

Datenerfassung zur Bedienerunterstützung beim Kalandrieren von Batterieelektroden

Dashboards in der Batteriezellfertigung

S. Anderlik, F. Kößler, J. Sawodny, J. Fleischer

ZUSAMMENFASSUNG Die Produktivität und die Produktionsqualität in der Batteriezellfertigung hängen derzeit noch stark von der Erfahrung und den Fähigkeiten der Anlagenbediener ab. Dashboards, auf denen prozessrelevante Anlagen- und Qualitätsparameter auf einem Blick angezeigt werden, können hier Abhilfe leisten und das Bedienpersonal unterstützen. Exemplarisch für den Prozessschritt des Kalandrierens wird der Ansatz zum Aufbau eines solchen Dashboards vorgestellt.

Data acquisition and visualization during the calendaring of battery electrodes using a dashboard

ABSTRACT Productivity and production quality in battery cell production still depend heavily on the experience and skills of the system operators. Dashboards that display process-relevant analysis and quality parameters at a glance can support the operating personnel. An approach for setting up such a dashboard is presented for the calendaring process step.

STICHWÖRTER

Batteriefertigung, Industrie 4.0, Automatisierung

1 Motivation

Der Bedarf an elektrischen Energiespeichern ist durch den Hochlauf der Elektromobilität im Kontext der Verkehrswende und durch den Ausbau der erneuerbaren Energien im Zuge der Energiewende stark gestiegen. Lithium-Ionen-Sekundärbatterien (im Folgenden Batterien genannt) eignen sich durch ihre hohe Energie- und Leistungsdichte besonders für Elektromobilitätsanwendungen, werden aber auch zunehmend aufgrund dieser Vorteile bei stationären Speichern eingesetzt.

Einhergehend mit dem steigenden Bedarf an Lithium-Ionen-Batterien werden die Produktionskapazitäten für Batterien auch in Europa und Deutschland ausgebaut. Zwar sind Lithium-Ionen-Batteriezellen bereits seit den 1990er Jahren kommerziell erhältlich, doch wurden diese vorwiegend in Asien produziert und ursprünglich für Consumer-Electronic-Anwendungen genutzt [1].

Im Zuge der Transformation zur Elektromobilität konnte in den letzten Jahren auch in Deutschland und Europa beträchtliches Know-how im Bereich der Batteriezellfertigung aufgebaut werden, das zum Teil noch nicht hinreichend formalisiert und dokumentiert ist. Den Fertigungsbereichen steht dieses Wissen mitunter nur bedingt zur Verfügung. Der Fachkräftemangel erschwert es zudem, Bewerber mit Vorerfahrung im Bereich der Batteriezellfertigung für die entstehenden Batteriezellfabriken zu gewinnen, sodass Produktionsmitarbeiter an die Tätigkeiten im Bereich der Batteriezellfertigung angelernt werden müssen. Die vergleichsweise teuren Rohstoffe und der hohe Ressourcenaufwand in Kombination mit Verarbeitungsgeschwindigkeiten von circa 50 m/min bis 100 m/min in industriellen Produktionsanlagen erfordern ein wachsames Auge der Mitarbeiter. Entstehender

Ausschuss muss schnell erkannt werden, sodass zeitnah in den Fertigungsprozess eingegriffen werden kann.

Eine maschinelle Erkennung von Ausschuss inklusive einer automatisierten Anpassung der Prozessparameter zur Verbesserung der Produktqualität ist insbesondere beim Prozessschritt des Kalandrierens noch nicht möglich. In den Produktionsanlagen verbaute Inline-Sensoren, die auch nachträglich installiert werden können, erleichtern es dem Anlagenbedienpersonal, entstehenden Ausschuss zu erkennen, um zeitnah gegensteuern zu können. Zur zielgerichteten Unterstützung des Anlagenbedienpersonals ist es allerdings notwendig, dass die Sensorrohdaten vorverarbeitet und möglichst klar, übersichtlich und eindeutig visualisiert werden. Eine zentrale Anzeige mit allen wesentlichen Anlagen- und Sensordaten kann in diesem Kontext äußerst hilfreich sein.

2 Kalandrieren von Batterieelektroden

Der Prozessschritt des Kalandrierens ist prädestiniert für den Aufbau eines solchen Dashboards, da hier zahlreiche Fehlerbilder entstehen können, welche die Weiterverarbeitung der kalandrierten Elektroden erschweren, **Bild 1**.

Konkret wird bei diesem Prozessschritt die zuvor beschichtete und getrocknete Batterieelektrode durch ein Walzverfahren auf ihre Zielporosität beziehungsweise Zieldicke verdichtet. Dies ist nötig, um die geforderten elektrochemischen Eigenschaften der späteren Batterie zelle zu erhalten. *Bold* und *Fleischer* beschreiben als mögliche Fehlerbilder beim Kalandrieren die Bildung kleiner fischgrätenartiger Falten im Ableiterbereich (Wrinkles), die Bildung von Wellen im Beschichtungsbereich, die Ausbildung einer Bogenform (Camber-Effekt) der kalandrierten Elektrode und der

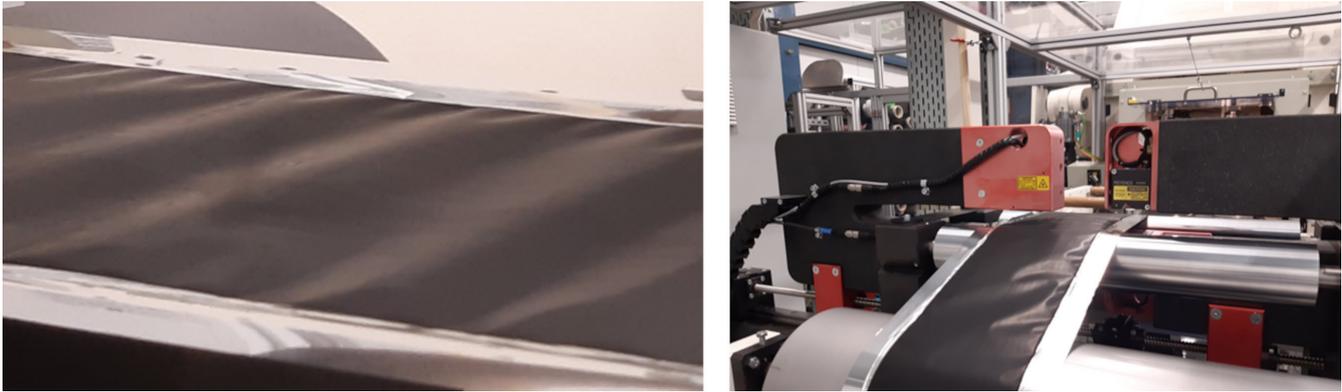


Bild 1. Wellenbildung (links) und Verwerfungen sowie Faltenbildung (rechts) beim Kalandrieren. Grafik: wbk

Riss der Elektrodenfolie [2]. Wurba *et al.* stellen die Bildung von Längsfalten in Folge des starken Verdichtens von Batterieelektroden aus Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid vor [3]. Günther *et al.* gehen im Detail auf die Bildung von Wellen im Beschichtungsbereich der Elektroden in Folge des Kalandrierens ein und erklären den daraus resultierenden Camber-Effekt und die dahinterliegenden Wirkmechanismen [4].

Mayr *et al.* stellen einen Ansatz zur Sensorintegration vor, wie inline die Wellenbildung infolge des Kalandrierens erfasst werden kann. Ferner wird ein quantitatives Beschreibungskriterium für die Wellenbildung vorgestellt. Die Fehlerkennzahl wird aus der Differenz der höchsten und niedrigsten Elektrodenerhebung in einer Referenzlänge bestimmt. Ferner zeigen die Autoren auf, dass die Elektrodendicke nach dem Kalandrieren als wesentlicher in der Produktion messbarer Qualitätsparameter von der Kalandriergeschwindigkeit abhängt [5]. Kößler *et al.* konnten zeigen, dass die Elektrodendicke nach dem Kalandrieren auch von dem Rundlauf der Kalandrierwalzen abhängt und zur Beibehaltung der kalandrierten Elektrodendicke der Soll-Kalandrierspalt reduziert werden muss, wenn die Kalandriergeschwindigkeit erhöht wird. Diese Wechselwirkung beobachteten die Autoren bei industriellen Kalandriergeschwindigkeiten von 30 m/min [6].

In der Literatur finden sich bis auf die Fehlerkennzahl bei der Wellenbildung und die Elektrodendicke nach dem Kalandrieren kaum quantitative Bewertungskriterien, die inline in der Produktion erhoben werden können. Quantitative Toleranzbereiche für derartige Bewertungskriterien finden sich noch weniger und sind Betriebsgeheimnisse der Zellfertiger. Für das Bedienpersonal sind solche quantitativen Bewertungskriterien wichtig, um auch bei Bedienerwechsel eine gleichbleibend hohe Qualität produzieren zu können. Eine Änderung der Anlagensteuerung durch den Anlagenhersteller zur Anzeige solcher quantitativer Bewertungskriterien ist möglich, aber aufwendig und führt zu Stillstandszeiten der Anlage. Daher ist es sinnvoller per Datenschnittstelle die Anlagenparameter aus der Anlagensteuerung und mögliche Sensordaten von zum Teil nachträglich eingebauten Sensoren aus den Sensorsteuergeräten auszulesen und auf einer separaten Hardware zu verarbeiten und zu visualisieren. Dies bietet den Vorteil, dass ohne die Einbeziehung des Anlagenherstellers schnell das Dashboard an neue Anforderungen angepasst werden kann.

Aus diesen Gründen wird das nachfolgend näher beschriebene Dashboard für einen Bestandskalandrierer aufgebaut. Das Dashboard vereint verschiedene Datenquellen und stellt diese Informationen dem Anwender in Echtzeit zur Verfügung. Dies ermöglicht es, die

in Bild 1 gezeigten Prozessfehler oder Abweichungen von Messgrößen sofort zu identifizieren.

3 Aufbau eines Dashboards für einen Batteriekalandrierer

3.1 Vorhandene Datenquellen und Zielsetzung

Das Dashboard wurde in eine bestehende Anlage integriert. Es handelt sich um einen Kalandrierer der Firma Saueressig vom Typ „GKL 500 MS“. Die Anlagendaten wurden über eine OPC-UA (Open Platform Communications Unified Architecture)-Schnittstelle mit einer Frequenz von 2 Hz aus der Anlagensteuerung (Siemens S7-300) ausgelesen, die vorher durch den Anlagenhersteller mittels eines Gateways (Siemens I-Device) um diese Schnittstelle erweitert wurde.

Des Weiteren wurde die Oberfläche der kalandrierten Elektrode an der Auslaufseite des Kalandriers von drei Lasertriangulationssensoren der Firma Keyence vermessen. Zwei Sensoren (LJ-V7060B) nahmen dabei die unbeschichteten Randbereiche der Elektrode auf, um insbesondere entstehende Wrinkles zu erfassen. Der Auflösung dieser Liniensensoren betrug 800 px und die verwendete Abtastrate betrug 100 Hz. Ein weiterer Lasersensor (LJ-X8900) erfasste die beschichteten Bereiche der Elektrode, um Wellen zu erfassen, die vor allem bei hohen Verdichtungen der Elektrode auftreten. Dieser Liniensensor verfügt über eine maximale Auflösung von 3200 px, ebenfalls mit einer Abtastrate von 100 Hz. Die Dicke der kalandrierten Elektrode wurde durch jeweils zwei gegenüberliegenden Punktlasersensoren (Keyence LK-H022) vermessen, **Bild 2**.

Bisher wurde jede dieser drei Datenquellen mittels einer eigenen Software ausgelesen. Dies führte dazu, dass die Daten gar nicht oder nur mit großem Aufwand zeitlich zusammengeführt werden konnten. Durch die Integration der Datenquellen in einer Datenbank für Zeitreihen konnten die Daten nun anhand ihres Zeitstempels miteinander verknüpft werden. Dies ermöglicht es, einen Zusammenhang zwischen Fehlerbildern und Prozessgrößen herzustellen und für die Fehlerbildreduktion zu nutzen.

3.2 Implementierung des Dashboards

Die Basis für das Dashboard bildet das TIG-Stack, das aus den drei Open-Source-Tools Telegraf, InfluxDB und Grafana besteht. Diese laufen jeweils in eigenen Docker-Containern, um unabhängig vom eigentlichen Betriebssystem ausgeführt werden zu können. Bei Telegraf handelt es sich um einen Agenten, an den

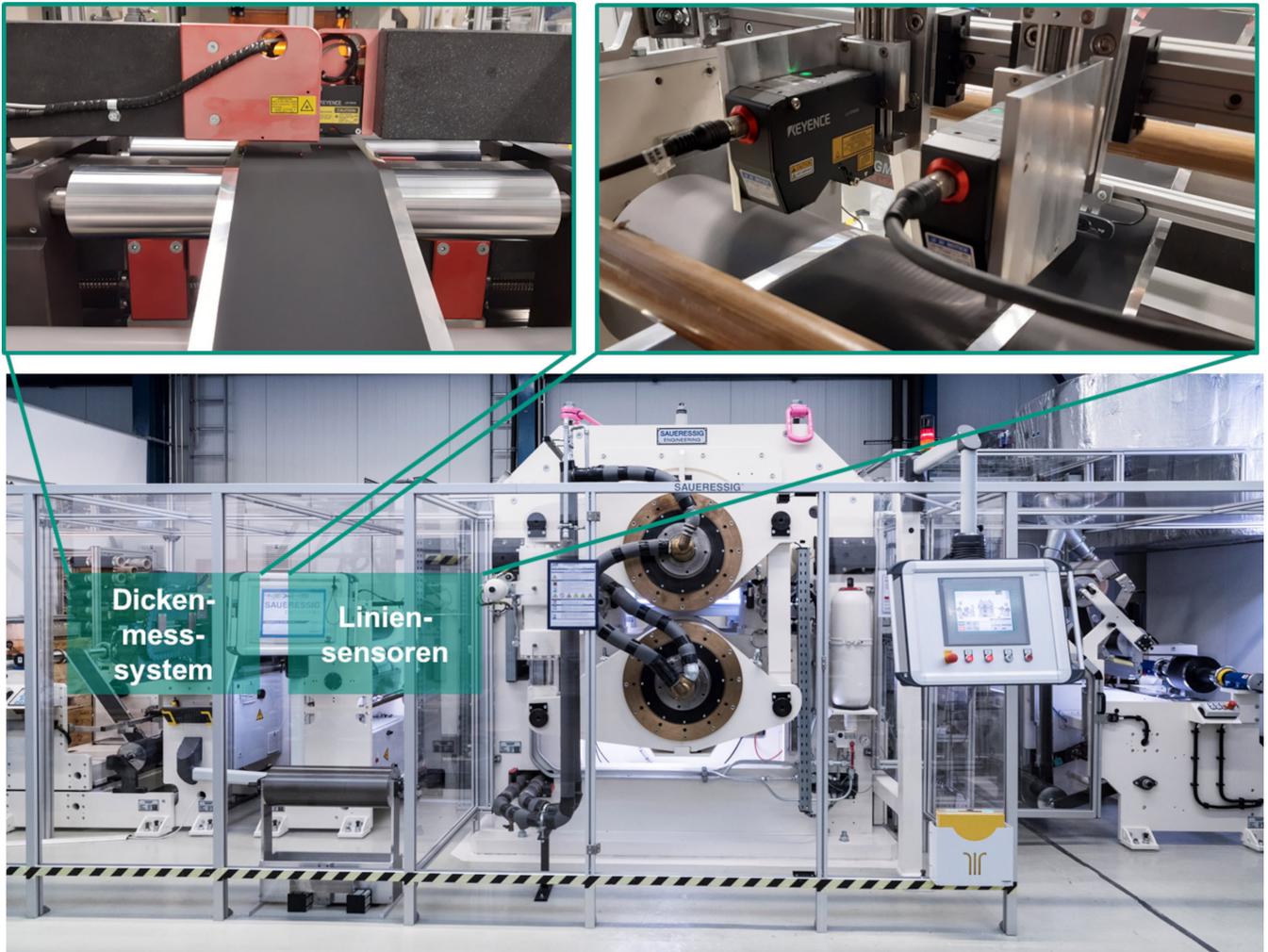


Bild 2. Übersicht Kalandrier und Sensoren. Grafik: KIT, wbk

verschiedene Datenquellen angebunden werden können. In dieser Arbeit wurde mittels Telegraf eine Verbindung zur OPC-UA-Schnittstelle des Kalandriers hergestellt. Bei InfluxDB handelt es sich um eine Datenbank, welche zur Speicherung von Zeitreihen optimiert wurde. Sie ermöglicht es große Datenmengen, beispielsweise von Sensoren, in Echtzeit und mit geringem Speicherbedarf zu speichern.

Das eigentliche Dashboard wurde schließlich mit dem Software-Tool Grafana realisiert. Dieses ist über einen Web-Browser erreichbar und ermöglicht die Darstellung der Live-Daten in verschiedenen Diagrammtypen. Ein Docker-Compose-File ermöglicht die Kommunikation zwischen den drei Containern und die eigentlichen Messdaten werden auf Volumes ausgelagert, um eine Persistenz der Daten sicherzustellen. Im Folgenden soll auf die Anbindung der verschiedenen in Kapitel 3 beschriebenen Datenquellen näher eingegangen werden. In Bild 3 ist der schematische Aufbau der Datenverarbeitungspipeline dargestellt.

Die Daten der Steuerung werden über eine OPC-UA-Schnittstelle mittels Telegraf an die Datenbank angebunden. Die einzelnen Steuerungsparameter werden dabei anhand ihres Identifiers abgerufen. Für die Identifikation relevanter Messgrößen im Kalandrierprozess wurde auf ein Informationsmodell der Batteriezellproduktion zurückgegriffen. Dieses Informationsmodell ist im Projekt „DataBatt“ des Forschungsclusters InZePro entstanden.

Dabei wurden über die gesamte Prozesskette der Batteriezellproduktion hinweg die Parameter identifiziert, die einen Einfluss auf die Produkt- oder Produktionsqualität haben, woraus eine Parameterliste resultierte. Die Parameter wurden durch die informationstechnische Modellierung miteinander in Zusammenhang gebracht, wodurch auch Korrelationen zwischen Parametern direkt ersichtlich werden. Das Ergebnis ist eine Ontologie, welche die Batteriezellproduktion ganzheitlich beschreibt. Basierend auf dieser Ontologie konnten die folgenden relevanten Parameter des Kalandrierprozesses identifiziert werden: die Zylinderpositionen und Zylinderkräfte des Kalandriers sowie die daraus berechnete Linienlast, die Bahnspannung, die Walzentemperatur und die Walzenpositionen.

Die drei Liniensensoren zur Erfassung der Elektrodenoberfläche sollen parallel ausgelesen werden. Dafür wurde ein eigenes Python-Programm entwickelt, da die Software LJX-Navigator von Keyence nur das Auslesen eines einzelnen Sensors unterstützt. Das Python-Programm greift über eine von Keyence bereitgestellte Python-API auf den Sensor zu. Die Daten werden mit einer Abtastrate von 100 Hz aufgenommen. Um eine parallele Aufnahme zu ermöglichen, wird das Auslesen der einzelnen Sensoren in Prozesse ausgelagert und diese miteinander synchronisiert.

Die Dickenmesswerte der Punktsensoren werden an die Steuerung des Kalandriers gesendet und von dieser über die beschriebene

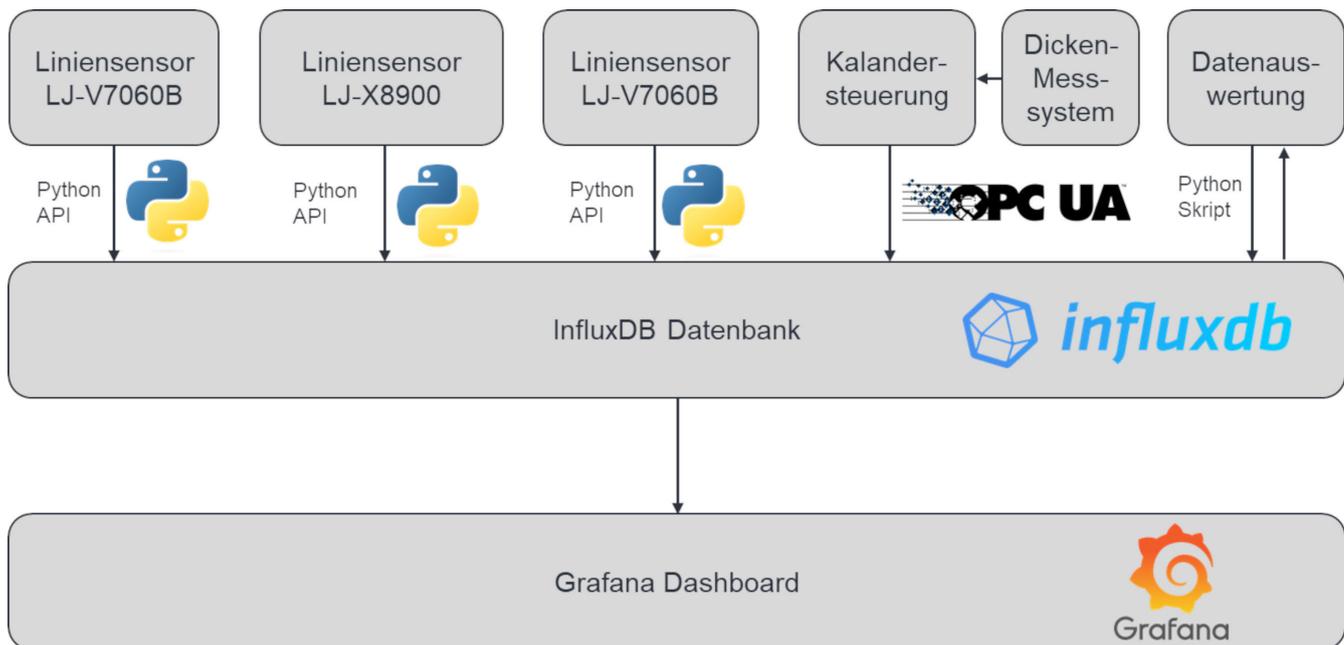


Bild 3. Aufbau der Datenverarbeitungspipeline. Grafik: wbk

ne OPC-UA Schnittstelle mittels Telegraf abgerufen. Die Daten werden in der Datenbank aufgrund einer Aufbewahrungsrichtlinie nur für eine kurze Dauer gespeichert. Für eine dauerhafte Speicherung müssen diese in csv-Dateien gespeichert werden. Eine Möglichkeit für die Historisierung von Daten bietet eine im Projekt DataBatt entwickelte Plattform. Hierbei bestehen mehrere Möglichkeiten zur Speicherung von Produktionsdaten. Zum einen können Daten über ein Data-Preprocessing-and-Mapping (DPPM)-Tool während des Betriebs einer Anlage in die Plattform gestreamt werden. Dabei können im DPPM-Tool während der Produktionszeit direkte Datenaggregationen vorgenommen werden. Zum anderen besteht die Möglichkeit eines Offline-Uploads von csv-Dateien in die Plattform.

Das eigentliche Grafana-Dashboard stellt die Informationen dem Anwender zur Verfügung. Der Aufbau des Dashboards ist in Bild 4 visualisiert.

Im Dashboard wird der zeitliche Verlauf der verschiedenen Messgrößen über die letzten drei Minuten dargestellt. Im linken Bereich des Dashboards sind die Messdaten der drei Lasertriangulationssensoren in Form einer Heatmap visualisiert. Rote Bereiche repräsentieren hohe Höhenwerte und grüne Bereiche niedrige Höhenwerte. Im rechten Bereich des Dashboards ist der Verlauf verschiedener Anlagenparameter des Kalenders dargestellt. Dabei sind insbesondere die einzelnen Zylinderkräfte und -positionen sowie die daraus berechnete Linienlast von Relevanz. Der Aufruf des Dashboards erfolgt über einen Webbrowser. Des Weiteren werden verschiedene Kenngrößen berechnet und dem Anwender ebenfalls zur Verfügung gestellt. Zum einen wird die in der nachfolgenden Formel dargestellte Elektrodenlänge und zum anderen die von Mayr *et al.* eingeführte Fehlerkennzahl zur Bewertung der Wellenbildung angezeigt.

$$\text{Relative Elektrodenlänge} [\%] = \frac{\text{Bogenlänge} - \text{Bezugslänge}}{\text{Bezugslänge}} * 100\%$$

Die relative Elektrodenlänge beschreibt die prozentuale Länge des welligen, beschichteten und verdichteten Bereichs der Batterieelektrode bezogen auf die zugehörige Länge des flachen, unbeschichteten und unverdichteten Ableiterbereichs der Batterieelektrode, die als Bezugslänge bezeichnet wird. Die Bogenlänge beschreibt dabei die Länge des Kurvenverlaufs der Wellen und Verwerfungen in Elektrodenlängsrichtung. Sie wird numerisch berechnet, indem die euklidische Distanz zwischen den betrachteten Messpunkten bestimmt und summiert wird. Zur Anzeige der relativen Elektrodenlänge im Dashboard wird diese gleitend berechnet bezogen auf eine Bezugslänge von 0,5 m.

3.3 Anwendung des Dashboards

Zur Anwendung des Dashboards wurden Versuche am Kalender durchgeführt. Dabei wurde eine 172 µm dicke NMC622-Kathode auf verschiedenen Zieldicken kalandriert. Die betrachteten Zieldicken der kalandrierten Elektrode sind 162 µm, 148 µm, 136 µm sowie 125 µm. Das Dashboard ist beispielhaft für eine Zieldicke von 125 µm in Bild 4 dargestellt.

Am Beispiel der Daten des Wellensensors erfolgt ein Vergleich für die verschiedenen Messdaten. Es lässt sich erkennen, dass mit steigendem Verdichtungsgrad die Wellenbildung in den beschichteten Bereichen der Elektrode zunimmt. Die Wellenbildung lässt sich im Dashboard erkennen, sodass der Bediener während des Prozesses eingreifen und beispielsweise die Linienlast verringern kann, um die Wellenbildung zu verringern. Hierfür wird dem Bediener die Linienlast im oberen rechten Bereich des Dashboards zur Verfügung gestellt, sodass diese überprüft und gegebenenfalls angepasst werden kann.

Des Weiteren kann anhand der im unteren rechten Bereich des Dashboards dargestellten Elektrodendicke überprüft werden, ob die geforderte Zieldicke mit der verwendeten Linienlast erreicht wird. Die in Kapitel 3.2 erläuterte relative Elektroden-

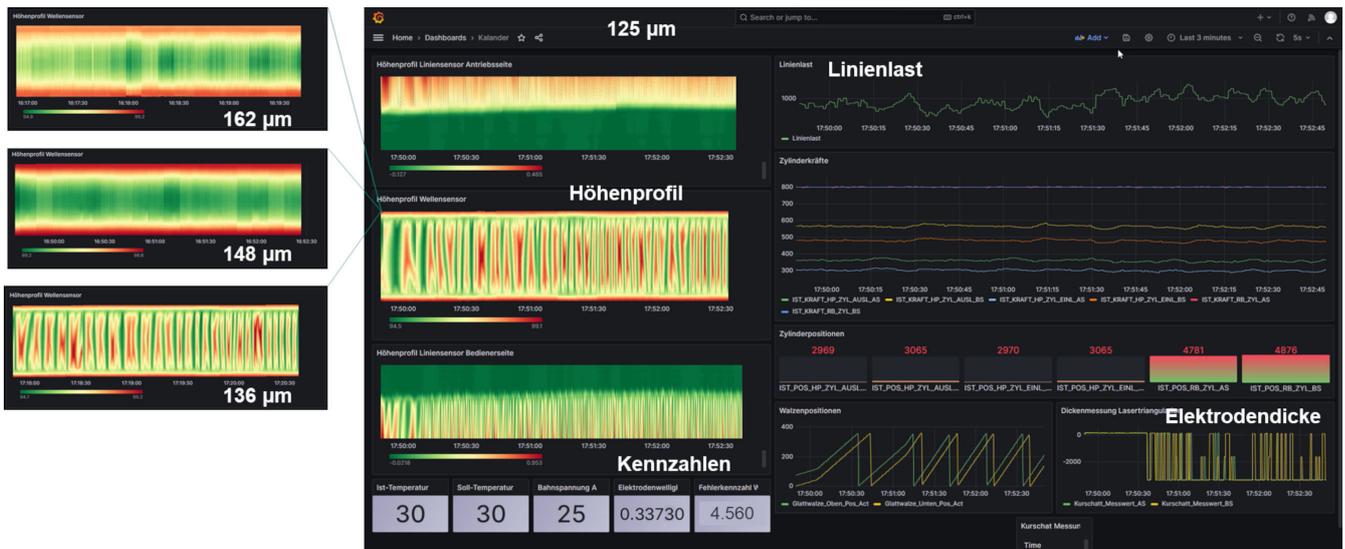


Bild 4. Aufbau des Dashboards und Vergleich für verschiedene Zieldicken. Grafik: wbk

länge und die Fehlerkennzahl werden automatisiert ermittelt und dem Anwender zur Verfügung gestellt werden. Diese Kennzahlen sind für den Anwender im unteren linken Bereich des Dashboards sichtbar. Anhand dieser Kennzahlen und der Sensordaten kann der Bediener sofort den Zustand des Kalandrierprozesses erfassen.

Durch dieses Dashboard kann insbesondere der Hochlauf mit neuen Materialien beim Kalandrieren beschleunigt werden. Die Auswirkung der Veränderung verschiedener Kalandrierparameter, wie etwa der Linienlast, wird sofort für den Anwender durch die Live-Auswertung der Messdaten im Dashboard sichtbar.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte erfolgreich ein Dashboard zur Live-Visualisierung von Anlagen- und Sensordaten implementiert werden. Dabei wurden verschiedene Datenquellen, zum Beispiel auch nachträglich integrierte Sensoren, ausgelesen. Es konnte gezeigt werden, dass eine Echtzeitanalyse der Messdaten mit der entwickelten Datenanalysepipeline möglich ist und dem Anlagenbediener Kennzahlen zur derzeitigen Produktqualität zur Verfügung gestellt werden können.

Die Analyse der Echtzeitdaten soll in der Zukunft erweitert werden, indem Kennzahlen zur Wrinkel- und Längsfaltenbildung wie Faltenlänge und Winkel zur Beschichtungskante, visualisiert werden. Ferner können die zentral erfassten Kennzahlen auch als Eingangssignal für die Steuerung eines bestehenden Anti-Wrinkle-Zusatzmoduls eingesetzt werden.

Im Sinne einer ganzheitlichen Digitalisierungsstrategie in der Batteriezellfertigung, kann das entwickelte Dashboard auch stärker in eine Datenpipeline für die gesamte Prozesskette integriert werden, die einen durchgängigen Datenfluss von der Feldebene bis zur Datenspeicherung in der Plattform ermöglicht. So können die Daten des Kalandrierprozesses direkt mit Daten von und nachgelagerter Prozessschritte in Zusammenhang gebracht werden.

DANKSAGUNG

Diese Untersuchungen entstanden im Rahmen der Projekte „InteKal – Intelligente Kalandrierung“ (FKZ 03XP0348C), „Data-Batt – Integration horizontaler Datenstrukturen in der Batterieproduktion“ (FKZ 03XP0323B) und „AutKaM – Automatisierte Prozessparameterfindung für das Kalandrieren von Elektroden mittels eines Zusatzmoduls für die Batteriezellfertigung“ (FKZ 03XP0526D), die durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert werden. Die Betreuung liegt beim Projektträger Jülich. Eingebettet sind die Vorhaben in dem Center for Electrochemical Energy Storage Ulm & Karlsruhe (CELEST) und im Batterietechnikum (BATEC) des KIT.

Literatur

- [1] Korthauer, R.: Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Heidelberg: Springer 2013
- [2] Bold, B.: In-Line Messung beim Kalandrieren von NMC 622 Kathoden zur Detektion von wrinkles und Dehnungen zur Erweiterung des Prozessverständnisses. Batterieforum Deutschland (2020), Berlin, 2020, Hrsg. Lithium-Ionen-Batterien (KLiB) e. V., S. 14
- [3] Wurba, A.-K.; Klemens, J.; Mayer, D. et al.: Methodology for the characterization and understanding of longitudinal wrinkling during calendaring of lithium-ion and sodium-ion battery electrodes. *Procedia CIRP* 120 (2023), pp. 314–319
- [4] Günther, T.; Schreiner, D.; Metkar, A. et al.: Classification of Calendaring-Induced Electrode Defects and Their Influence on Subsequent Processes of Lithium-Ion Battery Production. *Energy Technology* 8 (2019) 2, #1900026
- [5] Mayr, A.; Schreiner, D.; Stumper, B. et al.: In-line Sensor-based Process Control of the Calendaring Process for Lithium-Ion Batteries. *Procedia CIRP* 107 (2022), pp. 295–301
- [6] Kößler, F.; Hertweck, R.; Fleischer, J.: Wechselwirkungserfassung zwischen Walzenrundlauf und Elektroden Dicke. *wt Werkstattstechnik online* 113 (2023) 11–12, S. 469–474. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien



Simon Anderlik, M.Sc.

Foto: Autor

Florian Köbler, M.Sc. 

florian.koessler@kit.edu

Tel. +49 1523 9502657

Julia Sawodny, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer 

wbk – Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe
www.wbk.kit.edu

LIZENZ



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