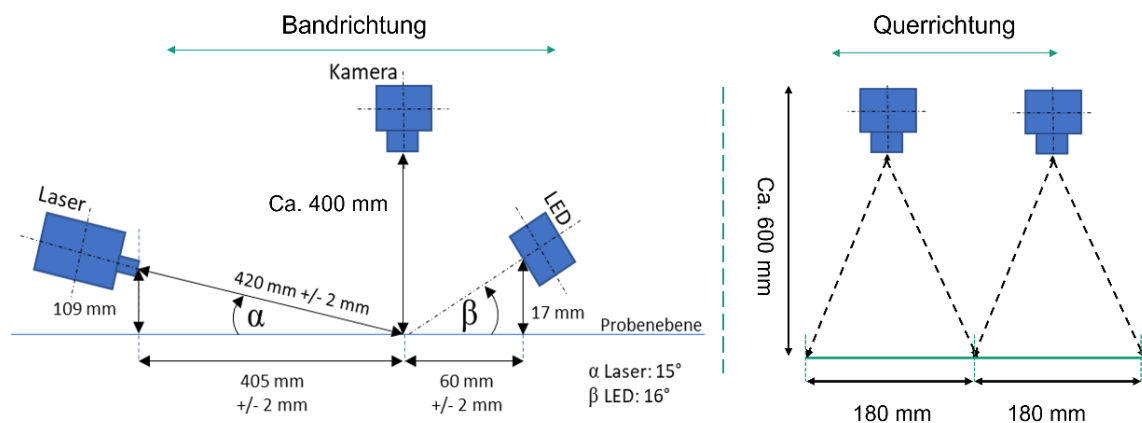


Abbildung 5.1-1: Schematische Darstellung des Konzepts des Inline-LSP-Messaufbaus.

Entsprechend dem in Abbildung 5.1-1 dargestellten Platzbedarf wurde die Position des LSP-Messsystems am Ende des Trockenkanals, direkt auf der Oberseite der Wickelstation, festgelegt. Da es sich bei der LSP-Technologie um eine Laseranwendung handelt, sollte die Inspektion in einer geschlossenen Schutzbox durchgeführt werden, um die Sicherheit der Mitarbeiter und anderer Materialien zu gewährleisten. Daher war die Schutzmaßnahme des LSP-Inspektionssystems ein weiterer wichtiger Bestandteil dieses Arbeitspakets. Aus Zeit- und Kostengründen wurden die Aufgaben der Implementierung der Laserschutzbox und der Anpassung der Führung der Elektrodenfolie für die LSP-Messungen an den Hersteller der Technikumsanlage für Elektroden (KMS) übergeben. Da das LSP-Messsystem durch Signale eines Drehgebers gesteuert wurde, bestand außerdem eine besondere Anforderung an die Auflösung des Drehgebers, damit die Messauflösung von 11 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ in Laufrichtung der Elektrodenfolie erreicht werden kann. Nach den Tests im Labor könnte die optische Auflösung des LSP-Systems den Wert von 11 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ erreichen, wenn die Auflösung des Drehgebers weniger als 5 $\mu\text{m}/\text{Zeile}$ beträgt. In diesem Fall wurde ein Drehgeber auf einer dünnen Welle montiert, die über ein Getriebesystem mit dem Rolle-zu-Rolle-System verbunden ist und eine 10-fach höhere Winkelgeschwindigkeit als die Rollen der Produktionslinie umsetzt, wodurch eine 10-fach bessere Auflösung des Drehgebers als bei der vorherigen Konstruktion

erreicht wird. Diese Aufgabe übernahm die FROLYT Kondensatoren und Bauelemente GmbH .

Nach Abschluss der oben genannten Aufgaben wurde das LSP-Messsystem implementiert (Abbildung 5.1-2). Der linke Teil der Abbildung zeigt das Laserschutzgehäuse und der rechte Teil das in dem Gehäuse montierte LSP-Messsystem.

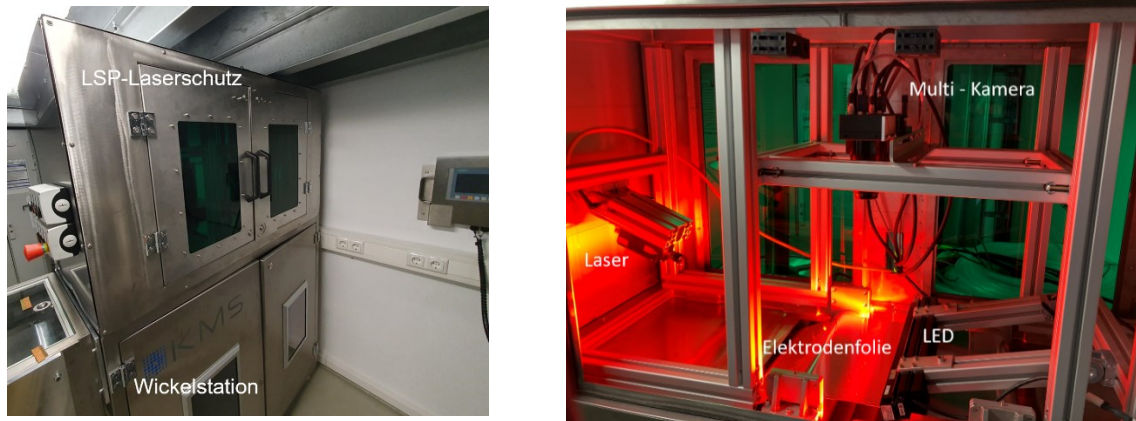


Abbildung 5.1-2 (links): Laserschutzbox. (rechts): Integriertes LSP-Messsystem im Technikum in Freiberg.

Neben der Hardware wurde in diesem Arbeitspaket auch eine kompatible Software des LSP-Systems entwickelt. Mit der Software können alle Komponenten des LSP-Messsystems wie Kameras, Laser und LED eingestellt werden. Die LSP-Software wurde in LabView geschrieben und der Auswertungsalgorithmus als Funktion eingebettet, die direkt für den Echtzeitbetrieb aufgerufen wurde. Die entsprechende grafische Benutzeroberfläche (GUI) ist in Abbildung 5.1-3 dargestellt und zeigt die Parametereinstellungen des Kamerasystems. Alle Parameter wie Belichtungszeit, Frequenz, Sichtfeld usw. können für beide Kameras in Echtzeit angepasst werden. Das grün umrahmte GUI-Fenster ist das Überwachungsfenster für Messungen, in dem die von beiden Kameras aufgenommenen Bilder in Echtzeit angezeigt werden.

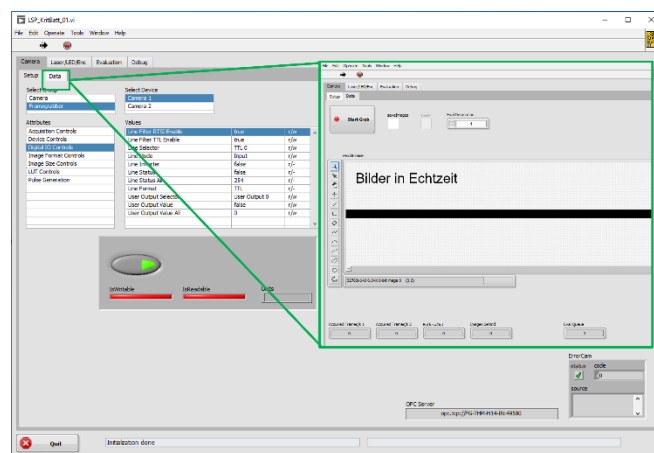


Abbildung 5.1-3: GUI der LSP-Software für Kameraeinstellungen und Echtzeit-Bildaufnahme.

Die GUI, die die Echtzeit-Auswertungsergebnisse anzeigt, ist in Abbildung 5.1-4 dargestellt. Die GUI besteht aus drei Hauptteilen, die im Bild jeweils durch blaue, rote

und grüne Umrandungen gekennzeichnet sind. Die Tabellen in den blauen Rahmen listen alle vom LSP-System erfassten Bilder in chronologischer Reihenfolge und mit ihren genauen Adressen auf. Das Bild im roten Kasten zeigt die Echtzeitergebnisse nach der Auswertung durch KI-Algorithmen. Es ist zu erkennen, dass drei Agglomerate erkannt und auf diesem Bild markiert wurden. Darüber hinaus werden parallel dazu einige statistische Auswertungen durchgeführt, die beispielsweise die kumulierte Anzahl der Defekte sowie die maximale und minimale Größe der Defekte anzeigen und in der Tabelle auf der linken Seite aufgeführt sind. Die Tabelle auf der rechten Seite zeigt Defekte und die entsprechenden Parameter wie Typ, Position und Größe des Defekts im aktuellen Bild an. Nach jeder Messung werden die ermittelten Ergebnisse durch einen zusätzlichen Algorithmus ausgewertet, um eine Fehlerkarte der gerade vom LSP-System gemessenen Elektrode zu erstellen. Eine solche Fehlerkarte könnte für den Vergleich zwischen LSP und der vom Projektpartner PEM implementierten Benchmarking-Methode verwendet werden.

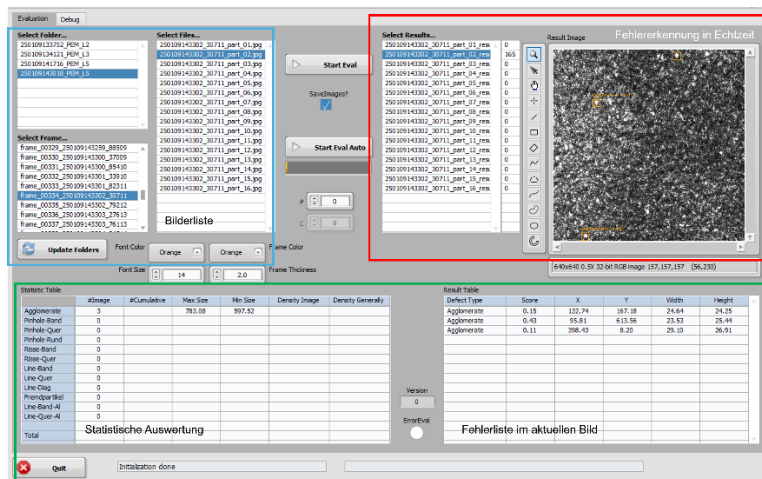


Abbildung 5.1-4: GUI der LSP-Software für Echtzeitauswertungen und statistische Analysen.

Außerdem wurde ein Markierungssystem an der Technikumsanlage installiert, um die Markierungen auf den Elektroden in Echtzeit aufzudrucken, wenn das LSP-System Fehler erkannt hat. Das System zur Fehlerkennzeichnung wurde im letzten Projektzeitraum weiterentwickelt.

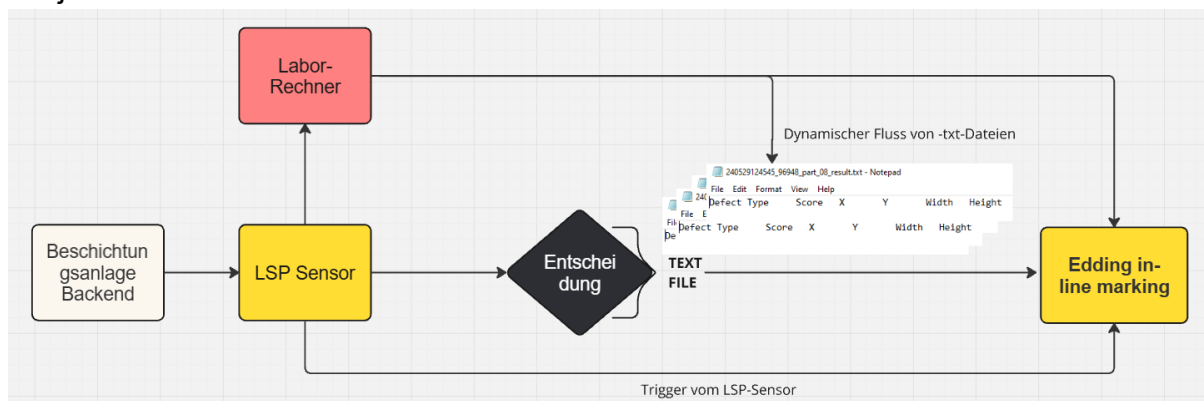


Abbildung 5.1-5: Prozessflussdiagramm für Markierungssystem.

Die Abbildung 5.1-5 zeigt ein Prozessablaufdiagramm für die Fehlererkennung und Entscheidungsfindung in einer Beschichtungsanlage. Der LSP-Sensor erkennt Defekte und kommuniziert sowohl mit dem Entscheidungs-Block als auch mit dem Lab-PC zur Analyse und Protokollierung. Der Entscheidungs-Block verarbeitet die Sensordaten und erzeugt Textdateien mit Fehlerdetails wie Typ, Punktzahl, Position (X, Y), Breite und Höhe. Die Auswertung innerhalb des Entscheidungs-Blocks erfolgt jedoch nicht in Echtzeit. Diese Textdateien folgen einem dynamischen Fluss, aus dem Fehlertyp und Punktzahl extrahiert werden. Das Markierungssystem verwendet eine



Abbildung 5.1-6: Beispielbild des Markierungssystems (Markierung mit Fehlertyp und Konfidenzbewertung)

Parameter Software, um diese Daten für den Druck zu übermitteln. Es war jedoch noch nicht möglich, einen direkten Auslöser vom LSP-Sensor zu erhalten, um die Kennzeichnung automatisch zu starten. Daher ist das Markierungssystem derzeit auf einen alternativen manuellen Auslösemechanismus angewiesen. Die Abbildung 5.1-6 zeigt ein Beispielbild des Systems mit dem Fehlertyp (Agglomerat) und einem Konfidenzwert von 0,82. Das Gesamtsystem ist darauf ausgelegt, die Fehlererkennung zu automatisieren, fundierte Entscheidungen zu ermöglichen und die Kennzeichnung bzw. Verarbeitung fehlerhafter Materialien effizient zu gestalten.

UAP 5.2 Validierung in der Pilotanlage unter produktionsnahen Bedingungen

Nach der Implementierung der LSP-Technologie, die in UAP 5.1 erfolgte, wurden in diesem Arbeitspaket mehrere Tests durchgeführt, um die Leistung des LSP-Systems zu überprüfen. Der erste Test bestand darin, die optische Auflösung des LSP-Messsystems zu überprüfen. Mit einem "Free-Run"-Modus der Kamera wurden Testbilder mit den LED-Beleuchtungen während des Laufs des Rolle-zu-Rolle-Systems aufgenommen. Bei Verwendung eines Millimeterpapiers als Testobjekt zeigten die aufgenommenen Bilder, dass das aufgenommene Bild in einem Abstand von 1 mm entlang des Millimeterpapiers etwa 101 Pixel aufwies. In diesem Fall beträgt die optische Auflösung des LSP-Messsystems ca. 10 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$. Da im "Free-Run"-Modus die Frequenz der Kamera möglicherweise nicht mit der Bewegungsgeschwindigkeit der Probe übereinstimmt, kann es zu einer Überabtastung kommen, und die tatsächliche Auflösung des Messsystems kann geringfügig von 10 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ abweichen, sollte aber immer noch im Bereich zwischen 10 und 11 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ liegen, was der zu Beginn des Projekts festgelegten Anforderung entspricht.

Anschließend wurde eine LSP-Messung in Echtzeit während der Herstellung einer, Kathodenelektrodenprobe durchgeführt. Mit Hilfe der oben erwähnten Software wurde die Oberfläche der Elektrodenfolie zu 100 % in Form von Speckle-Bildern erfasst. Defekte wurden während der Herstellung der Elektrodenfolie automatisch erkannt und klassifiziert. Abbildung 5.2-1 zeigt einige Speckle-Bilder als Beispiele, auf denen verschiedene Defekte erkannt und direkt auf den Bildern markiert wurden. Auf den resultierenden Bildern sind Defekte wie Agglomerate unterschiedlicher Größe und Löcher zu erkennen und korrekt markiert. Bei Betrachtung aller erkannten Ergebnisse lag die Größe des kleinsten Defekts bei etwa 50 µm. In diesem Fall erfüllte die Leistung des LSP-Systems die in diesem Projekt definierten Anforderungen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die LSP-Technologie in einer Inline-Umgebung verifiziert wurde und die Leistung der LSP für die Fehlerkontrolle von Lithium-Ionen-Batterieelektroden während des Herstellungsprozesses geeignet ist.

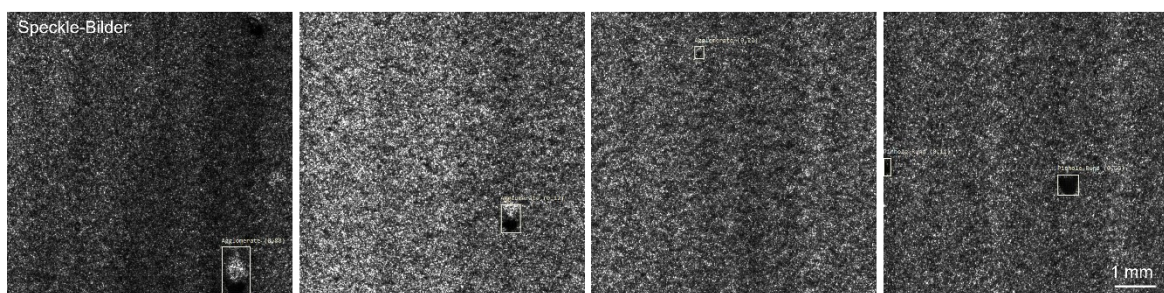


Abbildung 5.2-1: Echtzeit-Ergebnisse der Fehlererkennung während der Rolle-zu-Rolle-Herstellung der Elektrode.

AP6: Benchmark und Effektanalyse in Mehrlagenzellen

UAP 6.1 Vergleich mit einem kommerziellen, optischen Detektionsverfahren

In diesem Arbeitspaket hat der Projektpartner PEM ein Inspektionssystem von ISRA VISION in die Beschichtungsanlage des PEM der RWTH integriert. Technisch gesehen, verwenden beide Messsysteme (LSP und ISRA VISION) eine Zeilenkamera, um 100% der Fläche der Elektrodenfolie zu messen. Da die LSP ein Multikamerasystem und eine Zeilenkamera mit 16k Pixeln verwendet, während die PEM-Kamera nur 8k Pixel hat, ist die optische Auflösung des LSP-Systems viermal besser als die des kommerziellen Messsystems. Andererseits verwendet die LSP sowohl eine Laser- als auch eine LED-Quelle, um die Probe zu beleuchten, was im Vergleich zum kommerziellen Kamerasystem, das nur mit weißem Licht beleuchtet wird, mehr Details der Oberflächeninformationen liefert. In diesem Fall hat LSP einen Vorteil bei der Inspektion von kleinen Defekten. Darüber hinaus sind die Prinzipien der Auswertungen unterschiedlich. Das kommerzielle Kamerasystem wertet das aufgenommene Bild auf der Grundlage herkömmlicher Bildverarbeitungstechnologien aus, während LSP die Bilder mit Hilfe von KI-Algorithmen auswertet. Somit können die LSP-Ergebnisse die Defekte direkt automatisch klassifizieren, während die Defektklassifizierung des kommerziellen Kamerasystems auf der Grundlage der Erfahrung des Forschers erfolgen muss.

Die vom IKTS-DD hergestellten Kathodenproben und die von PEM hergestellten Anodenproben wurden mit dem LSP-System in Freiberg vermessen. Die Ergebnisse

wurden als Fehlerkarte dargestellt, die die Positionen aller erkannten Fehler zeigen. In diesem Fall kann die Verteilung aller Defekte über die Probenoberfläche direkt beobachtet werden. Als Beispiel sind die Messergebnisse einer Referenzanodenprobe und einer Kathodenprobe in Abbildung 6.1-1 dargestellt. Der obere Teil von Abbildung 6.1-1 zeigt die Ergebnisse der Anodenprobe (9 m lang), während der untere Teil der Abbildung die Ergebnisse der Kathodenprobe (5 m lang) darstellt. Aus den Ergebnissen lässt sich schließen, dass die LSP aufgrund einer hohen optischen Auflösung viele kleine Defekte erkennen kann, die von normalen optischen Inspektionssystemen nicht erkannt werden können.

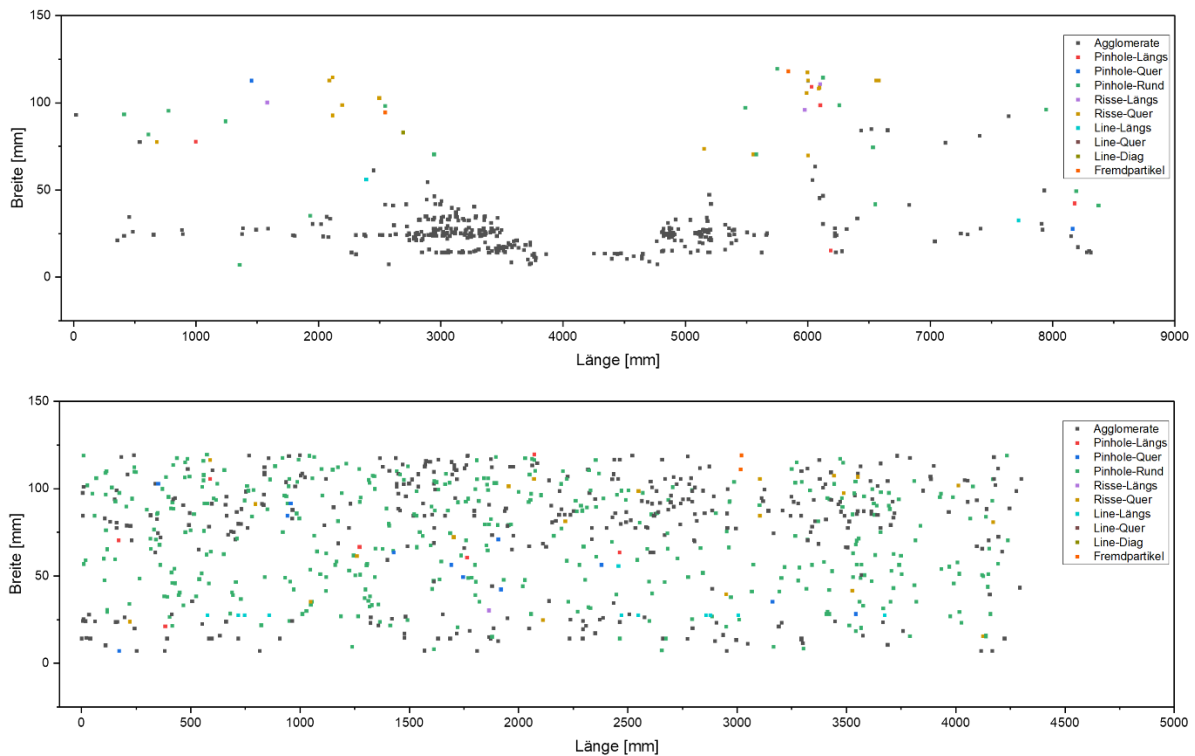


Abbildung 6.1-1: Ergebnisse der Inline-Messungen der LSP an Elektrodenproben, die von PEM bzw. IKTS-DD hergestellt wurden.

Die detaillierte Leistung des kommerziellen optischen Inspektionssystems, das an ähnlichen Elektrodenproben getestet wurde, ist im Bericht des PEM zu finden. Das in KritBatt entwickelte LSP-System verfügt bereits über vergleichbare Funktionalitäten, aber eine bessere Erkennungsfähigkeit im Vergleich zum kommerziellen optischen System bei PEM. Darüber hinaus zeigt Tabelle 6.1-1 einen allgemeinen Vergleich zwischen dem LSP-Messsystem und dem kommerziellen optischen System auf Systemebene. Es lässt sich schlussfolgern, dass das LSP-System mit seiner Echtzeitfähigkeit und der ausführlichen Oberflächencharakterisierung ein großes Potenzial für die Qualitätssicherung bei der Herstellung von Batterieelektroden hat.

Tabelle 6.1-1: Vergleich zwischen dem LSP-Messsystem und dem kommerziellen optischen System.

	Laser-Speckle-Photometrie	Optische Zeilenkamera
Messprinzip	Optisches Verfahren mit kohärenter Beleuchtungsquelle	Optische Verfahren mit inkohärenter Beleuchtungsquelle
Oberflächencharakterisierung	Fehlererkennung, Porositätsbestimmung, Struktur-/Texturanalyse	Fehlererkennung
In-line Prüfung	Aufnahmen bis 100 m/min möglich	Aufnahmen bis 100 m/min möglich
Vorteile	hohe Erkennbarkeit von kleinen Defekten, hoher Kontrast zwischen Defekt und Hintergrund, scharfe Kante des Defekts, hohe Auflösung	zuverlässige Erkennung von größeren Defekten, keine Laserschutzmaßnahmen

AP7: Ableitung von Toleranzbereichen & Konzeption FFB-Innovationsmodul

UAP 7.1 Nachweis der LSP-Toleranzschwelle

Gemäß den vorherigen Kapiteln wird die Leistungsfähigkeit des LSP-Systems bei der Fehlererkennung auf Elektrodenfolien nachfolgend zusammengefasst:

- Hardware
 - Multikamera-System, Auflösung 11 µm/Pixel auf 360 mm Folienbreite
 - Max. Aufnahmegeschwindigkeit: 16,5 m/min bei aktueller Auflösung
 - Messgeschwindigkeit bis zu 100 m/min durch optimale Kombination aus Zielauflösung und Kameraspezifikationen
- Auswertung
 - Gesamtpräzision von 97 % und eine Gesamtgenauigkeit von 90 % in Bezug auf 10 definierte Fehlerarten (siehe Tabelle 3.2-1)
 - Nachweisbare Fehler ab 50 µm – möglich bis 20 µm
 - Aktuelle Auswertegeschwindigkeit 10 m/min (37 µm/Pixel Auflösung, Offline-Umgebung)

Nach den Ergebnissen der elektrochemischen Analyse, die vom Projektpartner TUD durchgeführt wurde, konnten die kritischen Defekte mit dem aktuellen LSP-System, das in KritBatt entwickelt wurde, nachgewiesen werden, mit Ausnahme von Eisenpartikeln, die kleiner als 6 µm sind.

UAP 7.2 Festlegung von Fehlerkritikalitätskriterien

Folgende CTQ's (entscheidend für die Qualität) können aus den vorangegangenen Arbeitspaketen festgelegt werden:

Tabelle 7.2-1: Fehlerkritikalitätskriterien.

Parameter	Kritikalitätsschwelle
Lagerdauer Slurry	< 10 Tage

Agglomerate	Unsachgemäßes Mischen oder 0,25 % ist kritisch
Kupferpartikel	< 1,5 Gew.-%, Partikelgröße < 75µm
Eisenpartikel	< 1,5 Gew.-%, Partikelgröße < 6 µm
Stahlpartikel	< 1,5 Gew.-%, Partikelgröße < 45 µm
Linien- und Punktdefekte Anode	< 0,5 % der Beschichtungsbreite
Linien- und Punktdefekte Kathode	< 1 % der Beschichtungsbreite

Werden diese Werte eingehalten, kann von einer fehlerfreien Beschichtung ausgegangen werden, die keine Performanceverschlechterung zeigt. Alle Parameter können mit dem entwickelten LSP-System detektiert werden. Eine Ausnahme bilden hier die Eisenpartikel < 6 µm. Diese können mit der LSP-Auflösung von 11 µm nicht sicher erfasst werden. Um die Auftretenswahrscheinlichkeit während der Produktion zu senken, sind weitere Maßnahmen nötig.

UAP 7.3 Zusammenführung der Ergebnisse zu einem Innovationskonzept für die FFB

Gemäß den in AP 5 und AP 6 beschriebenen Ergebnissen wurde die Inline-Fähigkeit der LSP bereits validiert. Daher kann das Konzept des LSP-Systems auf die FFB übertragen werden. Das LSP-System könnte auf der Grundlage der Anforderungen der FFB praktisch weiter angepasst werden, beispielsweise durch die Anzahl der Kameras, die von der Kombination aus der Breite der Elektrodenfolie und der Zielauflösung abhängt. Die Leistung des KI-Modells könnte auch durch die Verwendung eines neuen Trainingsdatensatzes optimiert werden, der direkt von den durch FFB hergestellten Elektroden bereitgestellt wird. Innerhalb der Projektlaufzeit hat das IKTS-MD der FFB verschiedene Messkonzepte für ihre Fertigungsprozesse von Lithium-Ionen-Batterieelektroden vorgestellt.

In der folgenden Abbildung sind die Arbeitspakete mit Beteiligung von IKTS-DD/MD dargestellt. Danach haben alle Arbeitspakete den im Projektplan vorgesehenen Status erreicht.

	2021				2022				2023				2024			Status
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	
KritBatt	AP 2: Fehleruntersuchung und Klassifizierung mittels lokaler Analysemethoden (alle)															
	UAP 2.3:Fehlerklassifizierung und Quantifizierung mit Offline-Methoden															Abgeschlossen
	UAP 2.4: Ableitung von Prozess-Struktur-Wechselwirkungen zur Defektestehung															Abgeschlossen
	AP 3: Anpassung LSP-Technologie für die R2R-Anlage (IKTS-MD, IKTS-DD)															
	UAP 3.1:Hardware LSP - Anforderungen, Realisierung und Test des LSP-Laboraufbaus															Abgeschlossen
	UAP 3.2:Software LSP - Anforderungen, KI-Realisierung und Test von Algorithmen															Abgeschlossen
	AP 4: Fehler-/Funktionskorrelation am stationären LSP-Gerät (alle)															
	UAP 4.1: Systematische Messungen zu Materialkennwerten															Abgeschlossen
	UAP 4.2: Abgleich der LSP-Defekterkennung mit elektrochemischen Messungen															Abgeschlossen
	UAP 4.3: Funktionskorrelation der Zellperformance von Einlagenzellen															Abgeschlossen
	AP 5: Fehlererkennung in Echtzeit im R2R-Prozess (alle)															
	UAP 5.1: Implementierung Inline-LSP und Defektmarkierung															Abgeschlossen
	UAP 5.2:Validierung in der Pilotanlage unter produktionsnahen Bedingungen															Abgeschlossen
	AP 6: Benchmark und Effektanalyse in Mehrlagenzellen															
	UAP 6.1: Vergleich mit einem kommerziellen, optischen Detektionsverfahren															Abgeschlossen
	AP 7: Ableitung von Toleranzbereichen & Konzeption FFB-Innovationsmodul (alle)															
	UAP 7.1: Nachweis der LSP-Fehlertoleranzschwelle															Abgeschlossen
	UAP 7.2: Festlegung von Fehlerkritikalitätskriterien															Abgeschlossen
	UAP 7.3: Zusammenführung der Ergebnisse zu einem Innovationskonzept für die FFB															Abgeschlossen

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

- du Baret de Limé, A.; Lein, T., Maletti, S.; Schmal, K.; Reuber, S.; Heubner, C. and Michaelis, A.: Impact of Electrode Defects on Battery Cell Performance: A Mini Review. Batteries & Supercaps 2022, 5, e202200239, doi.org/10.1002/batt.202200239.
- Chen, L., Cikalova, U., Münch, S., Stüwe, T., Dam, V., Bendjus, B., „Artificial Intelligence – A Solution for Inline Characterization of Li-Ion Batteries“, International Conference on NED 4.0, Berlin, 24-27 Oktober, 2022.
- du Baret de Limé, A. Werwein, D. Hofmann, T. Lein, S. Pavón, M. Partsch, „In-line monitoring in electrode manufacturing: a research-based approach to quality assurance“, Vortrag bei den Graz Battery Days, 20-21 September 2022
- Klarák J, Chen L, Cikalova U, Malik P, Andok R, Bendjus B. Defect detection in battery electrode production using supervised and unsupervised learning with laser speckle photometry data. Advances in Science and Technology Research Journal. 2025;19(4):258-269. doi:10.12913/22998624/200823.