Abschlussbericht zum Förderprojekt im BMBF-Rahmenprogramm „Vom Material zur Innovation“ und im BMBF-Dachkonzept Batterieforschung
Teil 1 – Kurzbericht

Vorhabenbezeichnung:
InteKal – Intelligente Kalandrierung

Zuwendungsempfänger:	**Förderkennzeichen**
Technische Universität München (TUM) Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)	03XP0348B
Projektleiter & -mitarbeiter	**Berichtszeitraum**
Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub (Projektleiter)	01.03.2021–31.08.2024

Kurzzusammenfassung

Die Verdichtung von Elektroden für Lithium-Ionen-Batterien ist ein entscheidender Prozessschritt zur Erhöhung der volumetrischen Energiedichte und zur Verbesserung der elektrischen und mechanischen Qualitätseigenschaften der Elektroden. Nach aktuellem Stand der Technik ist die Qualitätssicherung und Parametereinstellung für den Prozessschritt des Kalandrierens jedoch unzureichend implementiert und basiert in hohem Maße auf Empirik. Eine kontinuierliche Prozessüberwachung sowie die schnelle Ermittlung der erforderlichen Prozessparameter bieten das Potenzial, Produktionsausschuss und Anlagenstillstände zu reduzieren.

Mit Hilfe innovativer Inline-Messmethoden und Anlagentechnik wurde im Rahmen des Projektes *InteKal* ein Gesamtkonzept zur Qualitätssteigerung und Vertiefung des Verständnisses des Prozessschritts des Kalandrierens und qualitätsrelevanter Wechselwirkungen erarbeitet. In der initialen Projektphase wurde am *iwb* die Konzeption und Auslegung einer neuartigen Kalandrieranlage entwickelt und die flexible Integration von Mess- und Inspektionssystemen als Innovationsmodule berücksichtigt. Im Anschluss an die Sensorintegration wurde eine kontinuierliche Datenanalyse und -aufbereitung implementiert, um die Elektrodenqualität zu bestimmen. In der darauffolgenden Phase erfolgte die Visualisierung der aufbereiteten Messdaten in einem Dashboard, welches als Unterstützung für eine effiziente Prozesssteuerung diente. Die Realisierung dieser Vorgehensweise wurde während der gesamten Projektlaufzeit durch den zielgerichteten Einsatz experimenteller Verdichtungsversuche unterstützt.

Im Hinblick auf die Inline-Datenakquise wurden in Arbeitspaket 1 verschiedene Ansätze evaluiert, wobei insgesamt drei Lasertriangulationssensoren und ein chromatisch-konfokales Sensorpaar als vielversprechendste Sensoren identifiziert und in die im Rahmen des Projekts

neu beschaffte Kalandrieranlage am *iwb* sowie in die Bestandsanlagen der Projektpartner integriert wurden. Die detektierten Signale der Lasertriangulationssensoren sowie die mittels chromatisch-konfokaler Messtechnik erfasste Schichtdicke lieferten Informationen bezüglich der Qualität der Elektrode nach dem Kalandrieren. Als Qualitätskennzahl im Kalandrierprozess wurde neben der Schichtdicke in Arbeitspaket 2 eine Fehlerkennzahl (engl.: *Defect Evaluation Index; DEI*) definiert, durch deren Anwendung das Maß der Elektrodenwellung quantifiziert werden kann. Die Fehlerkennzahl der Elektrodenwellung wird durch die Differenz des höchsten Wellenberges und niedrigsten Wellentals spezifiziert. Zusätzlich wurde die Elektrodenlängung in Prozent als quantitative Bewertungsgrößen definiert. Die Qualitätseinstufung wurde unter Verwendung eines Tracking-und-Tracing-Systems mit den eingestellten Prozessparametern korreliert. Die Sensor- und Prozessdaten wurden zudem im Rahmen von Arbeitspaket 3 in einen entwickelten Maschinenzwilling integriert und als Unterstützung für das Anlagenpersonal in einem echtzeit-nahen Dashboard visualisiert. Der entwickelte Maschinenzwilling ermöglichte die Synchronisation mit einer zentralen Datenbank und die Einbindung der gesammelten Prozessdaten in das entwickelte Tracking-und-Tracing-System. In Arbeitspaket 4 wurde eine Closed-Loop-Regelung basierend auf der Inline-Schichtdickenmessung konzeptioniert und implementiert. Der für eine vorgegebene Soll-Elektrodendicke notwendige Walzspalt wird im Rahmen der Closed-Loop-Regelung basierend auf der gemessenen Ist-Elektrodendicke bestimmt und adaptiv angepasst. Dies ermöglichte eine effiziente Parametrisierung des Kalandrierprozesses und Reduzierung des Einstellungsaufwands. Im Rahmen der begleitenden Verdichtungsversuche mit variierenden Elektrodenmaterialien konnte in Arbeitspaket 6 das Prozessverständnis erweitert werden. Insbesondere durch die strukturmechanische Evaluierung der Schnittstelle zwischen der Beschichtung der Elektrode und der Substratfolie konnten wichtige Erkenntnisse zur Wechselwirkung zwischen den Verdichtungsparametern und den mikrostrukturellen Deformationen gewonnen werden. Die Implementierung einer automatisierten Auswertung der Partikeleindrücke in der metallischen Substratfolie ermöglichte erstmals die Quantifizierung der Zunahme der Partikeleindrücke mit steigender Verdichtung.

Die erarbeiteten Methoden und Erkenntnisse leisten einen Beitrag zur Effizienz- und Qualitätssteigerung des Kalandrierprozesses von Elektroden. Die Ergebnisse zielen darauf ab, die hohen Ausschussraten sowie den Aufwand für die Prozessparameterfindung zu reduzieren. Damit soll die Industrie dabei unterstützt werden, die Kosten und den Energiebedarf bei der Produktion von Lithium-Ionen-Batteriezellen zu senken, um auf dem Weltmarkt wettbewerbsfähig zu bleiben.

Abschlussbericht zum Förderprojekt im BMBF-Rahmenprogramm „Vom Material zur Innovation“ und im BMBF-Dachkonzept Batterieforschung Teil 2 – Eingehende Darstellung der wesentlichen Inhalte

Vorhabenbezeichnung:
InteKal – Intelligente Kalandrierung

Zuwendungsempfänger: Technische Universität München (TUM) Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)	**Förderkennzeichen** 03XP0348B
Projektleiter & -mitarbeiter Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub (Projektleiter)	**Berichtszeitraum** 01.03.2021–31.08.2024

Eingehende Darstellung der wesentlichen Inhalte

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete (APs) bzw. Unterarbeitspakete (UAPs) vorgestellt. APs und UAPs, an welchen das *iwb* nicht beteiligt ist, werden nicht explizit genannt.

AP 1: Erweiterung und Integration der kontinuierlichen Inline-Datenerfassung von Maschinen- und Produkteigenschaften

Im Rahmen von AP 1 wurde am *iwb* eine neue Kalandrieranlage konzeptioniert und beschafft. Zudem erfolgte die Erprobung und Integration der Sensorik zur Fehlererkennung und Schichtdickenmessung.

UAP 1.1: Entwicklung und Integration einer innovativen Kalandrieranlage

In UAP 1.1 wurde eine Kalandrieranlage im Rahmen des Forschungsprojekts ausgelegt und die erforderlichen Maßnahmen zur Befähigung einer intelligenten Kalandrierung, z. B. mithilfe einer Closed-Loop-Regelung (d. h. die Walzspaltregelung in einem geschlossenen Regelkreis) bzw. im Kontext von Digitalisierungsmaßnahmen, vorgesehen. Endergebnis dieses Arbeitspakets war die initiale Dokumentation der Anforderungen an die Kalandrieranlage in Form eines Leistungsverzeichnisses. Dieses war zentraler Bestandteil im Beschaffungsprozess der neuen Kalandrieranlage in einem europaweiten Ausschreibungsverfahren. Nach Ablauf der Angebotsfrist sowie Sichtung und Bewertung der eingegangenen Angebote erhielt die Firma Matthews International GmbH (Department Saueressig Engineering) als Lieferant den Zuschlag.

Die Kalandrieranlage vom Typ GKL 600 MS bildet die Grundlage für die Umsetzung einer automatisierten Kalandrierung und Digitalisierung über eine flexibel adaptierbare OPC-UA-Schnittstelle. Über Zugentkopplungen vor und nach dem Walzspalt kann die Bahnspannung spezifisch eingestellt werden und ermöglicht eine ruhige Bahnführung für robuste Inline-Messergebnisse. Ein Splice-Tisch gewährleistet ein ergonomisches Handling des Folienwechsels beim Tausch des

Elektrodenmaterials. Auf der Kalandrieranlage können sowohl Rollenmaterialien mit durchgehender bzw. intermittierender Beschichtung als auch Einzelelektrodenblätter verarbeitet werden. Die Messung des Real-Walzspalts wird durch kapazitive Sensoren zwischen den Walzen ermöglicht. Während der Konstruktion bestand ein enger Austausch zwischen dem *iwb* und Saueressig. Die Anlage stellt einen industrienahen Kalander dar und erlaubt es dem *iwb*, die Schnittstelle zwischen Forschung und Industrie abzubilden. So können auch in zukünftigen Forschungsprojekten industrierelevante Themen von der Forschung direkt in die Industrie bzw. in die FFB als Bindeglied transferiert werden. Tabelle 1 stellt einen Auszug der wichtigsten Anlagenparameter dar.

Tabelle 1: Auszug der wichtigsten Spezifikation der Kalandrieranlage GKL 600 MS.

Parameter	Wert
Linienlast	2000 $N \cdot mm^{-1}$ (bei 400 mm Beschichtungsbreite)
Bahngeschwindigkeit	0,3–30 $m \cdot min^{-1}$
Walzendurchmesser	550 mm
Walzenbreite	600 mm
Folienbreite	bis 500 mm
Bahnspannung	20–500 N
Beschichtungsbreite	100–400 mm
Walzentemperatur	bis 120 °C
Anstellkraft	80 t

Im Rahmen der Abnahme-Tests wurde mit dem im Projekt beschafften Elektrodenmaterial die Funktionalität der Kalandrieranlage ganzheitlich getestet und erfolgreich abgenommen. In Abbildung *1* ist die Anlage nach dem Aufbau in der Versuchshalle der TUM dargestellt.

Abbildung 1: Überblick über die Kalandrieranlage nach Aufbau an der TUM.

UAP 1.2: Implementierung und Integrationstest der Anlagenkomponenten

Um die kontinuierliche Datenaufnahme und -verarbeitung zu ermöglichen, wurde der Kalander um eine umfangreiche Sensorik ergänzt. Diese wurde nach dem Kalandriervorgang an den frei adaptierbaren Schnittstellen des Kalanders integriert und deckt die Aspekte Profil-, Schichtdicken- und Produktfehlererkennung ab. Zur Inline-Messung der Schichtdicke an der Neuanlage des *iwb* wurden die chromatisch-konfokalen Sensoren CL-S015 der Firma Keyence verwendet. Diese besitzen eine Auflösung von 0,25 µm sowie eine Linearität von ± 0,35 µm. Der Lichtpunktdurchmesser der Sensorköpfe beträgt 10 µm. Insbesondere die Schichtdickenmessung erwies sich in den Integrations- und Funktionstests als anfällig gegenüber Schwingungen des Glättwerks und einer unruhigen Bahnführung. Die Minimierung der Auswirkungen der genannten Störeinflüsse wurde durch die Integration der konfokalen Messköpfe in einem C-Bügel in der Zugentkopplung nach dem Walzspalt adressiert. Die Integration der Schichtdickenmessung ist in Abbildung 2 dargestellt.

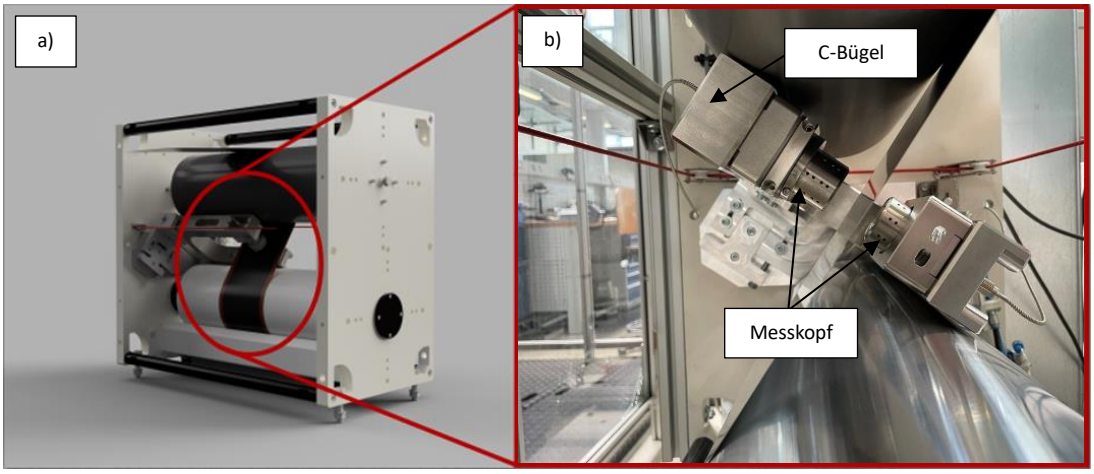

Abbildung 2: a) Schematische Darstellung der Integration der Schichtdickenmessung in der CAD-Konstruktion, b) Integration des C-Bügels innerhalb der Zugentkopplung nach dem Walzspalt.

Der am *iwb* integrierte C-Bügel wurde aus austenitischem Edelstahl gefertigt und berücksichtigt durch diese Konstruktion mögliche Wärmeausdehnungen des Bügels. Durch die Integration des Sensorpaares in der Zugentkopplung nach dem Walzspalt ist die Dickenmessung vom Walzwerk schwingungsentkoppelt. Gleichzeitig ermöglicht die Zugentkopplung die Einstellung einer höheren Bahnspannung, um eine ruhige Bahnführung der Elektrode zu erreichen. Dadurch wird ein Einfluss von Elektrodendefekten sowie einer unruhigen Bahnführung auf das Messergebnis reduziert.

Für die Inline-Überwachung von kalandrier-induzierten Fehlerbildern, wie z. B. Elektrodenwellungen oder Wrinkles, wurden insgesamt drei Lasertriangulationssensoren in die Kalandrieranlage integriert. Hierfür kommen unterschiedliche Sensortypen zum Einsatz, um die jeweiligen Anforderungen hinsichtlich der Auflösung und des Messbereichs der Fehlerbilder abdecken zu können. Zur Detektion der typischerweise wenige Millimeter großen Wrinkles im Randbereich am Übergang zwischen beschichteter und unbeschichteter Substratfolie wurden zwei Lasertriangulationssensoren vom Typ LJ-X-8060 der Fa. Keyence eingesetzt. Die allgemeine Elektrodenwellung – mit einer Höhenausdehnung im Bereich von Millimetern bzw. Zentimetern – wurde mit dem Lasertriangulationssensor vom Typ LJ-X-8400 inline gemessen. Die Anpassung der Messtechnik an variierende Elektrodenbreiten wurde an

der Neuanlage am *iwb* durch präzise justierbare Linearachsen berücksichtigt. Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau der Sensorintegration am *iwb* als CAD-Konstruktion.

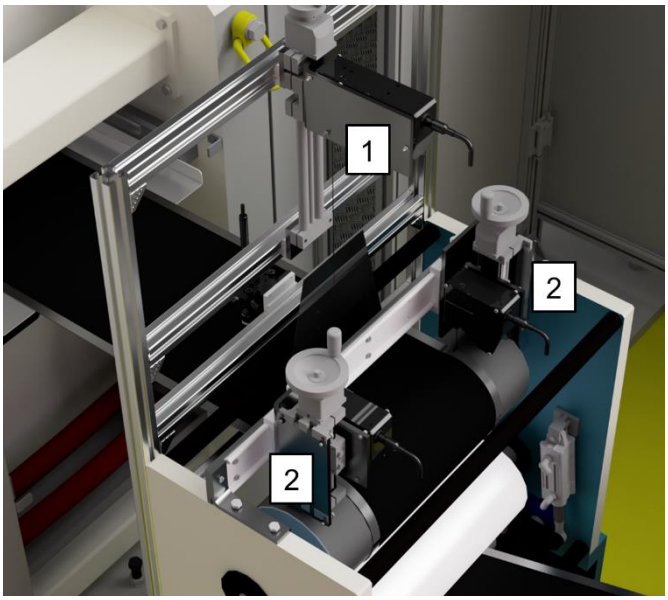

Abbildung 3: Schematische Darstellung der Integration der Inline-Messtechnik zur Fehlerbild-Überwachung an der Kalandrieranlage vom Typ GKL600 der Fa. Saueressig am iwb: Messposition 1 stellt die Messung der Elektrodenwellung mittels Sensortyp LJ-X-8400 dar, Messposition 2 hingegen die Wrinkle-Überwachung durch zwei Sensoren vom Typ LJ-X-8060.

Die integrierte Messtechnik ermöglicht die geometrischen Deformationen der Elektrodenoberfläche inline zu überwachen. Der Fokus lag auf der Analyse der Fehlerbilder der Elektrodenwellung, Falten am Beschichtungsrand und des Fehlerbilds der Wrinkles in Form von Höhenbildern.

AP 2: Entwicklung kontinuierliche Datenanalyse/-aufbereitung zur Datenaggregierung und Aussagemaximierung

UAP 2.2: Inline Qualitätserfassung und Datenaufbereitung

Die integrierte Messtechnik ermöglichte es u. a., inline die geometrischen Deformationen der Elektrodenoberfläche zu überwachen. Hier ist insbesondere die Fehlerbild-Analyse via Lasertriangulationssensoren hervorzuheben. Der Fokus liegt hierbei auf der Analyse der Fehlerbilder der *Elektrodenwellung*, *Falten am Beschichtungsrand* und das Fehlerbild der *Wrinkles*. Hierfür wurden verschiedene Kennzahlen identifiziert, mithilfe derer die Überwachung des Kalandrierprozesses ermöglicht wird. Hierzu wurde am *iwb* eine Methodik zur Datenaufbereitung entwickelt und ein *Defect Evaluation Index* (DEI) für verschiedene Fehlerbilder definiert sowie veröffentlicht (vgl. Publikationsliste). Diese quantitative Bewertungsgröße der Elektrodenwelligkeit wurde als die Differenz zwischen dem höchsten Wellenberg und dem tiefsten Wellental für einen Referenzabstand (i. d. R. ca. 750 mm) definiert. Zudem ermöglichen die Höhendaten der Lasertriangulationssensoren (Ausgabe als Monochrombild und RGB-Bild) eine Charakterisierung der Fehlerbilder anhand der Wellenlänge und Amplitude. Zur Visualisierung der Elektrodentopografie werden 3D-Plots mittels eines Python-Programms erzeugt, wie exemplarisch in Abbildung 4 dargestellt ist.

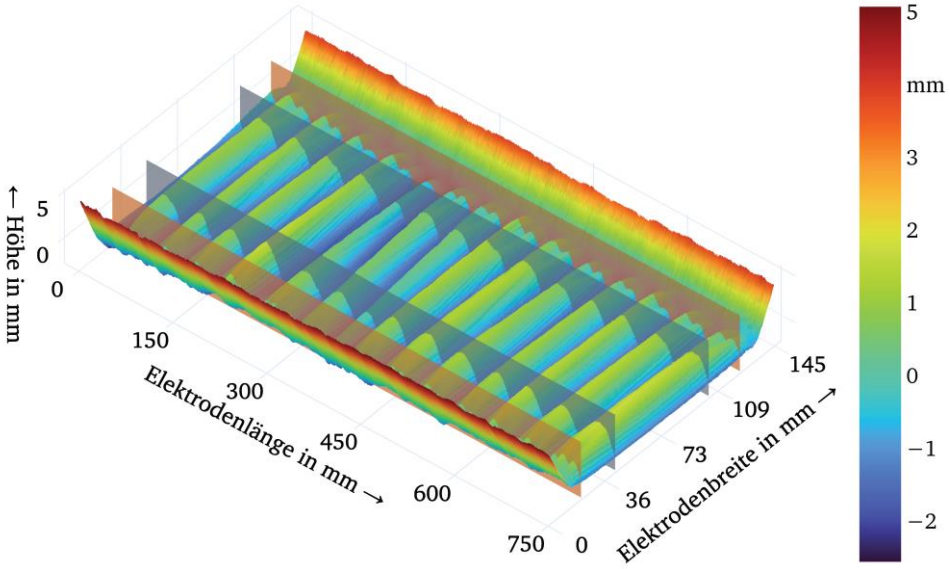

Abbildung 4: Höhenbild einer NMC622-Kathode kalandriert bei 120 °C Walzentemperatur und 35 % Porosität. Die grau eingezeichneten Ebenen stellen die Randbereiche der Auswertung in der Elektrodenmitte dar. Die orange eingezeichneten Ebenen befinden sich bei 22 mm und 124 mm und geben die Position der Falten am Beschichtungsrand an.

Zur Steigerung der Übersichtlichkeit und Hervorhebung der Fehlerbilder wurde die Elektrodenlänge rechnerisch um 1/3 gestaucht sowie die Höhe um den Faktor 5 gestreckt. Diese Werte wurden zur verbesserten Visualisierung der detektierten Fehlerbilder gewählt. Die Längsachse mit einer Dimension von 750 mm, entstehend aus 10.000 Messungen mit jeweils 75 µm Pixelgröße, entspricht der Kalandrierrichtung. Die Quantifizierung der separaten Fehlerbilder wird durch einen Schnitt entlang der Elektrodenlänge ermöglicht und ist beispielhaft in Abbildung 5 dargestellt.

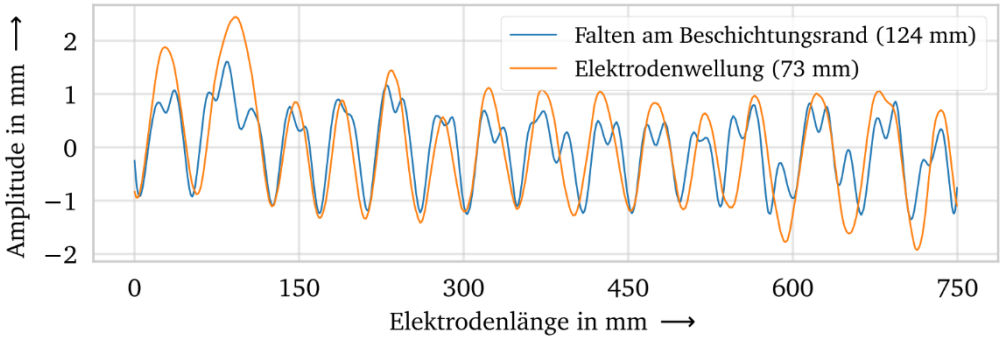

Abbildung 5: Elektrodengeometrie entlang der Elektrodenlänge einer NMC622-Kathode kalandriert bei 120 °C Walzentemperatur und 35 % Porosität. Die Legende zeigt die Position der Profile auf der Elektrodenquerachse an.

Die Profillinien sind für eine bessere Beurteilung der Amplitude um den Mittelwert in Amplitudenrichtung verschoben, um die Messdaten entlang der Nullachse auszurichten. Zusätzlich wurde ein Savitzky-Golay-Filter vierter Ordnung mit einer Fensterbreite von 299 Werten gewählt. Hierdurch wird das Signal geglättet, während Details der Elektrodengeometrie, wie die Falten am Beschichtungsrand, erhalten bleiben. Die Fehlerbilder der *Elektrodenwellung* und *Falten am Beschichtungsrand* werden u. a. anhand der Wellenlänge und Amplitude quantifiziert. Für die Auswertung der Wellenlänge und Amplitude der Beschichtung in der Mitte der Elektrodenbreite

werden die Minima und Maxima separat nach Filterung einer Profillinie entlang der Elektrodenlänge berechnet. Eine beispielhafte Ausgabe ist in Abbildung 6 gezeigt.

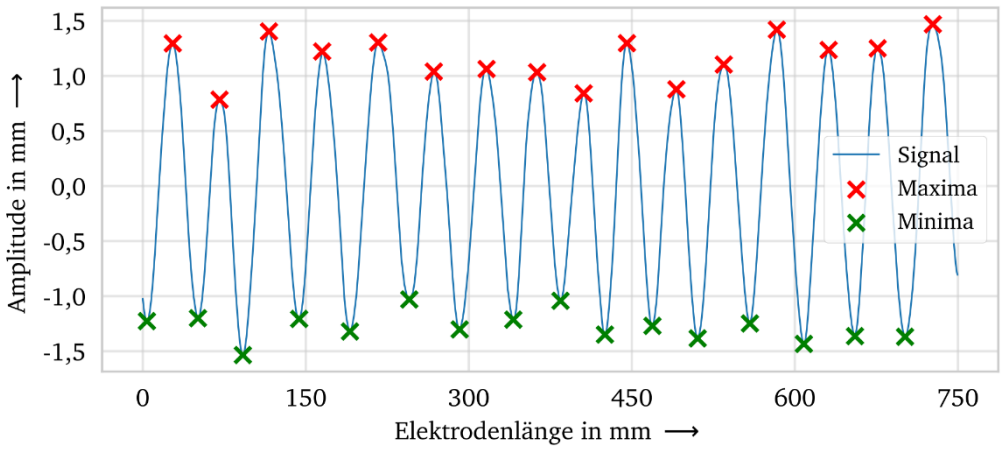

Abbildung 6: Berechnung der lokalen Extrema einer NMC622-Kathode kalandriert bei 120 °C Walzentemperatur und 30 % Porosität entlang der Elektrodenlänge. Die Profillinie befindet sich bei 73 mm entlang der Elektrodenbreite.

Die Kooperation mit dem InZePro-Projekt *TrackBatt* erlaubte die effiziente Verknüpfung von Kennzeichnungen mit Produkt- und Prozessparametern, wobei die Synchronisation mit einer zentralen Datenbank die Einbindung der während des Kalandrierens gesammelten Prozessdaten in das entwickelte Tracking-und-Tracing-System ermöglichte. Die DataMatrix-Codes (DMCs) werden, wie in Abbildung 7 dargestellt, in regelmäßigem Abstand bereits im Beschichtungsprozess auf die Substratfolie gelasert und dabei die dazugehörige Datenzeile erstellt.

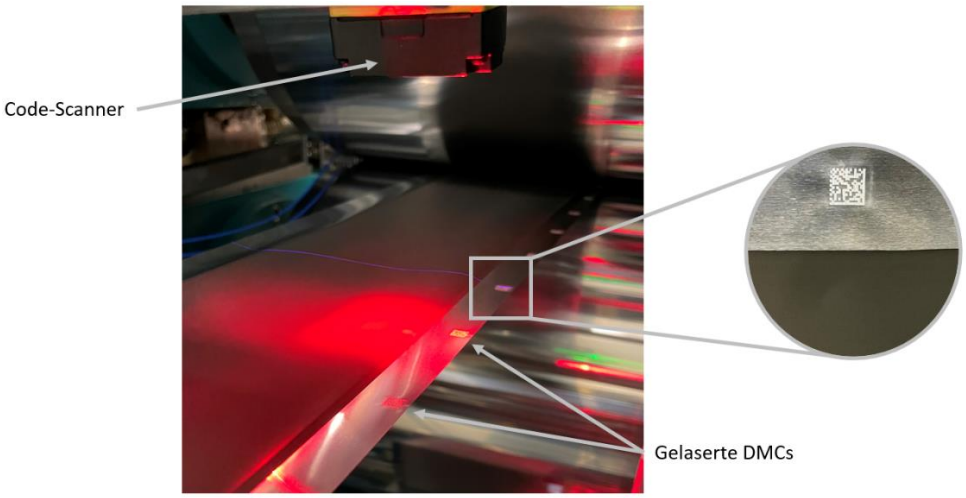

Abbildung 7: Verfolgung der Prozessdaten nach dem Kalandrierprozess je Elektrodenbandabschnitt über einen auf der Substratfolie gelaserten DMC.

Die Erfassung des DMC während des Kalandrierprozesses mit dem Zeitstempel ermöglicht im anschließenden Tracing die Zuordnung der jeweiligen Prozessdaten zu einem Elektrodenabschnitt. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die verschiedenen Abstände der Inline-Sensorik innerhalb der Kalandrieranlage beim Tracing berücksichtigt werden müssen.

AP 3: Identifizierung optimaler Regelparameter und Definition Produkt-/Maschinenzwilling

UAP 3.1: Anwendung Inline-Messsystem und Abgleich der Anlagensteuerung

Die kontinuierliche Analyse der durch Inline-Messsysteme aufgenommenen Prozessdaten bildete die Grundlage für die Auswertung der Produktqualität. Auf dieser Basis konnten Rückschlüsse auf qualitätsrelevante Wechselwirkungen gezogen sowie die Steuerung des Kalanders gewährleistet werden. Das Tracking-und-Tracing-System diente der Sicherstellung der zeitlichen und lokalen Überlagerung von Produkteigenschaften und wurde mit dem Anlagenverhalten abgeglichen. Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurde die Datensammlung anhand verschiedener Offline- und Inline-Messungen zur Charakterisierung der Elektrodenqualität definiert. Der Fokus lag auf der Bestimmung der Elektrodendicke, der Porosität, der Adhäsionskraft, des elektrischen Übergangswiderstands, der Elektrodenwellung mittels DEI und der Partikeleindrücke in der Substratfolie. Die erfassten Prozessdaten wurden entsprechend ausgewertet. Die Zusammenführung der Inline- und Offline-Daten mittels eines DMCs ist in Abbildung 8 dargestellt.

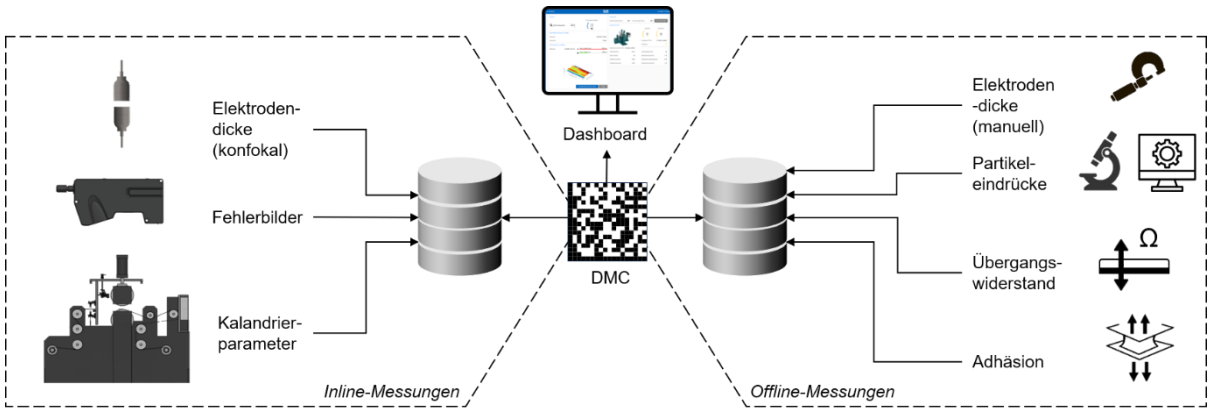

Abbildung 8: Definition der Datensammlung anhand verschiedener Offline- und Inline-Messungen zur Charakterisierung der Elektrodenqualität und Verknüpfung der Daten mittels Tracking-und-Tracing.

Durch die Kombination von Daten aus der Offline-Analyse mit Inline-Messungen können die komplexen Zusammenhänge zwischen Anlage, Prozess und Produkt während des Kalandrierens untersucht und Optimierungspotenziale für den Kalandrierprozess identifiziert werden.

Die Lasertriangulationssensoren als Inline-Messsystem ermöglichen die Analyse der Korrelationen zwischen Prozessparametern und Fehlerbildausprägung durch gezielte Parametervariation. Zur quantitativen Bewertung der Fehlerbilder wurde der bereits genannte DEI sowie die Charakterisierung mittels Amplitude und Wellenlänge eingeführt. Die DEI beschreibt den Spitze-Tal-Wert des Messsignals, d. h. der DEI-Wert spiegelt den Abstand zwischen der höchsten positiven Spitze und dem tiefsten negativen Tal wider. Letzterer wurde bereits in einer Veröffentlichung publiziert und auch in weiteren wissenschaftlichen Arbeiten als Kennzahl zur Bewertung der Elektrodengeometrie herangezogen.

Die Ergebnisse der Berechnung der Amplitude und Wellenlänge für die Elektrodenwellung bei variierenden Porositätsstufen und Prozessparametern sind nachfolgend anhand von Box-Plots dargestellt und sollen als Auszug der validierten Anwendung der Inline-Messsysteme dienen. Die Auswertung ist in vier Abschnitte unterteilt und in Abbildung 9 dargestellt. Hierbei wurden NMC622-Kathoden bei Raumtemperatur (RT) und 120 °C Walzentemperatur analysiert. Die NMC622-Kathode

setzt sich aus Gewichtsanteilen von 95,5 % Aktivmaterial, 1,50 % Leitruß, 2,25 % PVDF und 0,75 % Grafit (SFG6L) zusammen.

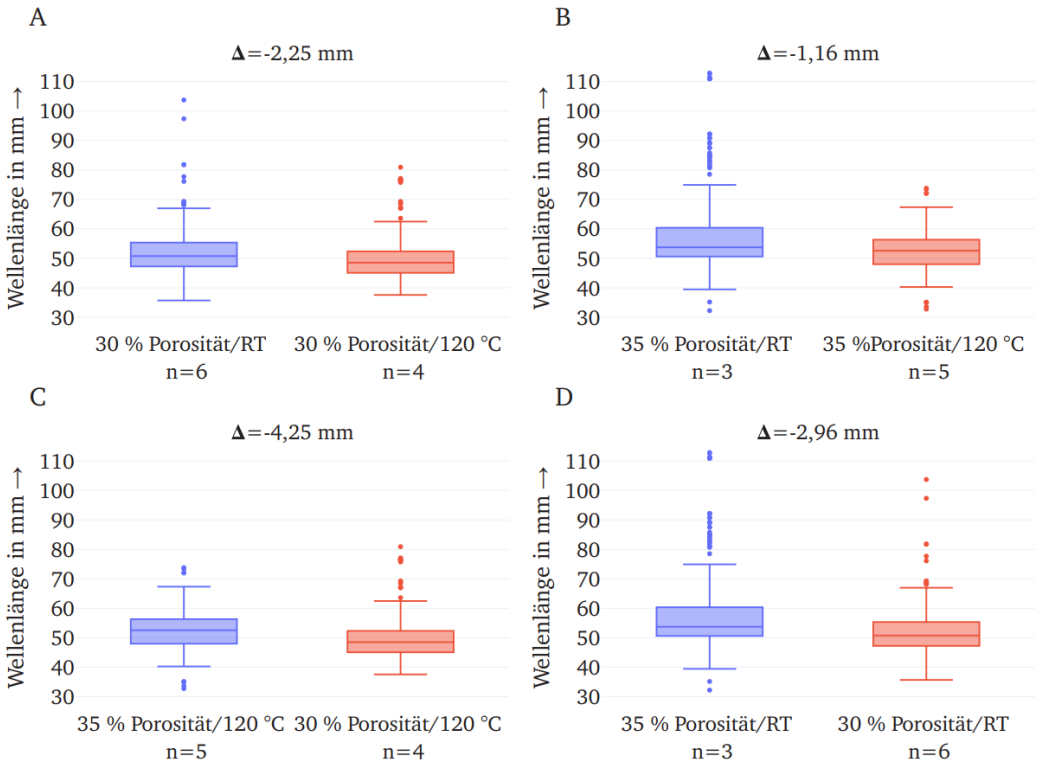

Abbildung 9: Wellenlängenverteilung einer NMC622-Kathode bei variierenden Porositätsstufen und Temperaturen. Δ gibt die Differenz der Medianwerte an. ***A****: Wellenlängenverteilung für 30 % Porosität bei RT und 120°C,* ***B****: Wellenlängenverteilung für 35 % Porosität bei RT und 120°C,* ***C****: Wellenlängenverteilung für 30 % und 35 % Porosität bei 120°C,* ***D****: Wellenlängenverteilung für 30 % und 35 % Porosität bei RT. n gibt jeweils die Anzahl an Höhenbildern an.*

In Abbildung 9A und B ist die Änderung der Wellenlänge mit der Walzentemperatur zu erkennen. Bei der Betrachtung der Quartils und der Differenz der Medianwerte ist bei 30 % und 35 % Porosität eine Verkürzung der Wellenlänge festzustellen. Dabei beträgt die Änderung in Abbildung 9A ca. 4 % und in Abbildung 9B ca. 2 %. Mit der Abnahme der Porosität ist demnach ein verstärkter Temperatureffekt zu beobachten. Dies ist lässt sich auf den eingesetzten PVDF-Binder zurückführen, welcher mit steigender Temperatur fließfähiger wird. Dadurch lässt sich die Elektrode leichter verformen, wodurch kürzere Wellenlängen hervorgerufen werden. Die Wellenlängenänderung mit dem Porositätseffekt ist in Abbildung 9C und Abbildung 9D bei 120°C respektive RT zu erkennen. Bei beiden Temperaturstufen ist ein Abfallen der Wellenlänge mit sinkender Porosität festzustellen. Bei 120°C Walzentemperatur ist eine Abnahme um 4,25 mm von ca. 53 mm auf ca. 49 mm zu beobachten (entspricht ca. 8 %), während die Differenz bei RT nur 2,96 mm beträgt. Letzteres entspricht einer Abnahme von 54 mm auf 51 mm bzw. ca. 5,5 %. Darüber hinaus ist festzustellen, dass mit zunehmender Wellenlänge auch die Intensität des DEI zunimmt und umgekehrt.

Mithilfe der in diesem Projekt entwickelten Datenanalyse wurden zudem unterschiedliche Materialkombinationen hinsichtlich ihrer Wrinkle-Bildung analysiert. Die untersuchten Materialkombinationen umfassten dabei NMC622- und Lithium-Eisen-Phosphat (LFP)-

Aktivmaterialien. Die Untersuchungen zeigten, dass LFP-Elektroden bei konstanter Verdichtungskraft tendenziell eine geringere Anzahl an Wrinkles ausbilden.

Ein wesentlicher Fokus war zudem die Korrelation(en) zwischen Anlagenparametern und Qualitätsaspekten zu ermitteln. Abbildung 10 stellt die Abhängigkeit der erzielten DEI-Werte und der Elektrodendicke nach dem Kalandrieren bei Raumtemperatur dar.

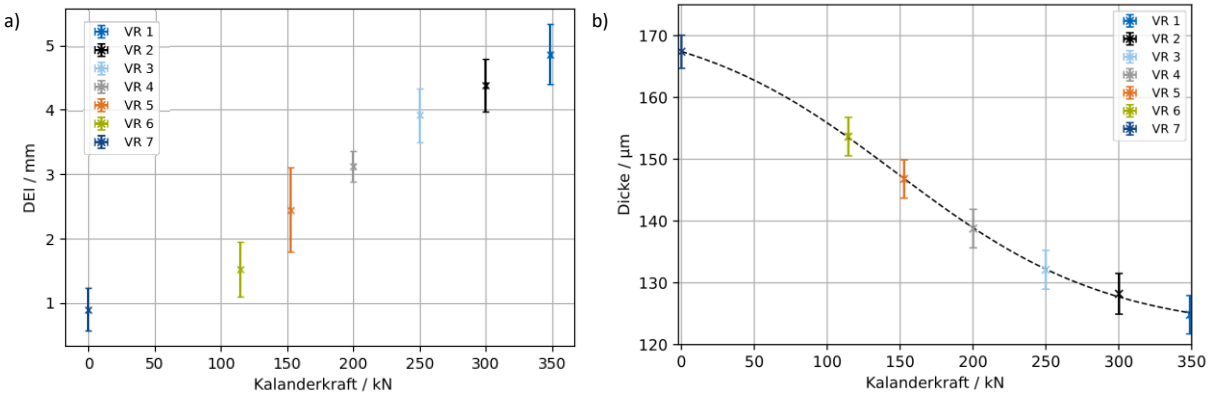

Abbildung 10: Verfolgung der Prozessdaten nach dem Kalandrierprozess: a) gemittelter DEI und b) gemittelte Elektrodendicke in Abhängigkeit von der eingestellten Walzkraft für sieben aufeinanderfolgende Versuchsräume (VRs).

Beide Qualitätsparameter hängen in hohem Maße von der Walzkraft ab. Es konnte beobachtet werden, dass mit zunehmender Verdichtung sowohl die Elektrodenwellung in Form des DEI zunimmt als auch die Elektrodendicke abnimmt. Darüber hinaus wurde eine direkte Korrelation zwischen der Walzkraft der Kalandrieranlage und dem resultierenden Real-Walzspalt festgestellt. Dieser Real-Walzspalt ist eine geeignete Regelgröße für den Kalandrierprozess.

UAP 3.3: Erarbeitung des Maschinenzwillings

In UAP 3.3 wurde ein Maschinenzwilling erarbeitet, welcher den Kalandrierprozess digital abbildet. Hierfür wurde zuerst ein Konzept entwickelt und implementiert. Die Formulierung eines vollständigen Zielbilds bildete die Grundlage, um die richtigen technischen Anforderungen an den Zwilling und die Anlage formulieren zu können. Die vier Ziele des Maschinenzwillings sind eine Inline-Anpassung durch den Maschinenbediener, eine optimierte Produktionsplanung, ein verbessertes Anlagen- und Werkzeugverständnis und eine durchgängige Prozessverfolgbarkeit – letzteres in Zusammenarbeit mit dem InZePro-Projekt *TrackBatt*. Die optimierte Produktionsplanung wird durch die Offline-Untersuchung im Prozesszwilling, also der vereinfachten Darstellung des zu kalandrierenden Elektrodenauftrags in der Benutzeroberfläche gewährleistet werden. Die Verbesserung des Anlagen- und Werkzeugverständnisses wird durch die Möglichkeit zur Offline-Untersuchung des Prozesses und der Anlage ermöglicht werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden nur vereinzelte Funktionen detaillierter dargestellt. In Abbildung 11 ist der schematische Aufbau der digitalen Infrastruktur des Maschinenzwillings dargestellt.

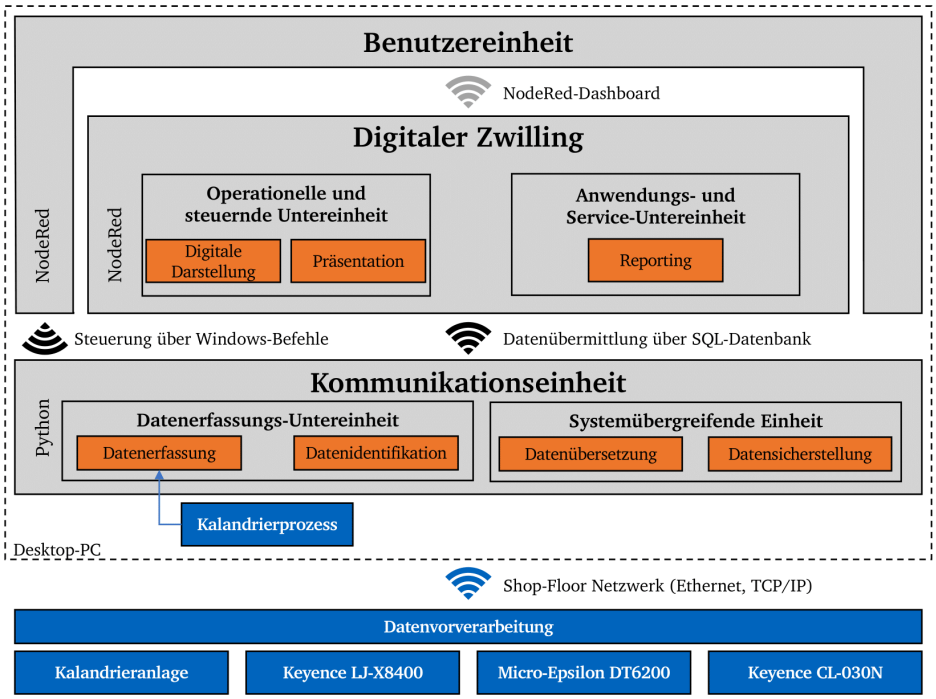

Abbildung 11: Schematische Darstellung des informationstechnischen Aufbaus des digitalen Maschinenzwillings der Kalandrieranlage in Anlehnung an ISO 23247.

Die Abbildung veranschaulicht die Struktur des implementierten digitalen Maschinenzwillings und zeigt gleichzeitig alle Bestandteile schematisch auf. Auf unterster Ebene stehen die Domänen wie die externe Sensorik oder die Anlagensteuerung. Die Position der Datenvorverarbeitung im Schaubild soll die Vorverarbeitung der auszugebenden Daten innerhalb der Domäne veranschaulichen. Beispielsweise werden die Längswellungsdaten bereits im Sensor in eine UTF-8-Zeichenkette übertragen. Eine Besonderheit stellt die Domäne des Kalandrierprozesses dar, welche innerhalb der Desktop-PC-Umgebung positioniert wurde. Ein Teil der Datenerfassung für den Kalandrierprozess erfolgt bei der schematischen Planung des Prozesses durch die Auswertung der Beschichtungsdaten des zu kalandrierenden Elektrodenbands in der Benutzereinheit. Der Desktop-PC stellt die Kommunikation mit den physischen Domänen über das Shop-Floor-Netzwerk sicher und beinhaltet alle Funktionseinheiten der Kommunikations- und Datenverarbeitung im Maschinenzwilling. Zwischen dem Zwilling und der Kommunikationseinheit erfolgt die Datenübermittlung über die lokal auf dem PC laufende SQL-Datenbank. Die Steuerung der Kommunikationseinheit geschieht über den Aufruf der jeweiligen Skripte über die Benutzereinheit. Die Ebene der Kommunikationseinheit umfasst die Untereinheit der Datenerfassung sowie die systemübergreifende Einheit, die zur Datenübersetzung und Datenspeicherung zuständig ist. Alle Funktionseinheiten in der Kommunikationseinheit wurden mithilfe von Python-Skripten implementiert. Die Benutzereinheit und der digitale Zwilling wurden in NodeRED implementiert. NodeRED ist ein fluss-basiertes Entwicklungswerkzeug von IBM, das über einen Webserver bereitgestellt wird.

Die Benutzeroberfläche des Maschinenzwillings, dargestellt in Abbildung 12, entspricht der Benutzereinheit im Referenzmodell (vgl. Abbildung 11) und wird in Form von einer HTML-basierten Website über einen Webserver auf dem Desktop-PC bereitgestellt. Die NodeRED-Erweiterung bietet sowohl ein responsives Webdesign, welches den Aufruf in Webbrowsern unterschiedlicher Art und auf

unterschiedlichen Endgeräten ermöglicht, sowie ein kachel-basiertes Seitenlayout (sogenannte Bereiche). Die Benutzeroberfläche ist in mehrere Seiten aufgeteilt, die durch Anklicken der Seitenliste ausgewählt werden können. Folgende Seiten bilden die Benutzeroberfläche: Übersicht, Daten und Produktion.

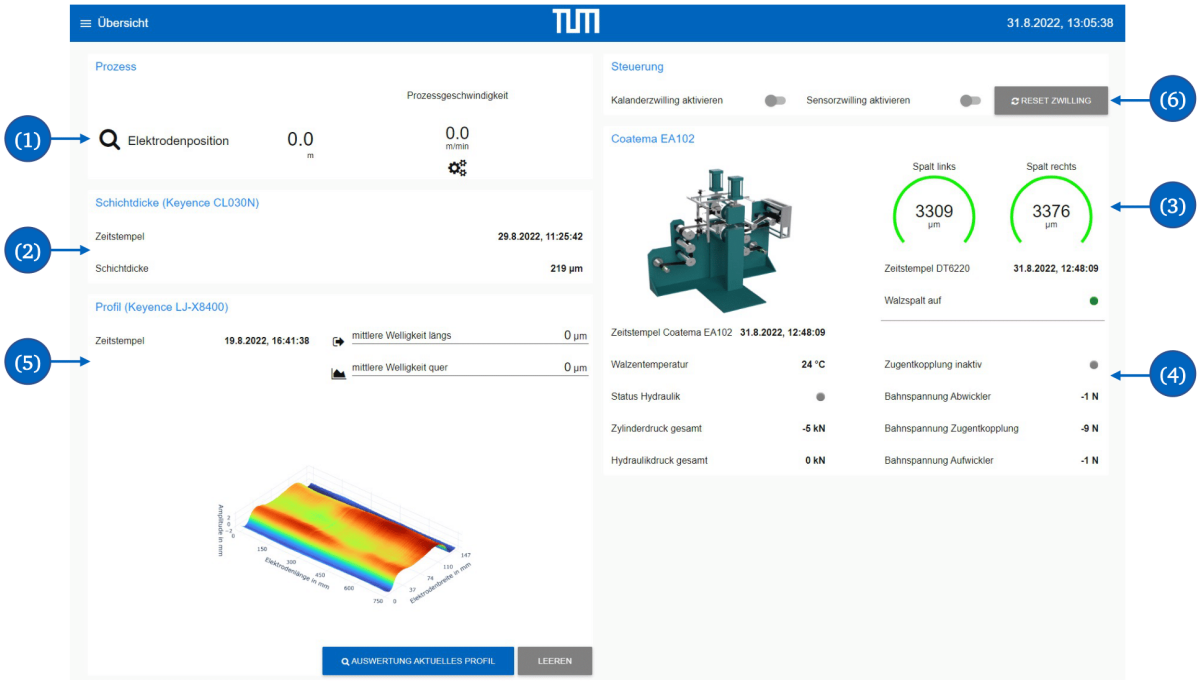

Abbildung 12: Abbildung der Seite „Übersicht“ in der Benutzeroberfläche des digitalen Zwillings. Dargestellt sind (1) Daten des Prozesses, (2) Daten zur Schichtdicke, (3) Daten zum Spalt, (4) Daten zur Kalandrieranlage, (5) Höhenbild-Auswertung und (6) Steuerung des digitalen Zwillings.

Die Übersichtsseite beinhaltet alle relevanten Sensor-, Anlagen- und Prozesswerte, die Steuerung des Zwillings sowie die erweiterte Auswertung der aufgezeichneten Höhenbilder. Dabei sind grundsätzlich alle Funktionen und Domänen in eigene Bereiche aufgeteilt. Besonders relevante Datenwerte, wie die Position auf der Elektrode und die Prozessgeschwindigkeit (1) sowie der Spalt (3), sind dargestellt. Durch die einfache und ergonomische Darstellung der relevanten Prozessgrößen kann der Bediener mit geringen Reaktionszeiten eine Anpassung der Prozessparameter bei Abweichung vom jeweiligen Soll vornehmen. Weiterhin sind die Schichtdicke (2), relevante Anlagenwerte (4) und die erweiterte Höhenbildauswertung (5) in der Übersichtsseite dargestellt. Die Steuerung des Zwillings ist im oberen, rechten Bereich (6) der Benutzeroberfläche positioniert worden und durch Schiebeschalter steuerbar. Sämtliche Knöpfe und Schalter sind in einer für die jeweilige Funktionen einheitlichen Logik gestaltet worden. So werden Schiebeschalter durch die Möglichkeit der Darstellung des aktuellen Zwillingszustandes für die Steuerung des Zwillings eingesetzt, wohingegen Knöpfe für einmal zu betätigenden Funktionen, wie die Ausführung von Python-Skripten verwendet werden. Die Höhenbildauswertung (5) verfügt daher ebenso wie die Funktion zum Zurücksetzten aller Python-Funktionen (6) über einen Knopf.

AP 4: Entwicklung echtzeitfähiger Ersatz-Hybridmodelle und softwareseitige Implementierung in die Kalandersteuerung

UAP 4.1: Definition von Prozessgrenzen zur Qualitätssteigerung und Ausschussreduzierung

Die Definition von Prozessgrenzen wurde durch die Integration der Inline-Messtechnik befähigt. Die Korrelation von Prozessparametern und Materialeigenschaften mit Fehlerbildern ermöglicht die frühzeitige Prognose der erreichbaren Elektrodenqualität nach dem Kalandrierprozess und der entsprechenden Ausschussraten. Die Festlegung der Prozessgrenzen ist stark von den nachfolgenden Prozessschritten und den eingesetzten Materialien abhängig. Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde ein DEI etabliert, der in der wissenschaftlichen Literatur zur Korrelation mit der Deformation der Elektroden-Einzelblätter nach dem Vereinzeln genutzt wurde. Eine starke Verdichtung im Kalandrierprozess führt zu hohen Abweichungen der Elektroden-Einzelblätter senkrecht zur Kontaktfläche in Form einer Krümmung. Diese spiegelt sich im anschließend hergestellten Zellstapel wider. In der Industrie wird für einen prozesssicheren Stapelprozess von Elektroden-Einzelblättern eine maximale Elektrodenkrümmung von ca. 8 mm angesetzt. Mittels DEI kann diese direkt mit der Inline-Messung während des Kalandrierprozesses korreliert und als Quality-Gate genutzt werden. So kann der Kalandrierprozess angepasst werden, um Ausschuss in Folgeprozessen zu vermeiden.

Der Fokus der Untersuchung lag zudem auf der akzeptablen Toleranz der Elektrodenschichtdicke nach dem Kalandrieren für die Befähigung der Closed-Loop-Regelung (UAP 4.3). Die Prozesstoleranz beim Kalandrieren ist in Bezug auf die Homogenität der erzielten Elektrodendicke von besonderer Relevanz, da Abweichungen von den angestrebten Werten zu Schwankungen in der Porosität führen und folglich die elektrochemische Leistung der fertigen Zelle beeinflussen können. Basierend auf einer umfassenden Literaturrecherche und den im Rahmen von AP 6 durchgeführten Verdichtungsversuchen wurde der Real-Walzspalt als sinnvoller Regelparameter identifiziert, um den Prozess in Abhängigkeit des Eingangsmaterials einzustellen. Für die Validierung der zu entwickelnden Closed-Loop-Regelung wurde ein Toleranzfenster von ca. ± 2 µm für die zu erreichende Elektrodendicke nach dem Kalandrierprozess definiert.

UAP 4.3: Entwicklung einer Closed-Loop-Regelung

Das Inline-Messsystem zur Schichtdickenmessung wurde hinsichtlich Funktionalität geprüft und in der Kalandrieranlage am *iwb* integriert. Wie bereits erwähnt, erwiesen sich die konfokal-chromatischen Sensorköpfe als anfällig gegenüber Schwingungen des Glättwerks und einer unruhigen Bahnführung. Speziell bei Kathoden ist eine optimierte Integration des Schichtdickenmesssystems notwendig, da diese grundsätzlich bei hohen Verdichtungen stärker ausgeprägte Fehlerbilder aufweisen. Diese wirken sich negativ auf die Messgenauigkeit der Schichtdicke aus. In Abbildung 13 ist das entwickelte Konzept schematisch dargestellt.

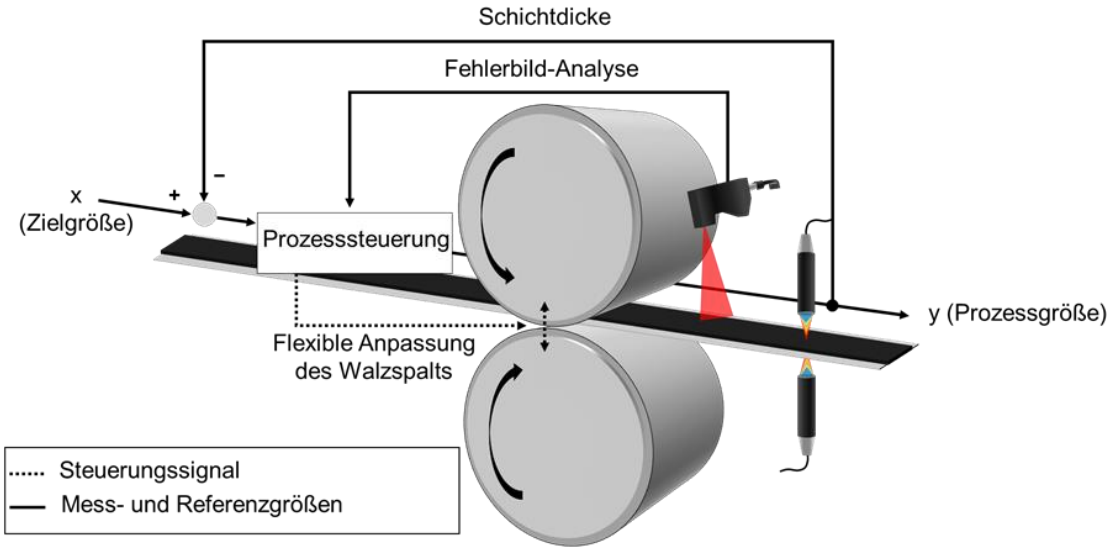

Abbildung 13: Konzept einer agilen Prozesssteuerung in einer Closed-Loop-Regelung mittels Fehlererkennung und Schichtdickenmessung der Elektrodenbahn.

Der Lasertriangulationssensor ist der konfokalen Schichtdickenmessung als „Indikatorsystem“ vorgeschaltet. Die Quantifizierung und Vergleichbarkeit der mittels Lasertriangulation detektierten Fehlerbilder wird durch die Datenverarbeitung und Berechnung von DEI-Werten unterstützt. Vor dem Kalandrierprozess wird in einer Anwendungssoftware ein Sollwert für die Schichtdicke vorgegeben und mit der konfokal gemessenen Schichtdicke (definiert als Prozessgröße) verglichen. Der Real-Walzspalt wird in einem agilen und geschlossenen Regelkreis auf Basis der Abweichung über die intelligente Prozesssteuerung angepasst. Gleichzeitig wird das Elektrodenprofil längs und quer zur Bahnlaufrichtung auf Fehlerbilder überwacht. Die Netzwerktopologie für die Closed-Loop-Regelung der Kalandrieranlage am *iwb* ist in Abbildung 14 dargestellt.

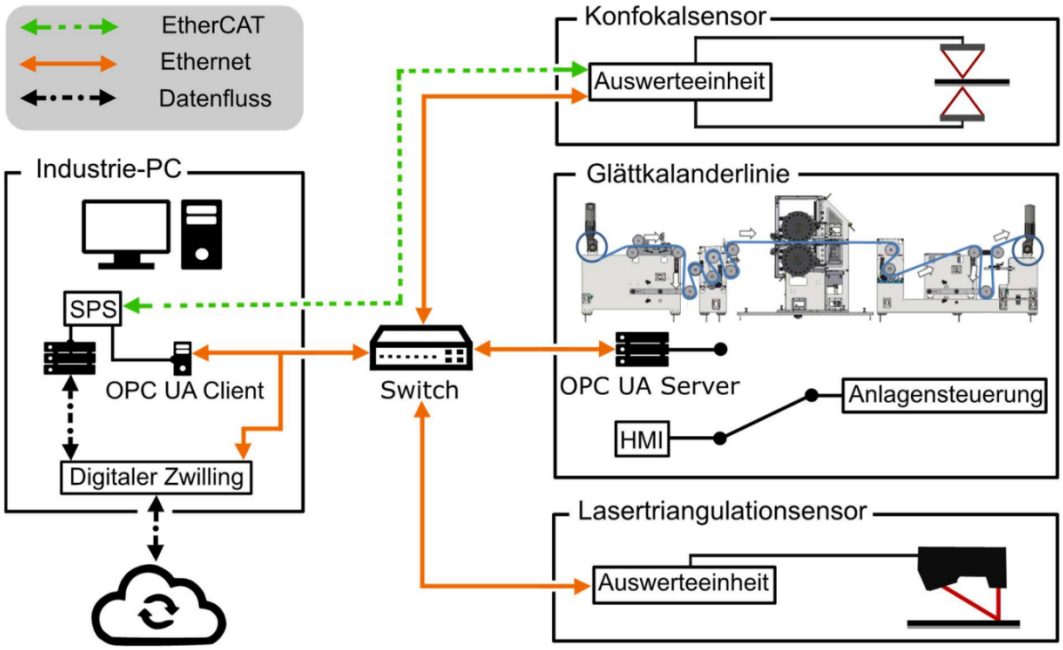

Abbildung 14: Systemaufbau und Netzwerktopologie der Kalandrieranlage am iwb.

Die Glättkalanderlinie wurde mittels Ethernets an den Industrie-PC angeschlossen. Durch die Implementierung eines OPC-UA-Clients als Teil des SPS-Programms konnte die Kommunikation zwischen den Steuerungen durch Nutzung des OPC-UA-Protokolls hergestellt werden. Als weitere Teilnehmer des Ethernet-Netzwerks wurden die Steuereinheit der chromatisch-konfokalen Messung sowie die Auswerteeinheit des ebenfalls in der Anlage verbauten Lasertriangulationssensors des Typs *LJ-X8400* hinzugefügt.

AP 5: Integration und Etablierung intelligenter, KI-basierter Prozesssteuerung über Produkt- bzw. Maschinenzwilling (Echtzeit-Rückkopplung analysierter Messdaten)

UAP 5.1: Verarbeitung der gesammelten Daten durch KI-basierte Methoden

Im Rahmen der Projektbearbeitung im Konsortium zeigte sich, dass die verwendeten industriellen Sensoren ebenso wie die Datenschnittstelle zur Kalandrieranlage sehr zuverlässig Daten liefern. Dies ermöglichte die Entwicklung einer Closed-Loop-Regelung basierend auf der inline gemessenen Elektrodendicke. Der Einsatz von Methoden der künstlichen Intelligenz konnte daher zielgerichtet für die Prädiktion von Produkteigenschaften genutzt werden. Die echtzeitfähige Rückkopplung der Messdaten aus der Anlagensteuerung über OPC-UA sowie der Inline- und Offline-Messdaten über den Maschinenzwilling in Zusammenarbeit mit *TrackBatt* ermöglicht eine prozesskettenübergreifende Analyse von Wechselwirkungen zwischen der Produktqualität und dem Kalandrierprozess. Die daraus gewonnen Erkenntnisse dienen als Unterstützung für den Anlagenbediener bei der Parameterfindung. Die aus einer Versuchsdurchführung gewonnen Prozessdaten wurden mittels Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) analysiert. Beispielsweise wurde der Springback-Effekt von Graphit-Anoden in Abhängigkeit des Kalandrierprozesses und die Wechselwirkung zum nachfolgenden Prozessschritt des Vakuumtrocknens bewertet. Hierfür wurden KI-Modelle auf Basis einer linearen Regression, einem Decision Tree (DT), einer Support Vector Machine (SVM), Ensembles, einer Gaussian Process Regression (GPR) und Neuronaler Netze (NN) erstellt und auf ihre Vorhersagegenauigkeit anhand von Validierungs- und Testdaten überprüft. Der nachfolgende Effektplot visualisiert die Auswirkungen der Einflussfaktoren auf den Springback von Graphit-Anoden, indem der Unterschied im Springback zwischen den jeweils minimalen und maximalen Stufen der entsprechenden Faktoren dargestellt wird.

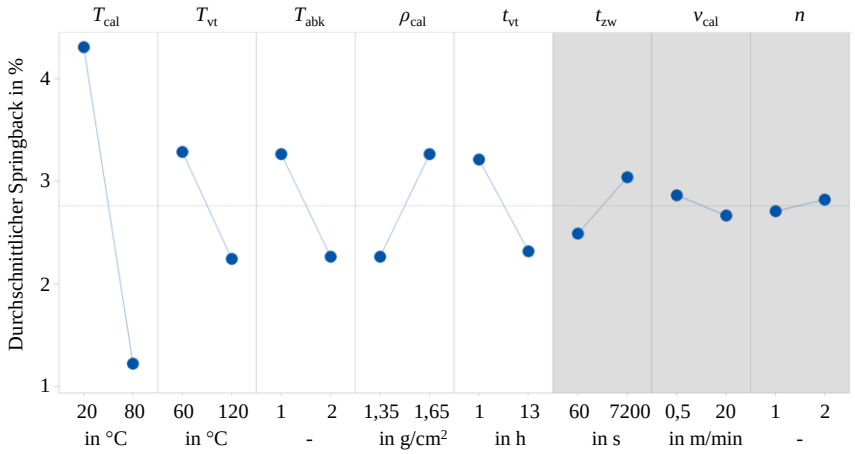

Abbildung 15: Effektplot der Faktoren auf den Springback (T_{cal}: Walzentemperatur, T_{vt}: Temperatur Vakuumtrockenofen, T_{abk}: Abkühlmethode, ρ_{cal}: Elektrodendichte, t_{vt}: Trocknungszeit, t_{zw}: Ruhezeit zwischen Prozessschritten, v_{cal}: Walzengeschwindigkeit, n: Anzahl an Durchläufen).

Die Prozessparameter sind in absteigender Reihenfolge ihres Einflusses dargestellt. T_{cal} hatte den größten Effekt auf den Springback, mit einem Dickenunterschied von etwa 3,1 % zwischen den niedrigsten und höchsten Stufen dieses Parameters. Die Springback-Effekte von T_{vt}, T_{abk}, ρ_{cal} und t_{vt} lagen jeweils bei etwa 1 %. Für t_{zw} betrug der Springback-Effekt etwa 0,6 %, für v_{cal} etwa 0,2 % und für die Anzahl der Durchläufe etwa 0,1 %. In Tabelle 2 sind die numerischen Kennzahlen zur Vorhersagegenauigkeit aus der KI-Modellvalidierung zusammengefasst.

Tabelle 2: Vorhersagefehler aus der KI-Modellvalidierung (RMSE: Root Mean Square Error, R^2: Bestimmtheitsmaß, MSE: Mean Square Error, MAE: Mean Absolute Error, σ: Standardabweichung, μ: Mittelwert). Die Standardabweichung σ ist in Prozent relativ zu den Durchschnittswerten des Springbacks aus dem Datensatz angegeben.

Algorithmus	**RMSE (μ)**	**RMSE (σ)**	**RMSE (σ *in* %)**	**R^2 (μ)**	**MSE (μ)**	**MAE (μ)**
Lin. Regr.	0,96	0,023	1,06	0,24	0,91	0,82
DT	0,51	0,033	1,53	0,79	0,26	0,39
SVM	0,44	0,026	1,20	0,84	0,19	0,35
GBT	0,45	0,021	0,97	0,83	0,20	0,35
GPR	0,44	0,026	1,17	0,84	0,19	0,35
NN	0,50	0,055	2,52	0,79	0,25	0,38

Die Untersuchungen zeigten, dass das SVM- und GPR-Modell mit einem RMSE-Mittelwert von 0,44 % Springback und einem R^2 von jeweils 0,84 die niedrigsten Vorhersagefehler aufwiesen. Das GBT-Modell performte minimal schlechter mit einem RMSE-Mittelwert von 0,45 % Springback und einem R^2 von 0,83. Die niedrigen Standardabweichungen σ des durchschnittlichen RMSE für SVM (1,20 %), GBT (0,97 %) und GPR (1,17 %) zeigten, dass die RMSE-Werte in den Modell-Erstellungen nahe am Durchschnitt lagen. Dies deutet auf robuste Modelle und ausreichende Datenlage hin und erhöht damit die Zuverlässigkeit der Ergebnisse. Insgesamt waren die SVM-, GBT- und GPR-Modelle in der Lage, die Springback-Werte in den Daten gut zu reproduzieren, und sind daher für die Vorhersage des Springbacks gut geeignet. Die Verarbeitung der gesammelten Messdaten mittels KI trägt damit einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Fertigungsstabilität und zur Unterstützung der Anlagenbediener bei.

UAP 5.2: Anwendung und Verifizierung der Modelle

Ziel in diesem UAP war die Validierung der entwickelten Closed-Loop-Regelung. Diese sollte den Einfahrprozess beschleunigen und Materialeinsparungen ermöglichen. Zur Validierung der Closed-Loop-Regelung wurde das Einfahren auf eine gewünschte Ziel-Porosität an einer Graphit-Anode und NMC622-Kathode untersucht. Zur Validierung des automatisierten Einfahrprozesses wurde das Einregeln bei einer Bahngeschwindigkeit von v_{Bahn} = 10 m/min untersucht. Abbildung 16 zeigt den Verlauf der Elektrodendicke beim Versuch des automatisierten Einfahrens. Die vertikalen, roten Strichpunktlinien stellen den Zeitpunkt eines Reglereingriffs in Form einer Stellgrößenkorrektur dar. Im oberen Abschnitt jedes Regelungszyklus ist dabei der jeweilige, durch die Regelung berechnete Sollwert für den Real-Walzspalt dargestellt.

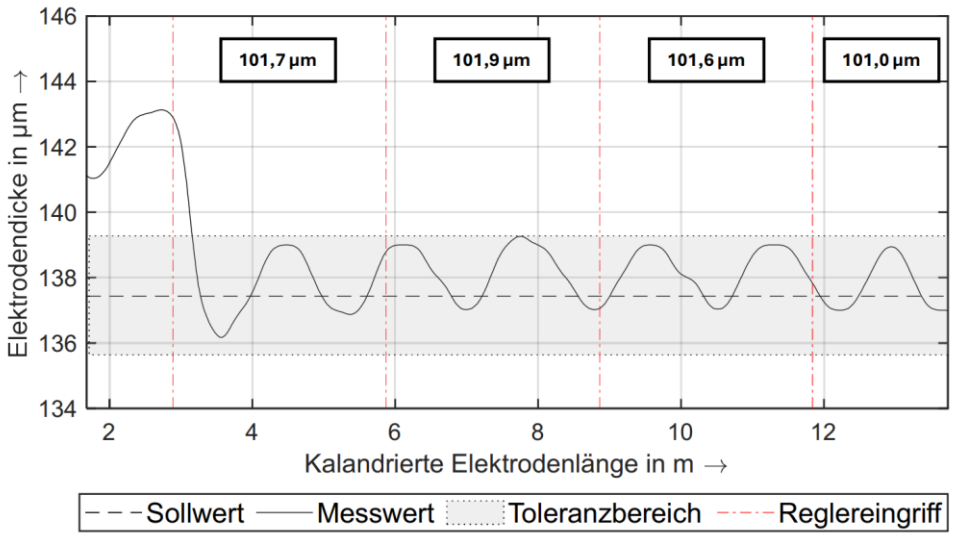

Abbildung 16: Einregeln auf einen Sollwert der Porosität bzw. Elektrodendicke bei einer Bahngeschwindigkeit von 10 m/min.

Wie in Abbildung 16 zu sehen, führte die Regelung auch bei einer höheren Bahngeschwindigkeit zu einem schnellen, stabilen Einregeln auf die gewünschte Elektrodendicke innerhalb eines engen Toleranzfenster von ca. ± 2 µm. Die aufgrund der Modellierungsfehler der Vorsteuerung entstehende Abweichung der Ist-Elektrodendicke vom Sollwert im ersten Abschnitt wird durch den ersten Reglereingriff bereits reduziert, sodass der Toleranzbereich eingehalten wird. In der gemessenen Elektrodendicke wurde zudem ein Einfluss des Walzenrundlaufs ersichtlich. Dies wurde im Rahmen des Projekts ebenfalls durch die Projektpartner identifiziert und untersucht.

AP 6: Gezielte Verdichtungsversuche mit unterschiedlichen Materialsystemen zur physikalischen bzw. elektrochemischen Charakterisierung

UAP 6.1: Untersuchungen mit unterschiedlichen Materialsystemen (Datenaufnahme)

In UAP 6.1 erfolgte eine Bündelung aller durchgeführten Kalandrier- und Elektroden-charakterisierungsversuche, die in begleitenden Arbeitspaketen durchgeführt wurden. Als Kathodenmaterialsystem wurde NMC622 bzw. LFP inkl. einer zugehörigen graphitbasierten Anode gemäß den Vorgaben des InZePro-Clusters eingesetzt. Das Elektrodenmaterial wurde für entsprechende Kalandrierversuche verwendet, die der Erprobung und Inbetriebnahme der Sensorik, der Datenaufnahme sowie der Verifizierung und Validierung der Modelle dienten. Die wesentlichen Ergebnisse sind den Beschreibungen der anderen UAPs zu entnehmen.

UAP 6.2: Untersuchung strukturmechanischer Eigenschaften

Im Rahmen von UAP 6.2 wurden gezielt Elektroden strukturell untersucht, um den Einfluss der Kalandrierparameter auf die Elektroden auszuwerten und Rückschlüsse auf Änderungen im Prozess ziehen zu können. Kerninhalt des *iwb* in diesem UAP war die Befähigung einer Messmethodik, um die Partikeleindrücke von Aktivmaterialpartikeln in der Substratfolie zu charakterisieren. In Zusammenarbeit mit dem Projekt *LaserScale* aus dem InZePro-Cluster wurde hierfür die Analyse mittels Laser-Scanning-Mikroskop (LSM) befähigt. In Abbildung 17 sind beispielhaft die mit dem LSM

gewonnen Höhendaten der Topologie einer Aluminium-Substratfolie gezeigt. Die Beschichtung der NMC622-Kathode (bereits kalandriert) wurde zuvor unter Verwendung eines Lösemittels entfernt.

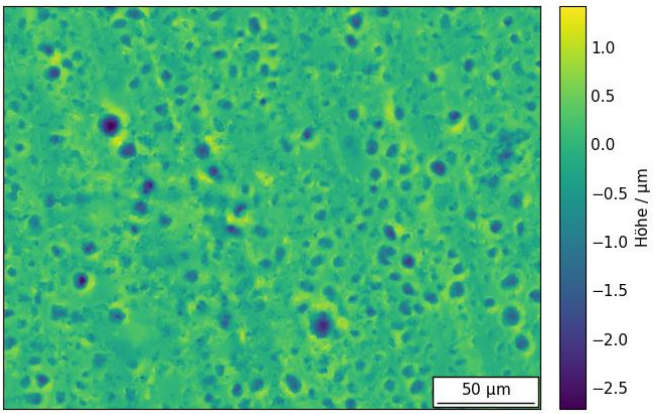

Abbildung 17: Identifikation von Eindrücken in einer Aluminium-Substratfolie, die aus der Verdichtung der NMC622-Kathoden resultieren, unter Verwendung des automatisierten Ansatzes für die Geometriebestimmung.

Beim Kalandrieren können Aktivmaterialpartikel in die Substratfolie aus Aluminium eingedrückt werden. Die dabei entstehenden Vertiefungen müssen für eine umfassende Qualitätsbewertung und zum Verständnis von Prozess-Produkt-Zusammenhängen quantifiziert werden. In Abbildung 18 sind Laser-Scanning-Mikroskop-Aufnahmen von entschichteten NMC622-Kathoden bei unterschiedlichen Verdichtungsraten dargestellt.

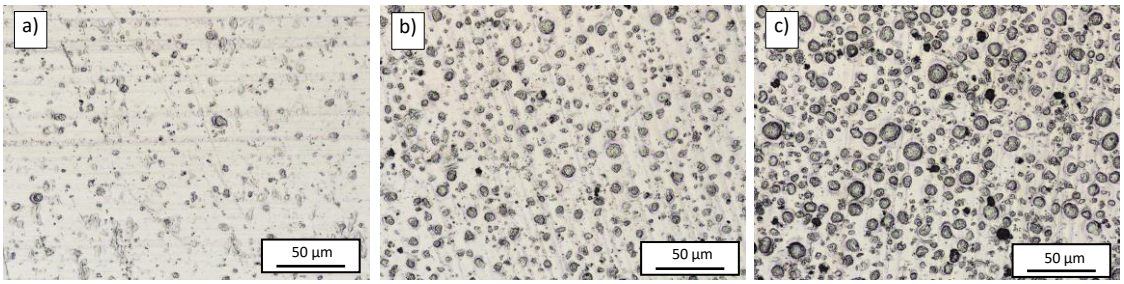

Abbildung 18: Mikroskop-Aufnahme der Partikeleindrücke in Abhängigkeit der Verdichtungsrate für a) 10%-, b) 20%- und c) 30%-Verdichtungsrate von einseitig beschichteten NMC622-Kathoden.

Mit steigender Verdichtungsrate wurde optisch eine Zunahme der Anzahl an Partikeleindrücken festgestellt. Die Zunahme der Kontaktfläche zwischen Beschichtung und Aluminium-Substratfolie führte neben einer Erhöhung der Adhäsion auch zu einer verbesserten elektrischen Leitfähigkeit. Die Quantifizierung der Kontaktfläche an der Schnittstelle Beschichtung-Substratfolie mithilfe des entwickelten Algorithmus bietet dementsprechend wertvolle Erkenntnisse zur Wechselwirkung zwischen dem Kalandrierprozess und der Elektrodenqualität, welche bisher lediglich qualitativ bestimmt werden konnten. Abbildung 19 stellt die Verteilung der Partikeleindrücke und deren Eindringtiefe in die Substratfolie in Abhängigkeit der Verdichtungsrate dar.

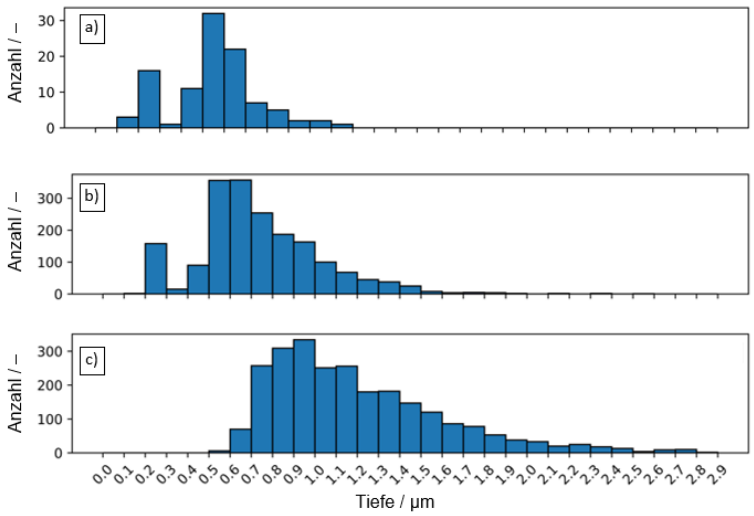

Abbildung 19: Analyse der Partikeleindrücke und deren Eindringtiefe in die Substratfolie in Abhängigkeit der Verdichtungsrate für a) 10 %-, b) 20 %- und c) 30 %-Verdichtungsrate.

Ab einer Verdichtungsrate von 10 % war die Linienlast hoch genug, um einen geringen Teil der Aktivmaterialpartikel in die Substratfolie zu pressen. Bei einer Verdichtungsrate von 20 % wurde die Mehrheit der an die Substratfolie angrenzenden Partikel in die Substratfolie gepresst und die Anzahl der Partikeleindrücke nahm bei einer Erhöhung der Verdichtung nicht mehr wesentlich zu. Die Partikel wurden dementsprechend tiefer in die Substratfolie gepresst, was zu einer Vergrößerung der Eindrücke führt. Die maximale Tiefe der Eindrücke lag bei ca. 3 µm.

UAP 6.3: Elektrochemische Performance

In Untersuchungen zu Fehlerbildern und deren Quantifizierung mittels Inline-Messtechnik wurde gezeigt, dass eine erhöhte Walzentemperatur die Verarbeitung der Elektroden verbessert und insbesondere die Intensität von geometrischen Fehlerbildern (Elektrodenwelligkeit und Wrinkles) reduziert werden kann. Aus diesem Grund wurde der Einfluss einer erhöhten Walzentemperatur von 90 °C bzw. 120 °C auf die elektrochemische Performance von großformatigen Pouch-Zellen untersucht. Die Ergebnisse der Zyklisierung sind in Abbildung 20 dargestellt.

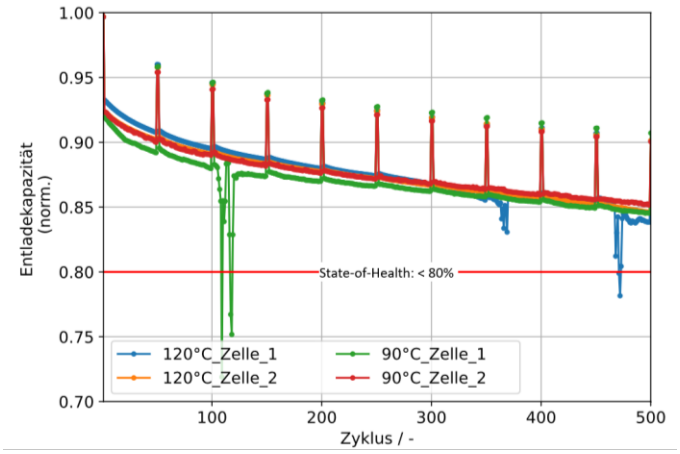

Abbildung 20: Analyse des Einflusses der Walzentemperatur auf die elektrochemische Performance bei großformatigen Zellen (InZePro-Standardbeladung, Zyklisierung bei 1C, Check-Up alle 50 Zyklen).

Die Variation der Walzentemperatur, welche für die Zellen mit einer Stapelanzahl von 12 Kathoden zu 13 Anoden (12/13) erfolgte, zeigte bezüglich der normierten Entladekapazitäten keine signifikanten Unterschiede. Hieraus kann grundsätzlich abgeleitet werden, dass eine Walzentemperatur von 120 °C zur Verbesserung der Prozessierbarkeit beim Kalandrieren eingestellt werden kann, ohne dass die elektrochemische Performance der Zellen im Vergleich zur Kalandrierung bei einer Walzentemperatur von 90 °C negativ beeinflusst wird.

Des Weiteren lag ein wesentlicher Fokus auf der Korrelation der Anzahl an Partikeleindrücken mit dem Grenzflächenwiderstand zwischen Substratfolie und Beschichtung. Abbildung 21 stellt die Abhängigkeit des Grenzflächenwiderstand von der Anzahl an Partikeleindrücken nach dem Kalandrieren bei Raumtemperatur dar.

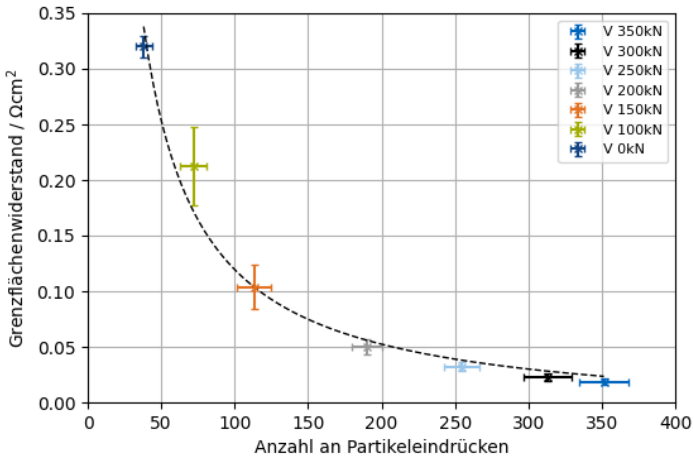

Abbildung 21: Verfolgung der Prozessdaten nach dem Kalandrierprozess: gemittelter Grenzflächenwiderstand in Abhängigkeit von der Anzahl an Partikeleindrücken für sieben aufeinanderfolgende Versuchsräume (Vs).

Die vorliegende Untersuchung hat ergeben, dass mit zunehmender Verdichtungskraft die Anzahl an Partikeleindrücken zunimmt. Dies resultiert in einem verbesserten mechanischen Kontakt zwischen der Beschichtung und der Substratfolie und führt zu einer erhöhten elektrischen Leitfähigkeit der Elektrode an der Grenzfläche. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 21 durch einen exponentiellen Abfall des Grenzflächenwiderstands ersichtlich. Die Quantifizierung der Partikeleindrücke trägt somit zur Erfassung qualitäts-relevanter Prozess-Produkt-Wechselwirkungen hinsichtlich der elektrischen Eigenschaften der Elektrode bei.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Bei den wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises handelt es sich um die Beschaffung der neuen Kalandrieranlage sowie um die Beschaffung von drei Lasertriangulationssensoren und einem optisch-konfokalen Dickenmesssystem inklusive der zugehörigen Steuergeräte/Schnittstellen und deren mechanische Integration in die Anlage. All diese Beschaffungen waren von entscheidender Bedeutung für den Projekterfolg. Die Inline-Erfassung der kalandrierten Elektrodendicke bzw. der Fehlerbilder wurde durch diese Beschaffungen ermöglicht. Darüber hinaus wurde Elektrodenmaterial zur Inbetriebnahme der Kalandrieranlage sowie zur Erprobung bzw. Inbetriebnahme der Sensorik und zur Versuchsdurchführung beschafft.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Erforschung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge beim Kalandrieren von Batterieelektroden wurde bislang nur unzureichend durchgeführt, sodass dieser Prozessschritt nach wie vor als unreifer Produktionsprozess zu betrachten ist. Um Produktionsausschuss und Anlagenstillstände zu vermeiden, ist eine kontinuierliche Überwachung des Produktionsprozesses sowie dessen Automatisierung erforderlich. Um in Deutschland und Europa dieses Verfahren dennoch wirtschaftlich durchführen zu können, bedarf es einer Unterstützung des Bedienpersonals durch eine intuitive, sensorbasierte Fehlerbildererkennung sowie einer Hilfestellung bei der Materialcharakterisierung.

Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses

Im Rahmen des Projekts wurden die Resultate in Form eines ganzheitlichen Systems bereitgestellt. Dieses setzt sich aus Inline-Sensorik, der Auswertung von Sensor- und Anlagendaten sowie einer intuitiven Visualisierung, insbesondere quantitativer Fehlerkennzahlen, zusammen. Dieses System kann von den Anlagenherstellern von Kalandrieranlagen in enger Abstimmung mit den am Markt etablierten industriellen Zellproduzenten als Nachrüstoption bei bestehenden Anlagen und als Ausstattungsoption bei neuen Anlagen adaptiert werden. Der voraussichtliche Nutzen des Gesamtsystems bezieht sich primär auf die Identifikation von Wechselwirkungseffekten und die Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Implementierung.

Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Im Rahmen anderer Forschungstätigkeiten erfolgte ebenfalls die Integration einzelner Sensoren in Anlagen für die Elektroden- bzw. Zellherstellung. Der gesamtheitliche Ansatz der sensorbasierten Erfassung und maschinellen Auswertung von Fehlerbildern sowie der automatisierte Einfahrprozess in einer Closed-Loop-Regelung basierend auf der gemessenen Elektrodendicke in Kombination mit der Erweiterung des Prozessverständnisses für das Kalandrieren stellen jedoch eine Neuheit dar.

Veröffentlichungen

Die im Rahmen des Projekts erstellten Publikationen sind online verfügbar bzw. werden demnächst eingereicht. In allen Veröffentlichungen wurde/wird auf *InteKal* referenziert.

MAYR ET AL. 2022
Mayr, A.; Schreiner, D.; Stumper, B.; Daub, R.: In-line Sensor-based Process Control of the Calendering Process for Lithium-Ion Batteries. Procedia CIRP 107 (2022), S. 295–301

MAYR ET AL. 2025
Mayr, A.; Link, J.; Daub, R.: Modification of Edge Zone Properties of the Current Collector Foil during Calendering of Lithium-Ion Battery Electrodes Using Induction. GCSM 2024 [manuscript accepted for publication].

MAYR ET AL. 2025
Mayr, A.; Sommer, A.; Link, J.; Schachtl, J.; Daub, R.: Analysis of Quality-Relevant Process-Structure Relationships Through Tracking and Tracing: A Comprehensive Study on the Calendering Process in Lithium-Ion Battery Production. Batteries & Supercaps [submitted].

KÖßLER ET AL. 2025
Kößler, F.; Diener, A.; Mayr, A.; Willuhn, C.; Daub, R.; Fleischer, J.; Kwade, A.: Effizientes Kalandrieren von Batterieelektroden [Efficient calendering of battery electrodes]. Wt Werkstattstechnik online, Ausgabe 5 (2025) [submitted]