

## Mikrostruktur statt Marker – lückenlose Rückverfolgbarkeit in der Produktion

# Markierungsfreie Rückverfolgung in der Zellfertigung

G. Riexinger, D. J. Regina, L. Semrok, T. Schmid-Schirling, D. Carl, A. Sauer

**ZUSAMMENFASSUNG** Der Beitrag stellt eine markierungsfreie Track-&-Trace-Lösung für Elektroden- beziehungsweise Endlosmaterialien vor. Die Identifikation anhand der Oberflächenmikrostruktur ermöglicht die prozessübergreifende, eindeutige Zuordnung und Rückverfolgung einzelner Bandsegmente. Dies bildet die Grundlage für eine datenbasierte Prozessoptimierung. Die Systemintegration im ZDB und bei einem Industriepartner zeigte hohe Wiedererkennungsraten. Die Lösung ist skalierbar und branchenübergreifend einsetzbar.

### STICHWÖRTER

Digitalisierung, Produktionstechnik, Batteriefertigung

## 1 Einleitung

Eine moderne, digitale und effiziente Produktion hochqualitativer Lithium-Ionen-Batterien ist die Grundlage wettbewerbsfähiger und leistungsfähiger Energiespeicher sowie bezahlbarer Elektrofahrzeuge. Mit steigender Produktionskapazität wachsen die Anforderungen an Qualität, Sicherheit und Transparenz entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Dies zeigt sich auch in der EU-Batterieverordnung [1]. Diese zielt darauf ab, die Rückverfolgbarkeit von Batteriematerialien entlang der Lieferkette zu verbessern und verpflichtet die Hersteller, Nachweise zu Herkunft, Verarbeitung und Recyclingfähigkeit der Materialien im Rahmen des digitalen Batteriepasses bereitzustellen. Um die gesetzlichen Vorgaben zu erfüllen und gleichzeitig Fehler frühzeitig zu erkennen und somit Ausschuss zu minimieren, ist eine durchgängige Rückverfolgbarkeit auf Prozessebene erforderlich. Zur Identifikation und Rückverfolgung einzelner Batteriezellen wurden bereits verschiedene Ansätze untersucht [2, 3].

Die in diesem Beitrag vorgestellte Lösung ermöglicht eine markierungsfreie, lückenlose Zuordnung zellspezifischer Inline-Qualitätsdaten zu jeder Batteriezelle. So wird die Grundlage geschaffen, Maschinen-, Qualitäts- und Prozessdaten auf Zellebene zu verknüpfen und in einem digitalen Zwilling [4] der einzelnen Zelle abzubilden. Im Verbundprojekt „DigiBattPro 4.0 – Digitalisierte Batteriezellenproduktion 4.0“ [5] wurde eine Lösung erarbeitet, welche die Identifikation einzelner Elektrodenbandsegmente allein anhand ihrer Oberflächenmikrostruktur über ein markierungsfreies Verfahren ermöglicht [6]. Das Fraunhofer IPM und Fraunhofer IPA setzen diese Systemlösung ge-

## Marker-free traceability in battery manufacturing – Microstructure instead of markers: full traceability in production

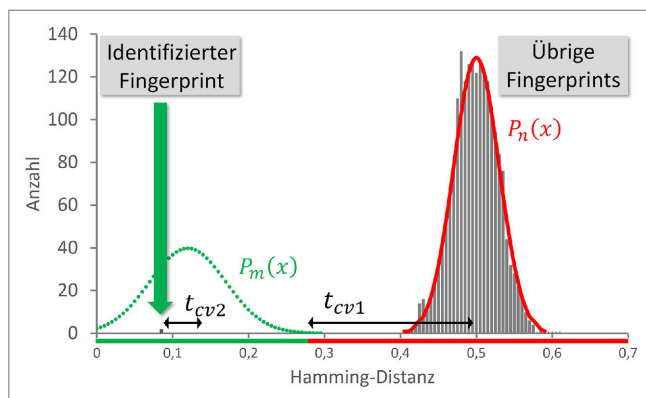
**ABSTRACT** The article presents a marker-free track & trace solution for electrodes and other continuous materials. Identification based on the unique surface microstructure enables cross-process recognition and traceability of individual electrode segments. This is the basis for data-driven process optimization. System integration at ZDB and with an industry partner achieved high recognition rates. The solution is scalable and applicable across industries.

meinsam im Zentrum für Digitalisierte Batteriezellenproduktion (ZDB) am Fraunhofer IPA um, damit eine durchgängige Rückverfolgbarkeit sichergestellt ist. Diese Arbeit stellt die zugrunde liegende Technologie, Versuchsergebnisse und Entwicklungsschritte vor und diskutiert das Potenzial für eine industrielle Skalierung sowie für Anwendungen in anderen kontinuierlichen Fertigungsprozessen.

## 2 Stand der Technik und Herausforderungen

Heute werden Batteriezellen im operativen Produktionsumfeld meist erst nach Abschluss der Elektrodenherstellung während der Zellmontage durch aufgebrachte Marker, etwa mit einem Data-Matrix-Code (DMC) auf der Zellohülle, gekennzeichnet. Eine verlässliche Identifikation und Rückverfolgung einzelner Batteriekomponenten ist daher vor der Zellmontage meist nicht möglich. Für die Rückverfolgung einzelner zellspezifischer Elektrodenbandsegmente fehlen bisher robuste Identifikationsmethoden. In wissenschaftlichen Arbeiten werden verschiedene Rückverfolgungslösungen und Ansätze beschrieben und vergleichend analysiert [2, 7].

Konventionelle Identifizierungsmethoden und markerbasierte Lösungen [8, 9] zur abschnittsgenauen oder zellspezifischen Rückverfolgung scheitern in der Praxis oft an Platzrestriktionen auf dem Elektrodenband sowie an den Informationsbrüchen, die durch das Zuschneiden zu Spulen oder das Vereinzeln beim Übergang von kontinuierlichen (Beschichtung, Trocknung, Kalandrieren) zu diskreten Fertigungsprozessen (Schneiden, Wickeln) entstehen. Zudem können physische Marker wie



**Bild 1** Exemplarisches Histogramm der Hamming-Distanz. Der identifizierte FP (Fingerprint) ist klar von der Normalverteilung der übrigen FPs separiert. Über die Schwellwerte  $t$  werden Fehlidentifizierungen praktisch ausgeschlossen. Grafik: Fraunhofer IPA, Fraunhofer IPM

Aufdrucke entsprechend Fremdmaterial einbringen und damit die Materialreinheit beeinträchtigen oder durch Lasermarkierungen die Leitfähigkeit des Elektrodenbandes beziehungsweise des Ableiters verändern [2].

Mathematische Rückverfolgungsmodelle, die auf der Längenmessung basieren, sind oft ungenau. Mit üblicherweise eingesetzten Drehgebern kann zum Beispiel kein Schlupf erfasst werden, was zu großen Messfehlern führen kann. Laser-Doppler-Velocimeter erfassen die Länge dagegen schlupffrei. Bei präziser und faltenfreier Bandführung erreichen sie dabei eine Genauigkeit im Promillebereich. Für die Bestimmung der absoluten Position auf dem Band anhand der Längenmessung wird jedoch ein Referenz- oder Startpunkt benötigt. In der Praxis ist dieser meist unbekannt, da eine gewisse Bandlänge am Anfang und am Ende eines Rolle-zu-Rolle-Prozesses anlagenbedingt nicht erfasst werden kann. Auch nach prozess- oder qualitätsbedingter Entnahme von Material lässt eine Längenmessung keinen Rückschluss mehr auf die absolute Position zu. Gleiches gilt nach der Vereinzelung von Bändern, bei der jegliche Zuordnung von Länge zur Bandposition verloren geht.

Alternative bildbasierte Trackingansätze besitzen Potenzial, sind jedoch für hohe Bandgeschwindigkeiten bislang nicht hinreichend validiert [10].

### 3 Markierungsfreie Rückverfolgung mit Track-&-Trace-Fingerprint

Angesichts der zuvor beschriebenen Grenzen konventioneller Identifizierungsmethoden in der Zellfertigung, setzt die markierungsfreie Track-&-Trace-Fingerprint-Technologie auf die natürliche Mikrostruktur der Elektrodenoberfläche als einzigartigen Fingerabdruck zur lückenlosen Identifikation und Rückverfolgung. Die ursprünglich für die Stückgutfertigung konzipierte Technologie wurde für die kontinuierliche Rückverfolgung von Endlosmaterial weiterentwickelt. Im Folgenden werden Prinzip und technische Umsetzung dieser Technologie dargestellt.

Ähnlich einem biometrischen Fingerabdruck weisen geeignete Materialien eine einzigartige Oberflächenstruktur auf, bei der sich schon kleinste Oberflächenregionen über Bildverarbeitung und entsprechende Abgleichalgorithmen eindeutig identifizieren lassen. Hochauflösende Kameras erfassen dabei fortlaufend die

Mikrostrukturen der Materialoberfläche eines zuvor definierten Oberflächenbereichs. In einem ersten Schritt generiert ein am Fraunhofer IPM entwickelter und hochoptimierter [11] Algorithmus, wie in [12] beschrieben, pro Bereich ein kompaktes Bitset, das als digitaler Fingerabdruck gemeinsam mit einem eindeutigen Identifikator (ID) in einer Datenbank gespeichert wird [6]. Anschließend lässt sich jeder beliebige Materialabschnitt durch erneute Bildaufnahme und Vergleich mit den gespeicherten Bitsets eindeutig identifizieren.

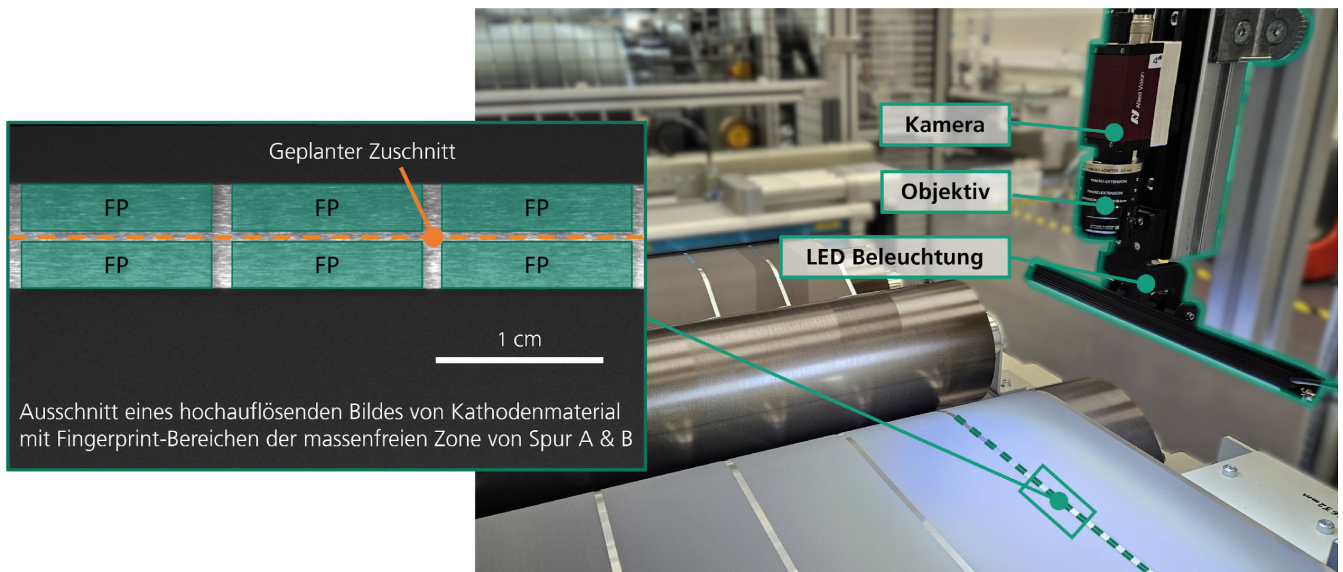
Zu den wesentlichen Vorteilen neben der ausbleibenden Materialbeeinflussung zählen der geringe Platzbedarf (je nach Material genügen bereits 10 mm<sup>2</sup> Oberfläche) und die Robustheit gegenüber lokalen Oberflächenveränderungen wie Kratzern oder prozessbedingten Einflüssen [13].

Im Folgenden bezeichnen wir den digitalen Fingerabdruck als Fingerprint (FP). Die Ähnlichkeit zwischen zwei FPs wird über die Hamming-Distanz  $d_H$  gemessen, die das Verhältnis der Anzahl unterschiedlicher Bits zur Anzahl der Gesamtbits darstellt. Die Verteilung, die beim Vergleich vieler FPs entsteht, folgt einer Normalverteilung um den Wert 0,5, sofern die zugrunde liegende Oberflächenstruktur zufällig ist. Zwei definierte Konfidenzwerte (CV1 und CV2) werden genutzt, um mögliche Übereinstimmungen zu bewerten und Fehlidentifikationen zu verhindern. Letzteres wird über Schwellwerte ( $t_{cv1}$  und  $t_{cv2}$  in **Bild 1**) erreicht, die vorschreiben, wie hoch die statistische Sicherheit sein muss, um eine Identifikation als erfolgreich einzustufen.

CV1 entspricht dem Abstand des besten Treffers, also des Abgleichs mit der kleinsten Hamming-Distanz, zum Mittelwert der Verteilung aller übrigen Nicht-Treffer-Abgleiche. Der Schwellwert wird meist auf  $7\sigma$  festgelegt. In der Realität handelt es sich aufgrund von Prozesseinflüssen und Materialeigenschaften jedoch selten um eine ideale Normalverteilung. Der zweite Konfidenzwert CV2 gibt daher den Abstand zwischen den Treffern mit der kleinsten und zweitkleinsten Hamming-Distanz an. Üblicherweise wird der zugehörige Schwellwert auf 0,05 festgelegt.

Der statistische Ansatz bietet zusätzlich die Möglichkeit, in Machbarkeitsuntersuchungen aus begrenzten Probenmengen auf die spätere Wiedererkennungssicherheit sowie die maximal rückverfolgbare Materialmenge zu extrapolieren. Eine überschaubare Anzahl an Datenpunkten oder Materialabschnitten genügt bereits, um die späteren Verteilungen  $P_m(x)$  der Treffer und  $P_n(x)$  der Nicht-Treffer ausreichend genau abzuschätzen. Je nach Oberfläche genügen zwischen 10 und 100 Proben. Die Track-&-Trace-Fingerprint-Technologie wurde ursprünglich für die Verfolgung einzelner Teile in der Produktion entwickelt, wobei etwa ein Objekt pro Sekunde erfasst wird. Objektspezifische Referenzmerkmale wie Bauteilkanten helfen in der Regel bei der Lokalisierung des FP-Bereichs. Bei kontinuierlichem Material hingegen liegt die Produktionsgeschwindigkeit meist deutlich höher und es fehlen die Referenzmerkmale zur Orientierung. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurden mehrere Anpassungen implementiert. Zum einen verfolgt das FP-System die Materialoberfläche eigenständig, um die referenzmerkmalunabhängige und regelmäßige Generierung von FPs sicherzustellen (**Bild 2**). Zum anderen können durch Batch-Verarbeitung hunderte von FPs pro Sekunde generiert und der Datenbank hinzugefügt werden.

Somit wird eine dichte und gleichmäßige Materialabdeckung gewährleistet, die ganz ohne externe Positionsgeber auskommt. Das System verfolgt dabei die Bandposition und Beschichtungs-



**Bild 2** Aufbau eines Track-&-Trace-Fingerprint-Systems mit FP-Bereichen für zwei Spuren in der massenfremen Zone. Die gleichmäßige FP-Generierung in festen Abständen ermöglicht eine dichte Abdeckung und Identifikation der Bandsegmente. *Grafik/Foto: Fraunhofer IPA, VARTA Microbattery GmbH*

kante, um sicherzustellen, dass das Band in der Länge vollständig erfasst wird, wobei der Abstand zwischen den FPs je nach Kameraeinstellung und Verarbeitungszeit angepasst werden kann.

Im Rahmen einer nachgelagerten Identifizierung können beim Durchlaufen der Prozessschritte die zuvor erfassten Oberflächenareale automatisch wiedererkannt und prozessübergreifend mit den zugehörigen Qualitäts- und Prozessdaten verknüpft werden. Während der Identifikation scannt der Algorithmus schrittweise einen zuvor definierten Bandbereich nach FPs, um deren genaue Position zu bestimmen. Abhängig von den gewählten Einstellungen beeinflusst dies die Anzahl der Vergleiche und somit die Dauer der Identifizierung.

Die Implementierungen und Tests am Fraunhofer IPA im ZDB und bei einem Industriepartner zeigen, dass das System unter realen Produktionsbedingungen arbeitet und Identifikationsraten vergleichbar mit konventionellen Marker-Systemen erzielt, ohne das Elektrodenmaterial zu verändern. Ein Track-&-Trace-Fingerprint-System besteht dabei aus einer oder mehreren hochauflösenden Kameras mit entsprechenden Objektiven, LED-Leisten als Beleuchtung (Bild 2), leistungsfähiger Software zur Erfassung und Verwaltung der FPs sowie Schnittstellen zum Datenaustausch mit beispielsweise einem MES (Manufacturing Execution System).

Mit GPU (Graphics Processing Unit)-gestützten Algorithmen und optimiertem Datenbank-Handling sind bereits Lösungswege identifiziert, welche den Einsatz bei Liniengeschwindigkeiten von >60 m/min ermöglichen werden [14]. Durch die direkte Verknüpfung von Oberflächenabschnitten mit FPs ist eine durchgängige Rückverfolgung auch im Bereich des Übergangs von kontinuierlichen zu diskreten Prozessschritten beziehungsweise bei der Vereinzelung der Bandsegmente erreichbar. Die bandsegmentspezifische Verknüpfung von Prozess- und Qualitätsdaten ermöglicht es zudem, ein datenbasiertes Gesamtqualitätsmodell aufzubauen, das Abweichungen früh erkennt, Handlungsempfehlungen für die Produktionsoptimierung liefert sowie eine robuste, adaptive Prozessführung unterstützt [15].

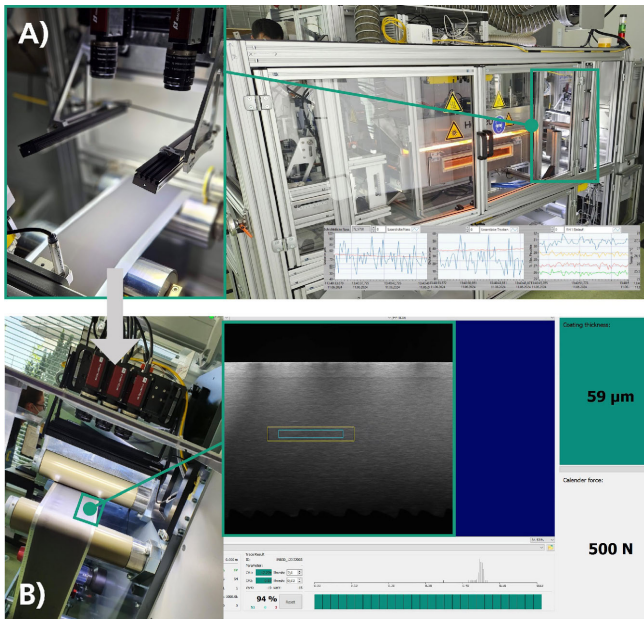
## 4 Systemintegration und Praxistests

Die Systemintegration der FP-Technologie erfolgte in zwei aufeinanderfolgenden Phasen: Zunächst wurden verschiedene Prototypen in der Elektrodenbandfertigung am ZDB aufgebaut und getestet. Anschließend wurde das System unter realen Produktionsbedingungen in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner erprobt. Beide Phasen enthielten umfassende Validierungs- und Optimierungsschritte mit dem Ziel, die Technologie sowohl auf Laborebene als auch im industriellen Maßstab einsetzbar zu machen.

### 4.1 Versuchsdurchführung im ZDB: Anlagen, Materialien und Parameter

Anhand zuvor definierter Spezifikationen und Anforderungen an die Serienfertigung von 21700 Lithium-Ionen-Zellen wurden mehrere FP-Prototypen entwickelt und in Nassbeschichtungs- und Kalandrieranlagen zur Elektrodenbandherstellung am ZDB integriert [6, 16], um die anlagenübergreifende Rückverfolgung sowie eine Inline-Verknüpfung von Prozessdaten zu demonstrieren. Qualitäts- und Prozessdaten wurden dabei während des Nassbeschichtens kontinuierlich erfasst und mit den generierten FPs verknüpft, sodass sämtliche Daten unmittelbar nach Abschluss des Beschichtungsprozesses für weitere Analysen und zur Prozesssteuerung zur Verfügung standen. Auf Basis der bandsegmentspezifischen Beschichtungsinformationen ließen sich im anschließenden Kalandrierprozess gezielte Prozessanpassungen durchführen und fehlerhafte Bandsegmente in Echtzeit identifizieren sowie bei Bedarf entfernen (Bild 3).

Zur Realisierung dieser Funktionalität wurden bidirektionale Schnittstellen zwischen den Anlagen und einer zentralen Datenbank implementiert. Dadurch sind Erfassung, Auswertung und Rückkopplung der Daten in einer einheitlichen Plattform möglich. Diese Lösung verbessert die Transparenz auf Zellebene und gewährleistet eine lückenlose Rückverfolgbarkeit über alle Fertigungsstufen für eine systematische Prozess- und Qualitätsoptimierung.



**Bild 3** Anlagenübergreifende, markierungsfreie Rückverfolgung. A) Elektrodenbeschichtung: Zuordnung von Prozessdaten zu den FPs der Bandsegmente. B) Kalandrieren: FP-Erfassung zur Rückverfolgung und Prozessanpassung. Foto: Fraunhofer IPA

Das FP-System wurde im Zuge der Entwicklungsarbeiten um eine kompakte, mobile Einheit erweitert, die eine flexible, anlagenunabhängige Identifikation und Rückverfolgung von Bandsegmenten sowie deren Prozessparametern und Qualitätsmerkmalen erlaubt. Durch diese Überarbeitung mit leistungsfähigeren Industriekamerasystemen konnte der Arbeitsabstand auf aktuell 120 mm und die Gehäuseabmessungen von Kamera und Objektiv auf 100 mm reduziert werden. Ein größerer Kamerasensor erlaubt die lückenlose Erfassung von Materialbahnen mit einer Breite von über 86 mm, was höhere Toleranzen und erweiterte Analysemöglichkeiten eröffnet. Die Daten- und Bildrate wurde gesteigert, um auch bei erhöhten Vorschubgeschwindigkeiten präzise Messergebnisse zu liefern. Eine optionale Blitzbeleuchtung verbessert zusätzlich die Bildqualität bei hoher Vorschubgeschwindigkeit. Die entwickelte Lösung ermöglicht eine effiziente und präzise Erfassung der Mikrostruktur und verbessert dank kompakter Bauweise die Integrationsmöglichkeiten in Produktionsprozesse bei begrenztem Bauraum.

## 4.2 Skalierung und anlagenübergreifende Umsetzung

In Zusammenarbeit mit dem Industriepartner wurden Track-&-Trace-Fingerprint-Systeme in Beschichtungs-, Kalandrier-, Schneid- und Wickelprozesse integriert und getestet. Das Ziel war es, unter Produktionsbedingungen die Serialisierung und feingranulare Rückverfolgung auf Segment- oder Zellebene anhand der Oberflächenmikrostruktur verschiedener Materialien bei typischer Liniengeschwindigkeit zu evaluieren. Dabei wurden die Trägermaterialien Aluminium und Kupfer sowie die Beschichtungen Graphit, LFP (Lithium-Eisenphosphat) und NMC (Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid) auf ihre Eignung für Track-&-Trace-Fingerprint getestet.

Die FP-Bereiche befanden sich direkt neben der Beschichtungskante des Trägermaterials innerhalb der massenfremen Zone

oder beispielsweise 2 mm davon entfernt auf der Beschichtung. Die Oberflächen der Materialien zeigten, dass Kupfer eine feinere Mikrostruktur als Aluminium aufweist. LFP zeigt eine gröbere Struktur im Vergleich zu Graphit und NMC, was auf unterschiedliche Beschichtungseigenschaften zurückzuführen ist. Es zeigte sich, dass alle getesteten Materialien grundsätzlich für Track-&-Trace-Fingerprint geeignet sind. Die linien-integrierten Systeme erreichten dabei Wiedererkennungsraten von über 98,6% [14].

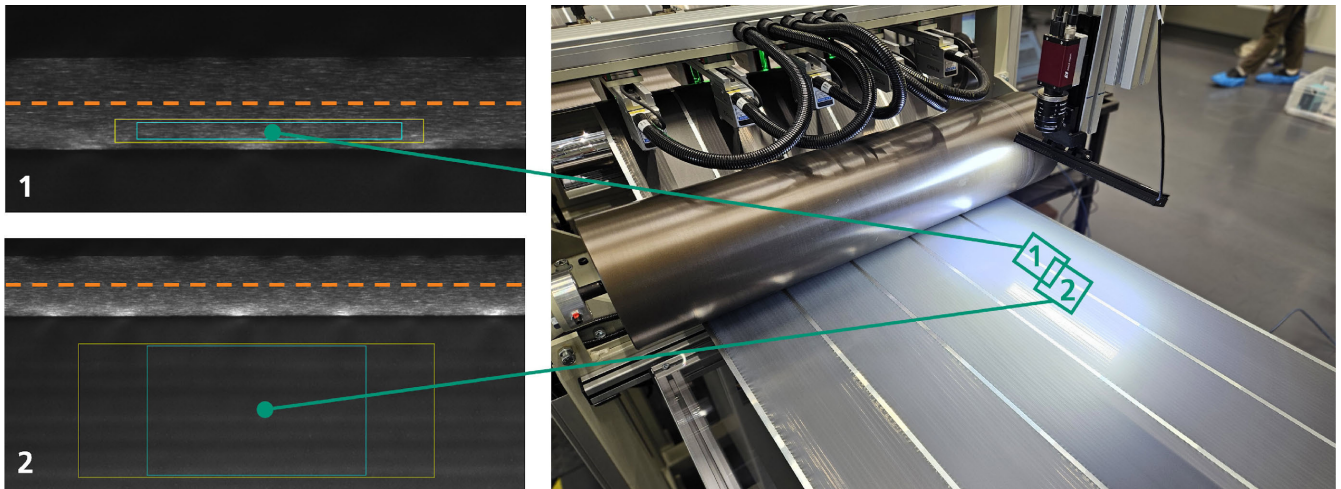
Bei der Systemvalidierung traten periodisch bedingte Unterschiede der Wiedererkennungssicherheit in der massenfremen Zone der Kupferfolie (blankes Substrat) auf. Diese sind höchstwahrscheinlich auf die Überlagerung von Walzenstrukturen aus dem Herstellprozess des Substrats mit seiner stochastischen Oberflächenmikrostruktur zurückzuführen. Die Periodizität betrug dabei etwa 10 m. Zur vertieften Analyse sollten Substrate aus unterschiedlichen Materialien und Herstellverfahren verglichen werden. In der Praxis kann dem Effekt mit einem angepassten optischen Setup begegnet werden, der den Kontrast der periodischen Strukturen verringert und den der stochastischen Oberflächenmikrostruktur anhebt. Alternativ können die Fingerprints auf der Beschichtung erhoben werden, die keine Periodizität aufweist.

Im Folgenden wird exemplarisch die Implementierung der Track-&-Trace-Fingerprint-Systeme im Bereich des Kalandrierens der Kathode näher beschrieben, da dieser Prozess die größten Auswirkungen auf die Oberflächenmikrostruktur hat. Dazu wurde je ein System vor und nach dem Kalandrierprozess installiert, um die Generierung und Wiedererkennung der FPs unter realen Produktionsbedingungen in der massenfremen Zone und im Beschichtungsbereich zu validieren. Außerdem wurden Einflüsse wie Faltenbildung hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Oberflächenmikrostruktur und die Rückverfolgbarkeit analysiert.

Im Bereich der massenfremen Zone wurden einzelne Bandsegmente mittels eines FPs aus einem Bereich von circa 18 x 1 mm<sup>2</sup> feingranular rückverfolgt. Die FP-Erfassung vor dem Kalandrieren und die FP-Wiedererkennung nach dem Kalandrieren über die zwei separaten FP-Systeme konnte erfolgreich validiert werden. Trotz der geringfügigen Faltenbildung wurden in diesem Bereich durch den Kalandrierprozess keine signifikanten Veränderungen der Mikrostruktur der Aluminiumoberfläche festgestellt.

Auf der mit NMC-Material beschichteten Oberfläche kamen dank geringerer Platzrestriktionen größere beziehungsweise variabel dimensionierte FP-Bereiche zum Einsatz. Das Kalandrieren mit einer Walzkraft von über 300 kN veränderte die Mikrostruktur der Beschichtung jedoch so deutlich, dass auf der Beschichtungsfläche bei großen Linienlasten keine direkte Rückverfolgung möglich war. Dennoch ist eine durchgängige Rückverfolgung auf der Beschichtung mit zwei FP-Systemen vor und nach dem Kalandrieren grundsätzlich möglich. Für die Wiedererkennung wird der FP auf der Beschichtungsfläche nach dem Kalandrieren neu erfasst und mit der vor dem Kalandrieren erkannten ID verknüpft. Der alte FP wird dabei ersetzt. Alternativ kann die massenfremere Zone der Aluminiumfolie genutzt werden, um eine direkte Rückverfolgung sicherzustellen, da sich hier – abgesehen von leichter Faltenbildung – keine Oberflächenänderungen durch die Walze gezeigt haben.

Die unter Produktionsbedingungen durchgeführte Systemintegration zeigt, dass Track-&-Trace-Fingerprint sowohl im Bereich



**Bild 4** FP-Bereiche: Massenfreie Zone (1) und Beschichtung (2) mit Track-&-Trace-Fingerprint-System nach dem Kalandrieren. Faltenbildung und Oberflächenveränderungen sind nach dem Kalandrieren sichtbar. Grafik/Foto: Fraunhofer IPA, VARTA Microbattery GmbH

der massenfremen Zone als auch auf der Beschichtung erfolgreich in die Prozesskette integriert werden kann (**Bild 4**).

Die Versuchsergebnisse belegen zudem eine hohe Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Systems im Bereich der massenfremen Zone für Aluminium auch unter Einwirkung einer Walzkraft von mehr als 300 kN. Zur weiteren Systemvalidierung wurde das FP-System beim Industriepartner auch im Bereich Wickeln integriert. Es erfolgte die Implementierung an einer Wickelanlage sowohl für die Anoden als auch für die Kathode. In Testläufen wurden die Oberflächenmikrostrukturen erfolgreich erfasst und wiedererkannt.

Die Grenzen der Robustheit in der markierungsfreien Rückverfolgung zeigen sich bei sehr hohen Bandgeschwindigkeiten und großen Datenmengen. Wenn ein FP bei einer großen Menge erfasster Bandsegmente nicht im Takt der Datenaufnahme abgeglichen werden kann, wird die entsprechende Stelle nicht identifiziert. Die Wiedererkennungssicherheit kann außerdem durch Oberflächenänderungen, zum Beispiel durch Faltenbildung, eine Periodizität der Folienoberfläche oder hohe Walzkraft auf der Elektrode verringert werden. GPU-gestützte Algorithmen und eine Suchstrategie, die den Suchraum auf die Nachbarn eines bereits identifizierten FP beschränkt, bieten großes Potenzial, die Robustheit weiter zu erhöhen.

Wie oben dargestellt, werden die Fingerprints nicht kontinuierlich, sondern in einem gewissen Abstand zueinander erzeugt. Werden in einem nachgelagerten Prozess kleinere Segmente herausgeschnitten als ursprünglich angenommen, liegt auf der Oberfläche unter Umständen kein vollständiger Fingerprint vor, sodass die Erkennung scheitert. Die Konfiguration ist daher an die spätere Weiterverarbeitung anzupassen.

Die gewonnenen Erkenntnisse unterstützen die Erstellung eines Qualitätsmodells der Beschichtung, das Zwischenproduktmerkmale und Prozessparameter über alle Prozessschritte hinweg zuverlässig einzelnen Bandsegmenten zuordnet. Die Datenauswertung bestätigt eine robuste Wiedererkennung für Anode und Kathode, auch bei leichten Oberflächeneinflüssen durch Kalandrieren und Schneiden. Eine über die gesamte Spurbreite implementierte Inline-Fehlerbildkontrolle kann darüber hinaus eine kontinuierliche optische Qualitätsüberwachung der Beschichtung

sowie die direkte Verknüpfung detektierter Abweichungen mit Prozessparametern und Segment-IDs ermöglichen.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die erfolgreiche Integration und Validierung der markierungsfreien Track-&-Trace-Fingerprint-Technologie in der Elektrodenbandfertigung zeigt, dass sich Oberflächenstrukturen unterschiedlicher Endlosmaterialien auch unter hohen Produktionsgeschwindigkeiten erfassen und wiedererkennen lassen.

Anhand dieser Ergebnisse ist die Übertragung der Technologie auf andere Bereiche möglich. Technische Bänder in Coil-Form, wie für Elektrodenfolien aus Kupfer oder Aluminium oder als Ausgangsmaterialien für Karosseriebauteile aus hochfestem Stahl oder Brennstoffzellen, gehören zu den wichtigsten Lieferformen metallischer Halbzeuge. Sie stehen am Anfang zahlreicher industrieller Wertschöpfungsketten. Zu den adressierten Branchen zählen unter anderem die Fahrzeugindustrie, die Elektrotechnik, die Bauwirtschaft sowie die Papier- und Verpackungsindustrie.

Während der Herstellung können durch Material- und Prozessschwankungen Fehler im laufenden Band entstehen. Moderne Anwendungen verlangen daher eine lückenlose In-situ-Qualitätsüberwachung, etwa hinsichtlich Oberfläche, Beschichtung, Beölung, Welligkeit, Rauheit und Sauberkeit. Durch die exakte Zuordnung von Qualitätsdaten zu konkreten Positionen im Coil lassen sich fehlerhafte Bereiche gezielt identifizieren und nachverfolgen. So können Ausschuss und Energieverluste zum Beispiel durch unnötiges Einschmelzen ganzer Coils reduziert, Nachbearbeitungen effizient geplant und Feldausfälle vermieden werden. Gleichzeitig entsteht die Grundlage für einen digitalen Zwilling des Coils, welcher eine lückenlose Dokumentation und Rückverfolgbarkeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette sicherstellt. Dies ermöglicht eine datenbasierte Produktionsoptimierung und erhöht die Transparenz entlang der gesamten Fertigungslinie.

Zu den wichtigsten Aufgaben der Zukunft der markierungsfreien Rückverfolgung von Endlosmaterial gehören die Beschleunigung des Identifikationsprozesses für Bandgeschwindigkeiten von über 100 m/min, die skalierbare Verwaltung der Datenmengen, die bei Hunderten von Coils mit mehreren Kilometern Länge entstehen, sowie die Integration in betriebliche Prozesse.

## DANKSAGUNG


Die Entwicklung und Erprobung der in diesem Beitrag vorgestellten Systeme zur markierungsfreien Rückverfolgung erfolgte im Rahmen des Projekts „DigiBattPro 4.0 – Digitalisierte Batteriezellenproduktion 4.0“. Für die Förderung dieses Projekts (Förderkennzeichen: 03XP0374C) bedanken die Autoren sich herzlich beim Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFT). Unser besonderer Dank gilt der VARTA Microbattery GmbH sowie den Mitarbeitenden der Prozessentwicklung und Produktion für die Unterstützung.

## LITERATUR

- [1] EU: Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries. Internet: [data.europa.eu/eli/reg/2023/1542/2024-07-18](https://data.europa.eu/eli/reg/2023/1542/2024-07-18). Zugriff am 17.02.2026
- [2] Riexinger, G.; Doppler, J. P.; Haar, C. et al.: Integration of Traceability Systems in Battery Production. *Procedia CIRP* 93 (2020), pp. 125–130, [doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.002](https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.002)
- [3] Birke, K. P.; Weeber, M.; Oberle, M.: *Handbook on Smart Battery Cell Manufacturing*. Singapore, Hackensack, London: World Scientific 2022, <https://doi.org/10.1142/12511>
- [4] Singh, S.; Oberle, M.; Schel, D. et al.: Digital Twin in the Battery Industry. In: Grieves, M.; Hua, E. Y. (Edit.): *Digital twins, simulation, and the metaverse. Driving efficiency and effectiveness in the physical world through simulation in the virtual worlds*. Cham: Springer 2024, pp. 363–393
- [5] Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung: DigiBattPro 4.0 – BMBF: Digitalisierungslösungen und Materialentwicklung für die Batterieproduktion. Internet: [www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/DigiBattPro40-BMBF.html](https://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/DigiBattPro40-BMBF.html). Zugriff am 17.02.2026
- [6] Riexinger, G.; Regina, D. J.; Haar, C. et al.: Traceability in Battery Production: Cell-Specific Marker-Free Identification of Electrode Segments. In: Kiefl, N.; Wulle, F.; Ackermann, C. et al. (Hrsg.): *Advances in Automotive Production Technology – Towards Software-Defined Manufacturing and Resilient Supply Chains*. Cham: Springer International Publishing 2023, pp. 344–353, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-27933-1\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-031-27933-1_32)
- [7] Wessel, J.; Schoo, A.; Kwade, A. et al.: Traceability in Battery Cell Production. *Energy Technology* 11 (2023) 5, <https://doi.org/10.1002/ente.202200911>
- [8] Sommer, A.; Bazlen, S.; Tran, H.-Y. et al.: Development and implementation of in-line segmentation for continuous electrode production in lithium-ion battery cell manufacturing for traceability applications. *Procedia CIRP* 120 (2023), pp. 171–176, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.08.031>
- [9] Sommer, A.; Gruhn, H.; Schoo, A. et al.: Enabling Holistic Tracking and Tracing in Battery Cell Production: Marking Technologies and Identification. *Action guideline*, <https://doi.org/10.14459/2024mp1764299>. Zugriff am 17.02.2026
- [10] Lindenblatt, J.; Schneider, J.; Sommer, A. et al.: Image-matching in electrode production of lithium-ion batteries for marker-free tracking and tracing applications. *Future Batteries* 5 (2025), #100049, <https://doi.org/10.1016/j.fub.2025.100049>
- [11] Schmid-Schirling, T.; Förste, A.: Track4Quality – markierungsfreie Einzelteilverfolgung in anspruchsvoller Produktionsumgebung zur Prozessverbesserung und Qualitätssicherung: Schlussbericht zum Vorhaben. Projektlaufzeit: 01.12.2015–31.05.2018. Track4Quality – markierungsfreie Einzelteilverfolgung in anspruchsvoller Produktionsumgebung zur Prozessverbesserung und Qualitätssicherung, <https://doi.org/10.2314/GBV:104651847X>
- [12] Ishiyama, R.; Takahashi, T.; Makino, K. et al.: Fast image matching based on fourier-mellin phase correlation for tag-less identification of mass-produced parts. 2018 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP), Anaheim, CA, USA, 2018, pp. 380–384, <https://doi.org/10.1109/GlobalSIP.2018.8646344>
- [13] Schmid-Schirling, T.; Saum, N.; Eberz, C.: Marker-Free, Single Item Traceability in Gear Wheel Production Based on Inherent Surface Patterns. *International Conference on Gears 2023*. VDI Verlag 2023, pp. 1877–1888, <https://doi.org/10.51202/9783181024225-1877>
- [14] Regina, D. J.; Riexinger, G.; Schmid-Schirling, T. et al.: Marker-free traceability in battery production from continuous electrode foils to cell-specific individual electrode segments. *batteries & supercaps. Chemistry Europe* (2025), <https://doi.org/10.1002/batt.202500148>
- [15] Rödel, L.; Krebs, J.; Müller, G. et al.: Adaptable Control System for Electrode Wet Coating in Lithium-Ion Battery Cell Production: A Systematic Literature Review. *Conference on Production Systems and Logistics: University of San Ignacio de Loyola*, 2025, pp. 35–49, <https://doi.org/10.15488/18853>
- [16] Riexinger, G.; Regina, D. J.; Landwehr, I. et al.: Traceability in Lithium-Ion Battery Production: Cell-Specific and Marker-Free Identification of Electrode Segments. [Poster]. Braunschweig 23.-25. November 2022


Dipl.-Ing. Günther Riexinger   
[guenther.riexinger@ipa.fraunhofer.de](mailto:guenther.riexinger@ipa.fraunhofer.de)

Lars Semrok, M.Sc. 

Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer 

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik  
und Automatisierung IPA  
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart  
[www.ipa.fraunhofer.de](http://www.ipa.fraunhofer.de)

Universität Stuttgart  
Institut für Energieeffizienz in der Produktion EEP  
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart

David J. Regina, M.Sc. 

Dr. Tobias Schmid-Schirling   
[tobias.schmid-schirling@ipm.fraunhofer.de](mailto:tobias.schmid-schirling@ipm.fraunhofer.de)

Prof. Dr. Daniel Carl 

Fraunhofer Institut für Physikalische  
Messtechnik IPM  
Georges-Köhler-Allee 301, 79110 Freiburg  
[www.ipm.fraunhofer.de](http://www.ipm.fraunhofer.de)

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Professur Produktionskontrolle  
Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH)  
Emmy-Noether-Str. 2, 79110 Freiburg

## LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons  
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)