

Überwachte Kraftverläufe geben Hinweise auf Beschädigungen bei der Schweißvorbereitung

Kraftverläufe in der Batteriewickelhandhabung

R. Lodwig, F. Böttinger

ZUSAMMENFASSUNG Bereits in der Herstellung sind Batteriezellen mechanischen Belastungen ausgesetzt. Im Zentrum für Digitalisierte Batteriezellenfertigung (ZDB) wurde für den Prozess des Wickelräumens, als Vorbereitung zum Verschweißen von Becher und Wickel, eine Untersuchung der tolerierbaren Kräfte durchgeführt und es wurden Grenzwerte für die Prozessierung innerhalb der Schweißanlage festgelegt. Die im Betrieb aufgenommenen Daten wurden automatisch ausgegeben und IT-Diensten und Visualisierungen zur Verfügung gestellt.

STICHWÖRTER

Automatisierung, Batteriefertigung, Digitalisierung

Force paths during jelly roll handling

ABSTRACT Battery cells are exposed to mechanical loads throughout the production process. The Centre for Digitised Battery Cell Manufacturing (ZDB) investigated the tolerable forces for the clearing process of the jelly roll as part of preparing the welding of can and jelly roll, including the definition of threshold values for this process. The data output recorded during operation was automatically forwarded and made available to IT services and visualizations.

1 Einleitung

Das Segment der Elektromobilität ist weltweit ein Wachstumsmarkt. Dabei machen batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge mit fast 70 % den Hauptanteil der jährlichen Neuzulassungen aus [1]. Das Kernelement jeder Batterie ist die Batteriezelle und bis zu 40 % der Wertschöpfung beim Elektroauto entfallen auf diese entscheidende Komponente [2]. Die Eigenschaften von Lithium-Ionen-Batterien hängen sowohl vom Zelldesign als auch von der Zellchemie ab [3]. Marktdominant sind aktuell auf Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) oder Nickel-Mangan-Cobaltoxid (NMC) basierende Zellen [4, 5]. Maßgeblicher Treiber des Wachstums ist China, wo sich die Elektromobilität in den letzten Jahren rasant entwickelt hat. Entsprechend werden dort die Produktionskapazitäten für Lithium-Ionen-Batterien massiv ausgebaut. Prognosen zufolge soll deren Anteil bis 2025 über 70 % der weltweiten Kapazitäten ausmachen [6]. Außerdem bauen asiatische Batteriehersteller zunehmend Produktionsstätten in Europa auf [7]. Trotz dieser Entwicklung stammen jedoch immer noch über die Hälfte der deutschen Importe an Lithium-Ionen-Batterien aus Asien [8].

Vor diesem Hintergrund werden einheimische Batteriezellenhersteller in puncto Souveränität in einer Schlüsseltechnologie automobiler Wertschöpfung als notwendig angesehen [9]. Die Entwicklung einer robusten und wettbewerbsfähigen Batteriezellenproduktion in Europa ist entscheidend, um die Innovationskraft der Automobilindustrie zu sichern und die Abhängigkeit von asiatischen Lieferanten zu verringern [10]. Die europäischen Hersteller stehen beim Aufbau und Betreiben der Produktion aber vor großen Herausforderungen. So gefährden beispielsweise Aus-

schussraten von über 20 % den wirtschaftlichen Erfolg und die Rentabilität der Fertigung erheblich [11]. Automatisierung und Digitalisierung bieten die Werkzeuge, um durch eine intelligente, vernetzte Produktion die Prozess- und Produktqualität zu verbessern sowie den Anteil an verwertbaren Zellen zu erhöhen [12].

2 Automatisierte Vorbereitung der Rundzellenwickel

Diesen Aspekten der Automatisierung und Digitalisierung widmet sich das „Zentrum für Digitalisierte Batteriezellenfertigung“ (ZDB) des Fraunhofer Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA). Es verfügt über Laboranlagen entlang der kompletten Wertschöpfungskette der Zellfertigung, vom Mischen der Elektrodenpasten bis zur Zellformierung [13]. Ein Bestandteil dieser Anlagen ist eine innovative Wickelmaschine zur Fertigung formatflexibler, zylindrischer Zellen [14].

Beim Wickelvorgang werden die Elektrodenbänder, ergo Anoden- und Kathodenband, und ein Separator mithilfe eines Wickeldorns so aufgewickelt, dass ein Wickel mit der Schichtreihenfolge Separator-Elektrode-Separator-Gegenelektrode entsteht [15, 16]. Formatflexibel bedeutet dabei, dass auf der Maschine Wickel mit unterschiedlicher Höhe und Durchmesser prozessiert werden können. Gängige Zellformate sind 18650 (eine Zelle mit 18 mm Durchmesser und 65 mm Höhe) und 21700, also eine Zelle mit 21 mm Durchmesser und 70 mm Höhe. Relativ neu sind Formate mit einem Durchmesser von 46 mm [17, 18]. Ebenso wie verschiedene Formate ermöglicht die Wickelmaschine die Herstellung von Wickeln mit unterschiedlichem Zelldesign [14]. Je nach

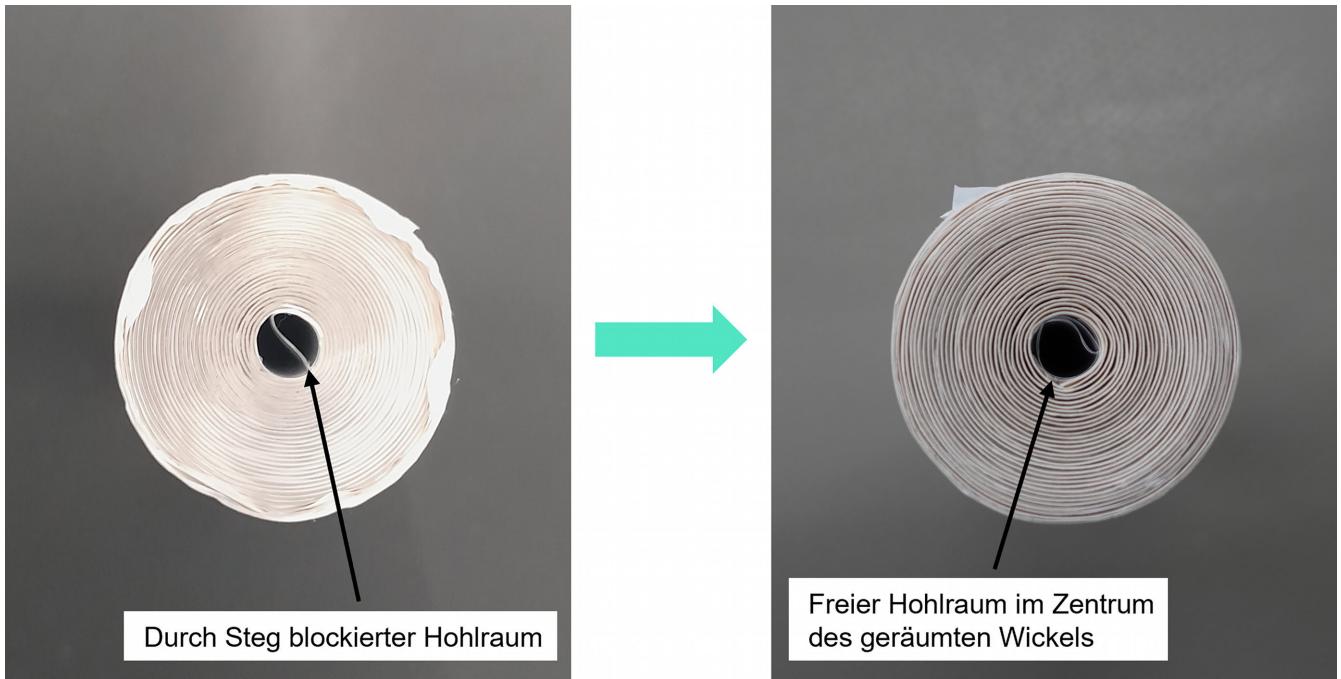


Bild 1. Links: Separatorwickel mit deutlichem Steg im Zentrum. Rechts: geräumter Wickel. Foto: Fraunhofer IPA

Zelldesign sind an dem fertigen Wickel Ableiter in Streifen- oder Plattenform angebracht. Sie dienen der Stromabfuhr und werden, ebenfalls abhängig vom Zelldesign, vor oder nach dem Wickelvorgang mit den Elektroden verbunden [17].

Nach der Produktion werden die Wickel in speziellen Trägern in das ZDB-Technikum zur weiteren Prozessierung überführt. Eine Besonderheit dieses Technikums ist die Ausführung als kombinierter Rein-/Trockenraum der ISO-Klasse 6 mit einem erreichbaren Taupunkt von -40°C [13]. Hierdurch wird gewährleistet, dass die Zellassembly in einer kontrollierten Umgebung und somit weitgehend frei von externen Umwelteinflüssen durchgeführt werden kann.

2.1 Der Prozessschritt des Wickelräumens

Um den Elektrodenwickel einer Rundzelle in dem Gehäuse, auch Becher genannt, zu fixieren und eine elektrisch leitende Verbindung zu schaffen, wird der Wickel mit dem Becher per Widerstandsschweißen verbunden. Durch das Wickeln der Rundzelle um einen Wickeldorn entsteht in der Mitte ein Hohlraum, in den beim Verschweißen von Wickel und Becher eine Elektrode des Widerstandsschweißgeräts eingeführt wird [5, 15]. Je nach Zelldesign gibt es Batterien, bei denen der Wickeldorn hohl ausgeführt ist und im Zentrum des Wickels dauerhaft eingearbeitet ist [15, 19]. Ist dies nicht der Fall, kann beim Prozess des Wickelns ein Teil des Separatormaterials, im Folgenden Separatormaterial oder Steg genannt, innerhalb des Durchgangs verbleiben, sodass dieser blockiert wird. Daher muss dieser Steg vor dem eigentlichen Fügeprozess in seiner Position verändert werden, sodass die Schweißelektrode kollisionsfrei eingeführt werden kann. Der Hohlraum muss demnach geräumt werden. In Bild 1 ist links ein Testwickel, lediglich bestehend aus Separatormaterial und ohne Aktivmaterialien, abgebildet, der Steg in der Mitte des Hohlraums ist gut zu erkennen. Rechts ist das Ergebnis nach dem Räumprozess zu sehen.

In Produktionslinien, die auf einen Zelltyp ausgerichtet sind, ist das Entfernen des Steges häufig bereits in den Prozess des Wickelpulens oder des Ausstoßens des Wickels aus der jeweiligen Maschine integriert. Bei Versuchsanlagen, wie jene am ZDB, kann hingegen ein Prozessschritt „Wickelräumen“ notwendig sein. Hierzu wird der Wickel koaxial auf einen starren, an der Spitze abgeschrägten Dorn gesetzt und mit einer Kombination aus einer Abwärts- und einer alternierenden Drehbewegung über diesen Dorn gestülpt und anschließend leicht exzentrisch um die Hochachse gedreht, sodass der Steg zur Seite geschoben wird. Dabei kann es aufgrund falscher oder zu hoher mechanischer Belastung zu Beschädigungen oder im Extremfall zur Destruktion des Wickels kommen. Abhängig von der Zellchemie besteht bei einer mechanischen Zerstörung des Wickels mit Freisetzung von Aktivmaterial, neben den Einbußen an Guteilen, auch die Gefahr des Austritts gefährlicher Stoffe wie gesundheitsgefährdenden NMC-Partikeln [20]. Der Räumvorgang sowie das nachgelagerte Widerstandsschweißen werden in Bild 2 schematisch dargestellt.

Die Handhabung der Wickel übernimmt ein 6-Achs-Knickarmroboter. Dadurch wird zum einen eine hohe Konstanz in den Bewegungsabläufen sichergestellt und zum anderen kann automatisiert auf Unregelmäßigkeiten reagiert werden. Um den aus den Räumlichkeiten des ZDB-Technikums resultierenden Anforderungen an die Ausrüstung gerecht zu werden, ist der Roboter reinraumtauglich ausgeführt.

2.2 Kraft- und Momentenverläufe beim Räumprozess

Um Kenntnis über die Belastungsfälle zu erlangen und den Prozessschritt transparenter betrachten zu können, ist die Prozessstation „Wickelräumen“ am ZDB mit Sensorik zur Kraft- und Momentenerfassung ausgestattet. Damit können die auftretenden Kräfte und Momente beim Prozessschritt „Wickelräumen“ detektiert und aufgenommen werden. Es können Referenzkennlinien für Gut- und Schadteile daraus ermittelt werden, deren Verläufe

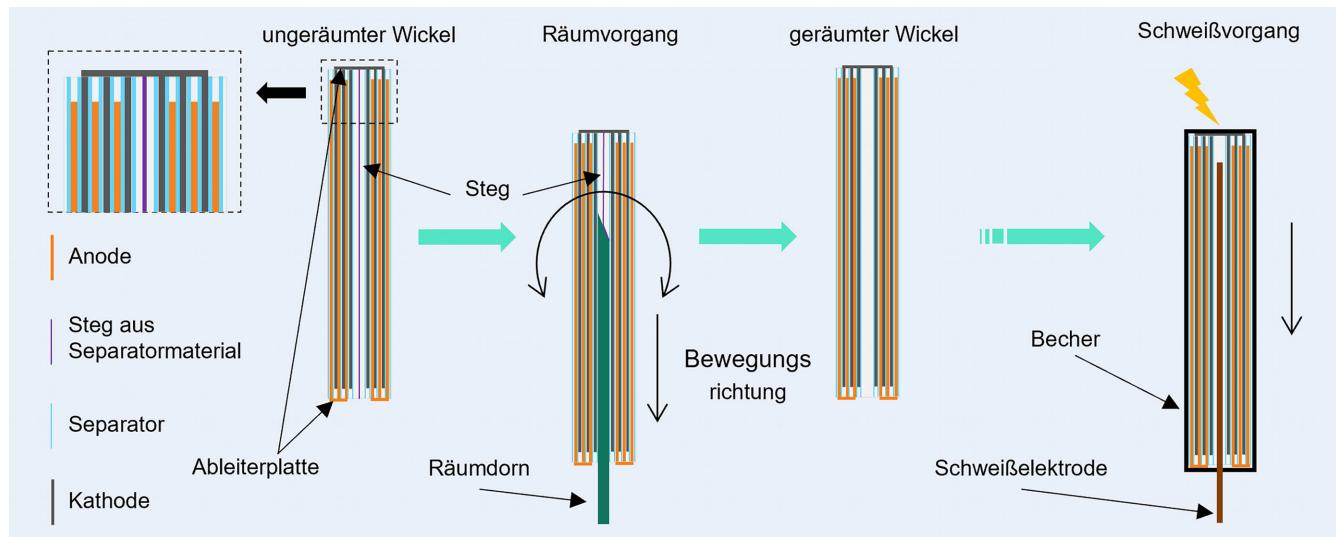


Bild 2. Schematische Darstellung des Räumvorgangs und des Widerstandschweißens. Grafik: Fraunhofer IPA

man auf typische Muster, wie etwa Sprünge, untersuchen kann. Diese Daten werden in der Anlagensteuerung verarbeitet und können zur Steuerung des Roboters genutzt werden. Bild 3 zeigt den Sensor mit montiertem Räumdorn. Damit die Anlage flexibel in Bezug auf das verarbeitete Zellformat genutzt werden kann, ist der Dorn austauschbar. Bei den hier untersuchten 21700-Zellen beträgt sein Durchmesser 3 mm.

Ziel war es, mit diesem Aufbau Versuche durchzuführen, um Grenzwerte zu identifizieren, nach denen beurteilt werden kann, ob der Räumprozess erfolgreich war. Um eine Kontamination der Anlage und die dadurch resultierende Gefährdung durch NCM-Partikel zu verringern, wurde ein Großteil der Versuche mit dem in Bild 1 gezeigten Separatorwickel ausgeführt. Für die Durchführung wurden die Wickel geräumt und die dabei auftretenden Kraft- und Momentenwerte mit einer Auflösung von 10 ms aufgenommen. Der Räumprozess wurde als erfolgreich angesehen, wenn der Räumdorn den Wickel vollständig durchdrungen hatte und der Separator sichtbar zur Seite verschoben wurde, wie auf der rechten Seite in Bild 1 gezeigt. Als nicht erfolgreich geräumt wurden Wickel bewertet, bei denen der Separator den Räumdorn am Durchdringen hinderte sowie jene Wickel, die während des Vorgangs zerstört wurden. Dabei versagten die Wickel, indem sich die einzelnen Lagen gegeneinander verschoben und konisch nach oben aus dem Wickel austraten. Ein solches Versagen eines Separatorwickels ist in Bild 4 zu sehen. Die eingesetzten Wickel unterschieden sich nicht in ihrem Aufbau, waren also baugleich.

Bei anschließenden Durchläufen mit realen, also mit Aktivmaterial versehenen Wickeln zeigte der Vergleich der Verläufe der aufgenommenen Linien eine gute Übertragbarkeit der Ergebnisse. Durch die realitätsnahen Versuche mit Separatorwickeln konnten Verläufe der Kraft- und Momentenlinien bei erfolgreichen und nicht erfolgreichen Räumprozessen aufgenommen und verglichen werden. Außerdem war zu beobachten, dass ein Versagen des Wickels ausschließlich beim Auffädeln auf den Räumdorn, nicht jedoch während des exzentrischen Drehens, auftrat. Insgesamt konnten 87 % der prozessierten Wickel erfolgreich geräumt werden. Die Kraftverläufe eines realen Wickels, der auf dieselbe Weise, wie in Bild 4 dargestellt, versagte, sind in Bild 5 zu sehen.

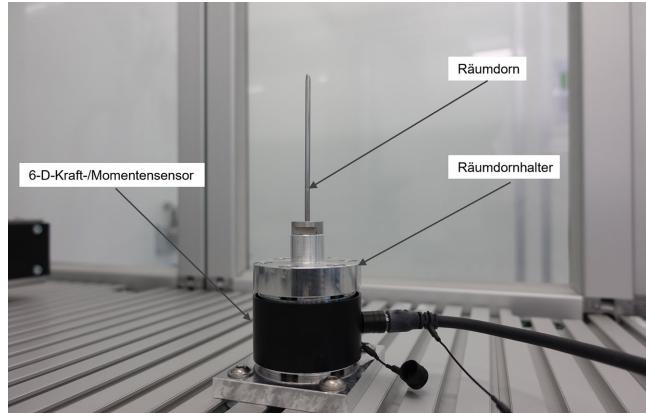


Bild 3. Sensor mit montiertem Räumdorn. Foto: Fraunhofer IPA

Das Schadbild des in Bild 4 gezeigten Wickels lässt vermuten, dass die Belastung in z-Richtung verantwortlich für das Versagen des Wickels ist. Dies wird durch die Verläufe in Bild 5 bestätigt. Der Betrag der Kraft in z-Richtung (blau), welcher in der Spitze einen Wert von circa 30 Newton erreicht, zeigt bereits deutliche Ausschläge, während die Kräfte in x und y-Richtung nur geringe Werte aufweisen. Allerdings markiert nicht der Maximalwert, sondern bereits der erste Ausschlag mit einem Betrag von circa 5 Newton das Beschädigen des Wickels. Hier knickt beziehungsweise knüllt der Separatorsteg initial und bildet eine Sperre gegenüber dem Räumdorn. Im Vergleich dazu sind in Bild 6 exemplarisch die normierten Werte der beim Räumprozess auftretenden Kraft in z-Richtung von fünf erfolgreich geräumten, baugleichen Wickeln nummeriert dargestellt.

Die Verläufe #2 bis #5 zeigen die Daten zufällig ausgewählter Wickel, hingegen Verlauf #1 die betragsmäßig höchsten gemessenen Werte eines erfolgreichen Räumprozesses. Es ist erkennbar, dass der Betrag der Kraft einen Wert von 1,65 Newton nicht überschreitet. Der Grenzwert zur Auslösung von Maschinenreaktionen wurde mit Blick auf einen Puffer in Bezug auf Verlauf #1 auf 2,5 Newton als tolerierbare Kraft festgelegt. Dieser Puffer beträgt circa 25 % der Differenz zwischen dem Wert des Verlaufs #1 aus Bild 6 und den 5 Newton, die in Bild 5 eine Beschädigung des Wickels anzeigen. Zur Verdeutlichung zeigt

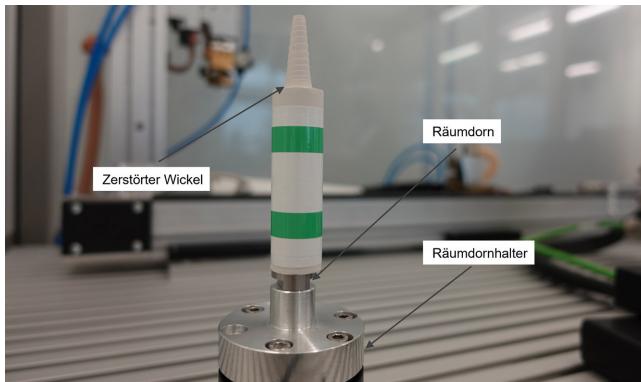


Bild 4. Zerstörter Separatorwickel mit konischem Austritt der Wickellagen.
Foto: Fraunhofer IPA

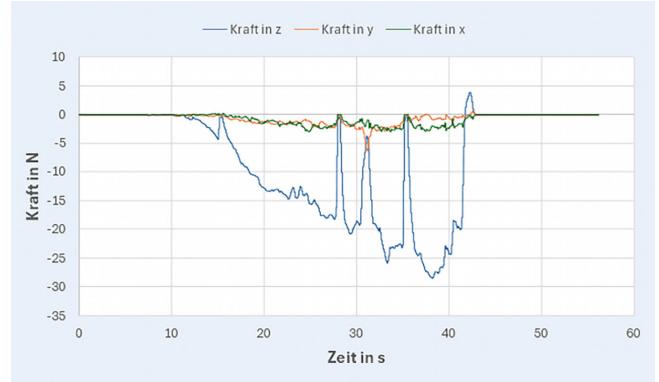


Bild 5. Normierte Kraftverläufe eines zerstörten Wickels.
Grafik: Fraunhofer IPA

Bild 7 den Verlauf der Kraft in z-Richtung des zerstörten Wickels aus Bild 5 bis zum ersten Sprung und den Verlauf #1 aus Bild 6 sowie den gewählten Grenzwert im direkten Vergleich.

3 Datenerhebung und Präsentation

Die Steuerung der Anlage erfolgte mittels einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) der Firma Beckhoff, die für die Automatisierung von Prozessen in industriellen Anwendungen weite Verbreitung findet. Verwendet wurde die Ausführung als Panel-PC CP62xx und Betriebssystem Windows 10, als Automatisierungssoftware war TwinCat 3 im Einsatz. Diese SPS ermöglichte nicht nur die Steuerung der Anlagenteile, sondern war auch für die hochfrequente Erfassung und Überwachung der gemessenen Werte des Kraft- und Momentensensors verantwortlich. Die Analyse der Experimente sowie die Visualisierung der Datenreihen erfolgte dagegen nicht in der SPS selbst, sondern in anderen IT-Systemen in der ZDB-IT-Landschaft.

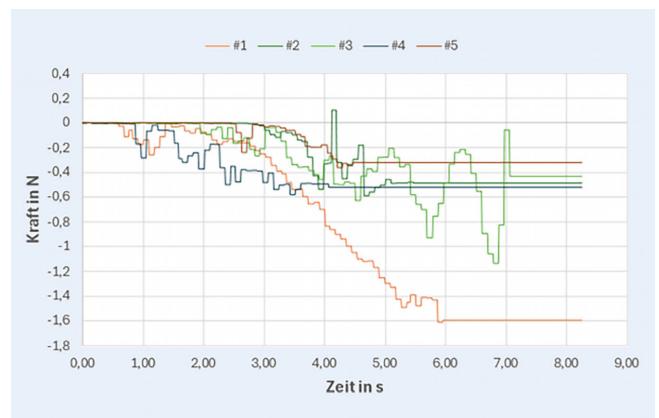


Bild 6. Normierte Verläufe der Kraft in z-Richtung bei erfolgreich geräumten Wickeln. Grafik: Fraunhofer IPA

3.1 Datentransfer

Um eine nahtlose Kommunikation zwischen der Anlage und den anderen Systemen zu gewährleisten, wurde ein am IPA entwickelter Maschinenkonnektor erweitert und implementiert.

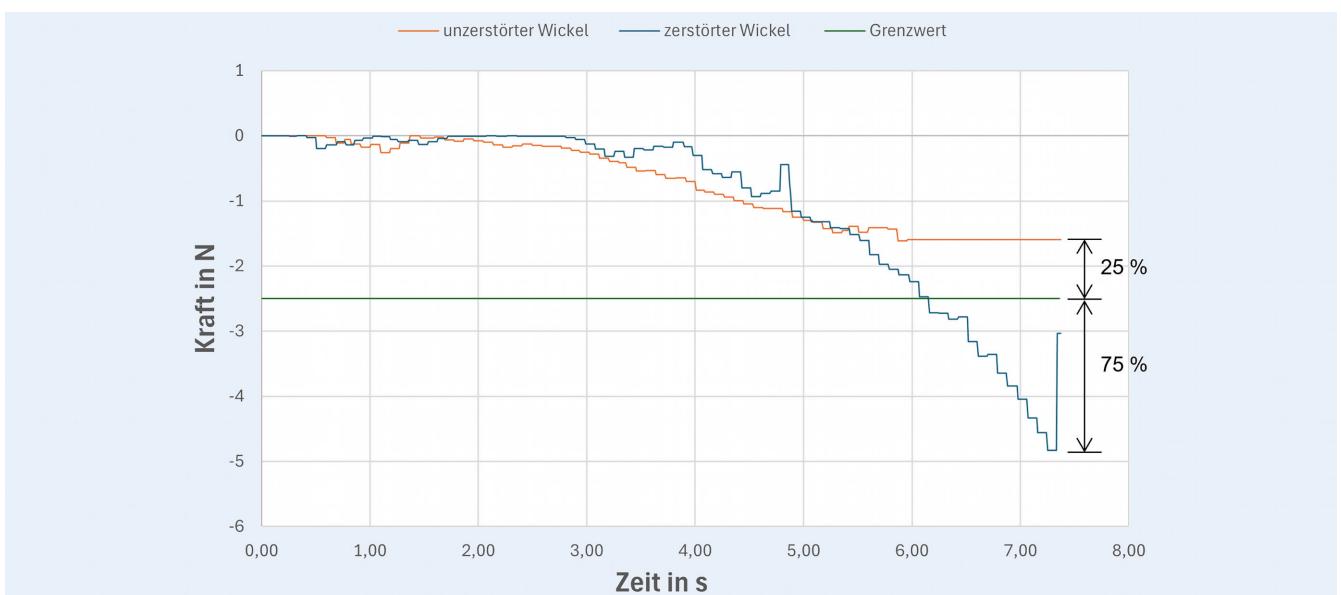


Bild 7. Kraftverläufe in z-Richtung eines zerstören und eines unzerstörten Wickels. Grafik: Fraunhofer IPA

Dieser Konnektor ist in der Lage, die Daten der SPS über eine auf OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) basierende Kommunikation für andere Systeme bereitzustellen.

In diesem Kontext kamen im ZDB erstmals relevante Teile der standardisierten Informationsmodelle, welche in den OPC UA Companion Specifications der Reihe OPC UA for Machinery (OPC 40001/ VDMA 40001) [21] zu finden sind, zum Einsatz. Beispiele hierfür sind die Machinery Basic Building Blocks, wie der MachineIdentificationType und der MachineryComponentIdentificationType. Diese Modelle ermöglichen eine standardisierte und eindeutige Identifikation der Maschine sowie der eingesetzten Komponenten, wodurch die Interoperabilität und Integration in verschiedene Systeme erheblich verbessert werden kann. Die Bereitstellung der Daten erfolgt über die in OPC 40001-2 definierten ProcessValuesTypes-Datentypen, die in ebenfalls einheitlich strukturierten Ordner- und Objektstrukturen organisiert sind. Diese standardisierte Struktur erleichtert den Zugriff auf die benötigten Daten und reduziert den Integrationsaufwand erheblich.

Durch die Nutzung dieser Standards war das Auffinden und Auslesen der erforderlichen Daten für die Erstellung geeigneter Visualisierungen und Dashboards mit deutlich reduziertem Aufwand möglich. Dies führte zu einer schnelleren und effektiveren Analyse der Experimentergebnisse. Da zudem eine sukzessive Anpassung der Anlagen im ZDB an diese Standards geplant ist, wird die Entwicklung und Nutzung der Analyse- und Visualisierungssysteme in Zukunft signifikant effizienter umsetzbar sein.

3.2 Visualisierung auf einem Statusdashboard

Die Hauptaufgaben einer Visualisierung bestehen darin, den Betrachter zu informieren und ihm die nötigen Informationen klar und verständlich zu präsentieren [22]. Sie befähigt den Nutzer, angemessen mit einem System zu interagieren, indem sie möglichst intuitive, visuelle Informationen bereitstellt. Sie bildet eine Grundlage für Analysen, indem komplexe Daten anschaulich dargestellt werden [22, 23].

Die Visualisierung des ZDB-Technikums erfolgt in Form eines auf „Grafana“ basierenden Dashboards, das relevante Daten auf mehreren Ebenen darstellt. Beginnend mit der Übersicht der gesamten Prozesskette und dem Anzeigen der Umgebungsparameter können die einzelnen Prozesse detailliert aufgerufen werden bis hin zu Einzelwerten, wie den aufgenommenen Kraftverläufen eines individuellen Räumvorgangs. Die angezeigten Daten werden durch eine InfluxDB-Datenbank bereitgestellt und erlauben sowohl die Ansicht und die Überwachung des aktuellen Zustands als auch die Darstellung vergangener Situationen. Durch die strukturierte Anzeige der relevanten Daten können verschiedene Ereignisse in Zusammenhang gebracht werden und so eventuelle Fehlerketten und Abhängigkeiten herausgearbeitet werden.

4 Fazit und Ausblick

Insgesamt verschafft die Aufnahme der Kraft- und Momentendaten einen Überblick, welchen mechanischen Belastungen die Batteriezelle bereits in der Produktion ausgesetzt wurde. Die Ermittlung und Bereitstellung dieser Daten ist Voraussetzung für Überlegungen, ob solche Informationen für die Erstellung eines Batteriepasses notwendig sind und dort hinterlegt werden müssen [24]. Ebenso wird eine Möglichkeit geschaffen, die Historie der

einzelnen Zellen aufzunehmen und zuzuordnen, um somit eine Verfeinerung des digitalen Zwillingss der jeweiligen Zelle zu erreichen.

In der direkten Umsetzung helfen die Ergebnisse, eine zulässige Höchstkraft beim Wickelräumen zu definieren. Um beim Räumprozess eine gleichbleibende Ausrichtung des Separatorstegs gegenüber dem Räumdorn zu gewährleisten, wird die Performance kameragestützter Messsysteme untersucht, welche die Position der Wickelstege detektieren und weiterleiten. So werden zum einen die Informationen über die Lage des Steges dokumentiert und zum anderen kann dessen Orientierung automatisiert angepasst werden. Die Integration in das Technikum ist bereits angelaufen. Des Weiteren geben die Kraftwerte eine Leitlinie für weitere Prozesse innerhalb der Versuchsanlagen, insbesondere für das Durchführen der Schweißelektrode durch den Wickel.

L iteratur

- [1] Verband der Automobilindustrie e.V.: Die Elektromobilität weltweit auf dem Vormarsch. 14,5 Millionen E-Autos weltweit abgesetzt. Deutschland hinter China und den USA drittgrößter Elektro-Pkw-Markt weltweit. Internet: www.vda.de/de/themen/elektromobilität/marktentwicklung-europa-international. Zugriff am 06.03.2025
- [2] Kagermann, H.: Geleitwort. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Heidelberg: Springer-Verlag 2013, S. V-VI
- [3] Kampker, A.: Die Produktion des Hochvolt-Speichersystems. In: Kampker, A. (Hrsg.): Elektromobilproduktion. Heidelberg: Springer-Verlag 2014, S. 43-113
- [4] Kurzweil, P.; Dietlmeier, O. K. (Hrsg.): Elektrochemische Speicher. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2015
- [5] Börner, M. F.: Ein prozessbasiertes Modell zur Berechnung der Kosten von Lithium-Ionen-Batteriezellen. Dissertation, RWTH Aachen, 2024
- [6] Frieske, B.; Stieler, S.: Themenpapier Cluster Elektromobilität Süd-West: Die Produktionskette „Batteriesystem“ und kritische Ressourcen. Stuttgart. Stand: 2022. Internet: www.transformationswissen-bw.de/fileadmin/media/Publikationen/e-mobil_Studien/Themenpapier_Cluster_ESW_Produktionskette_Batteriesystem_und_kritische_Ressourcen.pdf. Zugriff am 06.03.2025
- [7] Thielmann, A.; Wietschel, M.; Funke, S. e. a.: Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf. Sind Batterien für Elektroautos der Schlüssel für eine nachhaltige Mobilität der Zukunft? Karlsruhe: Fraunhofer ISI 2020
- [8] ZVEI e.V.: Steigender Import von Batterien: Lithium-Ionen-Zellen und -Batterien dominieren. Stand: 2023. Internet: www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2023/Mai/Faktenblatt_Import/Faktenblatt_Import_End.pdf. Zugriff am 07.03.2025
- [9] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hrsg.): Batteriezellförderung – ein Beispiel erfolgreich transformativer Industriepolitik. Stand: 2022. Internet: www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/batteriezellförderung.pdf?__blob=publicationFile&v=1. Zugriff am 07.03.2025
- [10] VDE (Hrsg.):-Positionspapier: Batteriezellfertigung für die Elektromobilität in Deutschland. Frankfurt am Main: VDE e.V. 2019
- [11] Dahmen, C.; Degen, F.; Eckstein, M. C. et al.: Whitepaper: Mastering Ramp-up of Battery Production. Stand: 2024. Internet: www.fraunhofer.de/content/dam/ipt/forschungsfertigung-batteriezelle/Bilder/pressemedien/whitepaper-ramp-up/Whitepaper_Mastering%20Ramp-up%20of%20Battery%20Production.pdf. Zugriff am 06.03.2025
- [12] Michaelis, S.; Schütrumpf, J.; Kampker, A. et al.: Batterie-Produktionsmittel Roadmap 2030. Update 2023. Frankfurt am Main: VDMA-Verlag 2023
- [13] Ludwig, R.; Schulz, F.: Datenerhebung in der Batteriezellenproduktion. wt Werkstattstechnik online 113 (2023) 3, S. 81–86. Internet: www.werkstatttechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
- [14] acp systems AG: Innovative Wickelmaschine für zylindrische Batteriezellen. Internet: batterie-produktion.de/batterieproduktion/innovative-wickelmaschine-fuer-zylindrische-batteriezellen/. Zugriff am 06.03.2025
- [15] PEM der RWTH Aachen; VDMA (Hrsg.): Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batteriezelle. Frankfurt am Main: Eigendruck PEM der RWTH Aachen & VDMA 2023

- [16] Pettinger, K.-H.: Fertigungsprozesse von Lithium-Ionen-Zellen. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Heidelberg: Springer-Verlag 2013, S. 221–235
- [17] Baazouzi, S.; Feistel, N.; Wanner, J. et al.: Design, Properties, and Manufacturing of Cylindrical Li-Ion Battery Cells—A Generic Overview. *Batteries* 9 (2023) 6, p. 309
- [18] Wöhrle, T.: Lithium-Ionen-Zelle. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Heidelberg: Springer-Verlag 2013, S. 107–117
- [19] Carter, R.; Klein, E. J.; Atkinson, R. W. et al.: Mechanical collapse as primary degradation mode in mandrel-free 18650 Li-ion cells operated at 0 °C. *Journal of Power Sources* 437 (2019), #226820
- [20] Sigma-Aldrich: Safety Data Sheet. Lithium nickel manganese cobalt oxide, electrode sheet, aluminium substrate. Steinheim: Sigma Aldrich 2018
- [21] VDMA 4001-2: OPC UA for Machinery - Part 2: Process Values. Stand: 2023. Internet: attachments.vdma.org/attachments/Fqv4xdiemRfhRsU5Fjug. Zugriff am 07.03.2025
- [22] Rietdorf, C.; Torolsan, K.; Favier, M. et al.: Leveraging Digital Twins for Real-Time Environmental Monitoring in Battery Manufacturing. *Procedia CIRP* 130 (2024), pp. 749–754
- [23] Anderlik, S.; Kößler, F.; Sawodny, J. et al.: Dashboards in der Batteriezellfertigung. *wt Werkstattstechnik online* 114 (2024) 7/8, S. 439–444. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
- [24] Öttinger, M. (Hrsg.): Die EU- Batterieverordnung. Neue Pflichten für Akteure der Batteriewirtschaft. Berlin: Beuth Verlag 2023



Dipl. Ing. Ragnar Lodwig 

ragnar.lodwig@ipa.fraunhofer.de

Tel. +49 711 / 970-1390

Foto: Autor

Dipl. Inf. FH Fabian Böttiger, MBE

Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de



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