

maschinenbau

Die Deutschland-Ausgabe des Schweizer Industriemagazins

3 | 2022

Konstruktion + Simulation

Wissenstransfer für die
intelligente Fabrik Seite 24

Fertigung + Produktion

Blech effizient von der
Rolle bearbeiten Seite 40

Schweißen + Schneiden

Kunststoff flexibel
schweißen Seite 44

Industrie 4.0

Fertigung schneller und flexibler gestalten



Rückverfolgbarkeit und Digitalisierung in der Batteriezellfertigung

Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Gesellschaft ist die Verfügbarkeit von Energiespeichern, vor allem Batterien, ein wichtiger Schritt. Durch Industrie 4.0 ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten, die Batterieproduktion effizient und nachhaltig zu gestalten. Eine zentrale Herausforderung liegt hierbei in der Produktnachverfolgung entlang der Wertschöpfungskette, die aus kontinuierlichen, batchweisen sowie diskreten Prozessen besteht. Dieser Beitrag gibt Einblicke in den digitalen Zwilling in der Batteriezellfertigung und welche Ansätze der Rückverfolgbarkeit bestehen.

Die weltweite Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batteriezellen wird in den nächsten Jahren von 200 GWh pro Jahr auf 1,5 bis 3 TWh im Jahr 2030 steigen [1]. Ein Grund dafür ist der wachsende Bedarf an Batteriezellen in der Automobilindustrie. Es wird erwartet, dass der Wandel hin zur Elektromobilität im Jahr 2030 für 80 % des gesamten Batteriebedarfs verantwortlich sein wird [2]. Dabei wachsen auch die Anforderungen an die Batteriezellen bezüglich Leistung und Sicherheit. Gleichzeitig soll der komplexe Produktionsprozess von Batteriezellen hinsichtlich Kosten optimiert werden.

Grundsätzlich lässt sich die Fertigung von Batteriezellen in drei Abschnitte unterteilen: Elektrodenfertigung, Assemblierung und Formierung, *Bild 1*. Die Elektrodenfertigung stellt den kritischen Faktor der Zellfertigung dar, da die dort hergestellten Anoden und Kathoden entscheidend für die letztendliche Zellqualität und -kapazität sind [3].

Für die hohen Anforderungen der Endanwender bei möglichst kosteneffizienter Auslegung der Produktion birgt die Digitalisierung und Vernetzung der Batteriezellfertigung enorme Optimierungspotenziale. Datengetriebene Prozesse können dabei die Produktion nachhaltiger und

qualitätsoptimiert gestalten, zum Beispiel durch die Prozesssteuerung zur Ausschussminimierung und die Vorhersage der Zellqualität basierend auf Zwischenprodukten [4]. Zur Aggregation der dafür notwendigen Daten in der Batteriezellfertigung kann ein digitaler Zwilling als Basis dienen.

Der digitale Zwilling stellt die digitale Repräsentation eines spezifischen Gegenstands dar. Er beinhaltet die „Eigenschaften, Zustände und das Verhalten des Gegenstands über Daten, Modelle und Informationen“ über den gesamten Lebenszyklus hinweg [5]. In der Batteriezellfertigung lassen sich grundsätzlich drei verschiedene Ausprägungsformen von Objekten mit digitalen Zwillingen abbilden, die konkrete Mehrwerte für die Batteriezellfertigung ermöglichen, *Bild 2*. Dabei bildet der Anlagenzwilling produktionsrelevante Anlagen ab. Der Gebäudezwilling umfasst alle für den Aufbau und Betrieb des Gebäudes notwendigen Bestandteile und Informationen, während der Produktzwilling Informationen, Qualitätsdaten und weitere Merkmale zu Rohstoffen und relevanten Zwischen- und Endprodukten beinhaltet. Das Zusammenspiel der einzelnen Zwillinge stellt den digitalen Zwilling der Batteriezellfertigung dar [6].

Rückverfolgbarkeit als Schlüssel und zentrale Herausforderung

Sowohl für die physische Produktion als auch für deren digitale Spiegelung ist die produktbezogene Rückverfolgbarkeit (Traceability) eine notwendige Voraussetzung. Ein Traceability-Konzept ermöglicht die Rückverfolgbarkeit von einer fertigen Zelle entlang ihrer Produktionskette bis zurück auf ihre Bestandteile, also die Ausgangsmaterialien und deren Eigenschaften. Über ein Traceability-Konzept lassen sich Parameter jedes Prozessschritts auf die einzelnen Zellen beziehen. Diese gesamte Zellfertigung ist hochkomplex, da alle Prozessschritte eng miteinander verzahnt sind und sich gegenseitig beeinflussen. Beispielsweise haben die Prozessparameter des ersten Fertigungsschritts des Mischens eine enorme Auswirkung auf die weitere Verarbeitbarkeit und die Güte (Langlebigkeit, Schnellladefähigkeit) der finalen Zellen. Um komplexe Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen Materialeigenschaften, Prozessparametern und den Zwischen- sowie dem Endprodukt entlang der Prozesskette zu ermitteln, sind Traceability-Systeme erforderlich. Die Erkenntnisse, die mithilfe solcher Systeme gewonnen werden, ermöglichen eine gezielte und



Bild 1 > Aufbau der Batteriezellfertigung (nach [3]) © Fraunhofer FFB

effiziente Prozessoptimierung und führen damit zur signifikanten Verbesserung der Qualität des Endprodukts. Des Weiteren gewährleisten sie eine definierte und dokumentierte Zellqualität sowie Produkttransparenz dem Kunden und Endanwender gegenüber. Relevante Parameter können beispielsweise in Form eines sogenannten Battery Passport, einer Art Ausweis für Batterien, erfasst werden. Dieser ermöglicht eine Einordnung hinsichtlich des CO₂-Fußabdrucks und die Gestaltung einer zirkulären und nachhaltigen Wertschöpfungskette [7]. Die Rückverfolgung ist jedoch nicht trivial, da die Zellkomponenten (vor allem die Elektroden) sich während der Produktion in Probenoberfläche (Kalandrieren) und Form (Slitten) ändern und verschiedensten Bedingungen ausgesetzt werden, zum Beispiel hohen Temperaturen und mit Lösemittel gesättigter Umgebungsluft, Vakuum sowie mechanischer Beanspruchung. All diese Aspekte müssten in Bezug auf die Konzeptionierung eines Traceability-Systems berücksichtigt werden. Weitere Herausforderungen für die Realisierung von Traceability-Systemen liegen im Bereich aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. So müssen diese Systeme etwa auf Optimierungen innerhalb der Prozesskette (vor allem die Maximierung der Prozessgeschwindigkeit) sowie

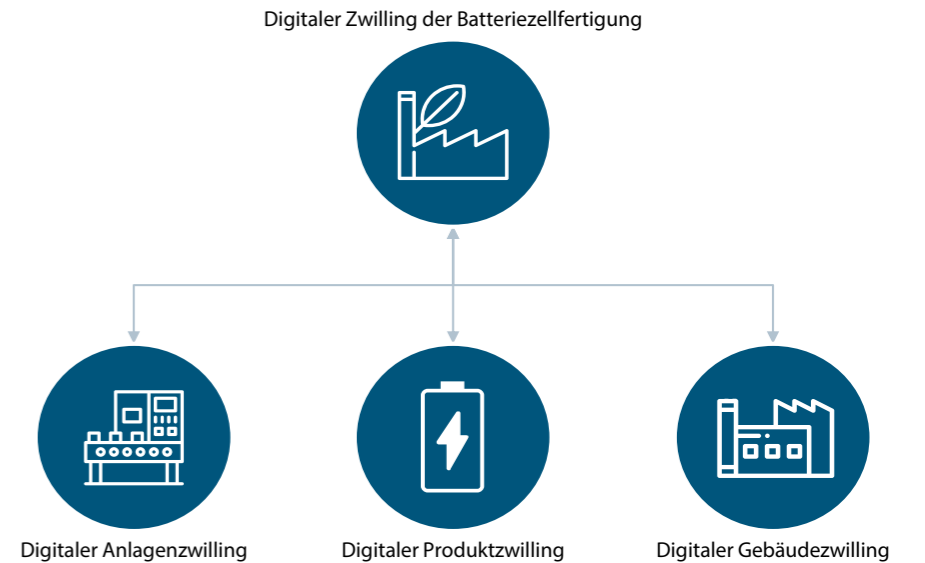


Bild 2 > Der digitale Zwilling der Batteriezellfertigung besteht aus drei Ausprägungsformen digitaler Zwillinge © Fraunhofer FFB

innovative Prozessschritte oder neuartige, noch nicht antizipierbare Materialien, die zukünftig innerhalb der Prozesskette genutzt werden, anwendbar sein.

Kernelemente für erfolgreiche Rückverfolgbarkeit

Voraussetzung für eine zellgenaue Nachvollziehbarkeit über den Produktionspro-

zess hinweg ist vor allem für den digitalen Produktzwilling ein Traceability-Konzept. Es lassen sich für ein solches Konzept vier Kernelemente ableiten [8]: Kennzeichnungsmethode, Datenerfassung und -aufzeichnung, Datenverknüpfung sowie Kommunikation.

Aufbauend auf Kennzeichnungsmethoden wie QR-Codes werden durch Sensorik relevante Prozess- und Qualitätsdatenerfassung und

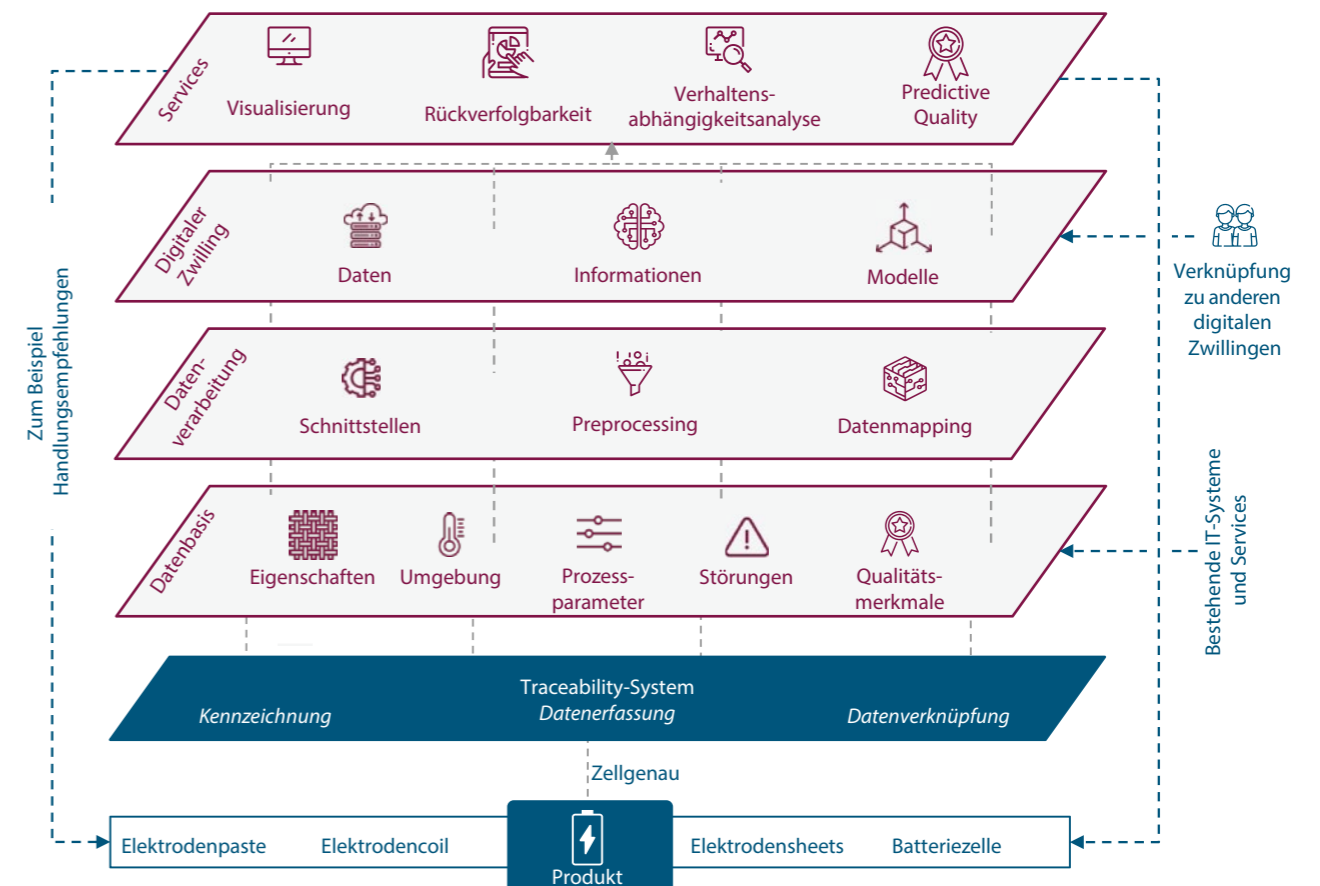


Bild 3 > Das Traceability-System ermöglicht den digitalen Produktzwilling © Fraunhofer FFB

Merkmal			Ausprägung		
Erfassung	Markierungsmethode	Symbol	Implementationspotenzial im Untersuchungsbereich		
Mit physischer Markierung			Elektrodenfertigung	Assemblierung	Formierung
kontaktlos	Optisch		●	●	●
	Magnetisch		○	○	○
	RFID		◐	○	◐
taktill	Taktiler Code		○	○	○
	Schaltkreis		○	○	○
Ohne physische Markierung					
kontaktlos	Fingerprint		○	◐	◐
	Logisches Modell		●	◐	○

Implementationspotenzial: ○ gering ◐ mittel ● hoch

Bild 4 > Implementationspotenzial verschiedener Markierungsmethoden im Batteriezellfertigungskontext (in Anlehnung an [9]) (© Fraunhofer FFB)

aufgezeichnet. Die Verknüpfung der Daten mit den Kennzeichnungsmethoden ergibt sich durch Modellierung des ID-Flusses für die Schritte der Batteriezellfertigung. Mit zellgenauer Rückverfolgung können Eigenschaften des (Zwischen-)Produkts mit Daten, Informationen und Modellen im Produktzwilling abgebildet werden und Mehrwerte wie Verhaltensabhängigkeitsanalysen und Vorhersage der Endqualität ermöglicht werden. Hierfür muss das Traceability-System mit anderen IT-Systemen kommuni-

zieren, beispielsweise über einen digitalen Zwilling, Bild 3.

Kennzeichnungsmethoden sowie Datenerfassung und -aufzeichnung

Hinsichtlich der Kennzeichnungsmethode ist das physikalische Funktionsprinzip der Markierung und Identifizierung festzulegen. Die Datenerfassung und -aufzeichnung teilt sich zudem in die Identifizierung der Objekte und die Erfassung von

Mess- und Produktionsdaten auf. Hierfür wird ein Identifier benötigt, der IT-seitig eindeutig auf ein bestimmtes Objekt referenziert. Dieser wird durch ein Erkennungsverfahren ausgelesen, sodass Daten spezifisch zu diesem Objekt verknüpft werden können. Dazu ist die Kommunikation über physische und Softwareschnittstellen erforderlich. Schließlich erfolgt die Aggregation durch das Ablegen der Daten in einem geeigneten Speichermedium. Insbesondere die Kennzeichnung in der Batteriezellfertigung ist durch die Berücksichtigung des Wechsels von kontinuierlicher zu diskreter Fertigung sowie die Anforderungen an Qualität und Sicherheit der Zellen herausfordernd. Hierbei sind ein geeignetes Verfahren zur Kennzeichnung sowie ein zugehöriges Beschriftungszeichen auszuwählen. Um die vielfältigen Anforderungen aus der Batteriezellfertigung zu berücksichtigen, wurden verschiedene Kennzeichnungsmethoden hinsichtlich ihrer Eignung analysiert. Hierzu wurde in der Fraunhofer-Gesellschaft eine Nutzwertanalyse durchgeführt, die auf den Einschätzungen von Experten aus verschiedenen Domänen (etwa Prozesse, Messtechnik, Data Science und Qualitätssicherung) basierend eine Ableitung der wichtigsten Kriterien hinsichtlich einer Traceability-Lösung für die Batteriezellfertigung (exklusive des Mischprozesses) erlaubt. Neben einer möglichst geringen Beeinflussung der Qualität sowie der Beständigkeit der Markierung ist auch die Fehlertoleranz der Traceability-Lösung aufgrund der Beanspruchung während der Prozesse essenziell. Die Auswertung der Ergebnisse der Nutzwertanalyse ist eben-

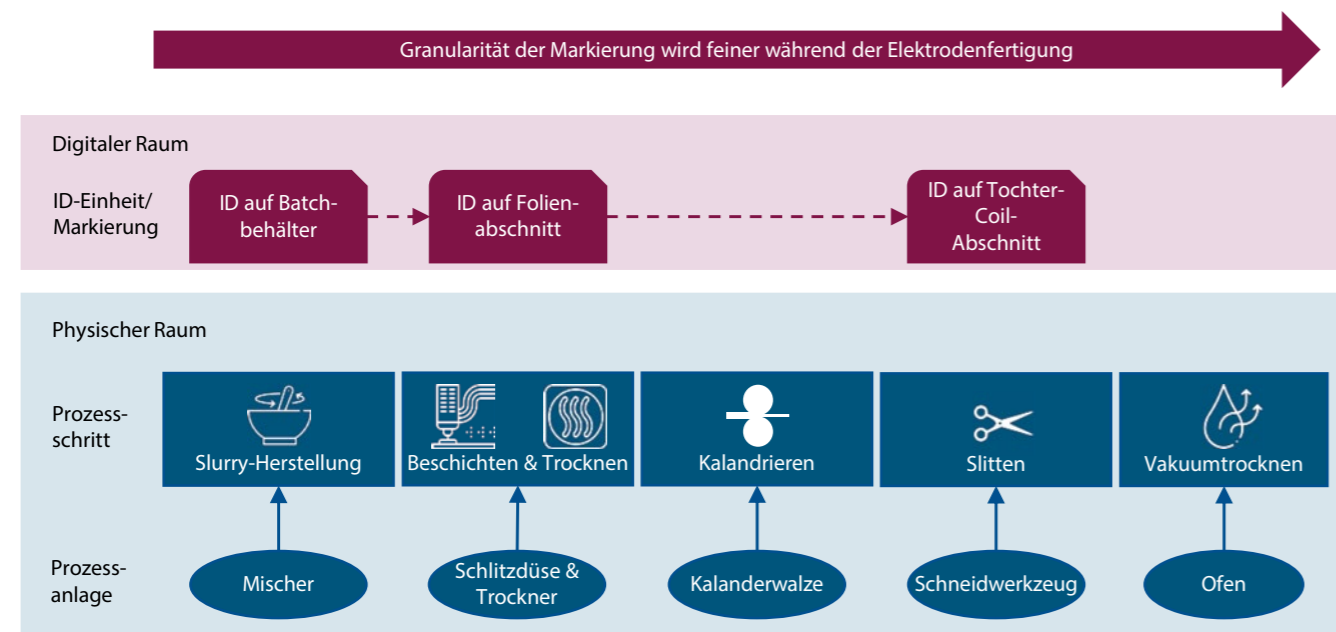


Bild 5 > ID-Fluss in der Elektrodenfertigung (© Fraunhofer FFB)



Bild 6 > Praktische Arbeiten am Extruder. Beim Mischvorgang werden mindestens zwei getrennte Ausgangsstoffe zu einer Elektrodenpaste (Slurry) gemischt. Den Aktivmaterialien werden auch Leitadditive sowie Lösungs- und Bindemittel beigefügt (© Fraunhofer FFB)

falls unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Riexinger et al. [9] hinsichtlich des Implementierungspotenzials in Bild 4 dargestellt. Demnach stellt eine Markierung mittels optischer Codierung in allen Untersuchungsbereichen (Elektrodenfertigung, Assemblierung und Formierung) die am besten geeignete Technologie zur Realisierung der Rückverfolgbarkeit in der Batteriezellfertigung dar. Entsprechend der durchgeführten Nutzwertanalyse wird eine Markierung durch Data-Matrix-Codes der Elektrodenfolie während des Beschichtungsprozesses mittels eines Lasers an-

gestrebt – je nach Zelldesign variiert die Länge der einzelnen Elektroden und entsprechend der Abstand, in dem die Elektroden eindeutig markiert werden. Durch die Verknüpfung eindeutiger IDs mit den Codes sowie eine Identifizierung des Produkts während der folgenden Prozessschritte werden die Rückverfolgung einzelner Elektroden sheets sowie die Zuweisung der Produktionsdaten ermöglicht. Die Übertragung der ID auf die geschlossene Zelle erfolgt durch Applizieren des Data-Matrix-Codes auf das Gehäuse zu Beginn der Assemblierung. Anschließend können

aufgenommene Daten während der Assemblierung und Formierung anhand der Markierung der jeweils betrachteten Zelle zugeschrieben werden. Ausgenommen von der Möglichkeit einer optischen Markierung ist nach bisherigen Erkenntnissen und dem Stand heutiger Technologien die Rückverfolgbarkeit während der Slurry-Herstellung. Beim Slurry handelt es sich um eine homogene Beschichtungspaste, die im folgenden Prozess der Beschichtung auf die Elektrodenfolien aufgebracht wird. Im Rahmen des Projekts wird insbesondere an einer Lösung geforscht, um die eindeutige Zuweisung von Produktions- und Messdaten vom Übergang der Slurry-Herstellung in die Beschichtung zu gewährleisten.

Datenverknüpfung mittels ID-Flüssen

Da sich die Granularität und Beschaffenheit auf Zwischenproduktebene mehrmals ändern, ist die Erstellung des ID-Flusses besonders wichtig, Bild 5. Während bei der Slurry-Herstellung noch eine ID auf Batchebene, zum Beispiel auf dem Behälter, angebracht werden kann, wird in nachfolgenden Prozessschritten eine ID für genauere Abschnitte auf dem Zwischenprodukt benötigt. Für eine spätere eindeutige Rückverfolgbarkeit müssen Markierungen auf Folienabschnitten erstellt werden. Beim Slitten werden die Folien in Tochter-Coils geschnitten, die wiederum auch markiert werden müssen.

Umsetzung in Münster

Um den anstehenden Herausforderungen für die Prozess- und Produktoptimierung und entsprechend Qualitätssicherung gerecht zu werden, forschen die Mitarbeitenden der Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batterie zelle FFB an vielversprechenden Konzepten und setzen genau an den Stellen an, wo bereits vorhandene Traceability-Konzepte an ihre Grenzen stoßen. In Bezug auf die Prozessoptimierung arbeitet das Team an der Etablierung eines innovativen Dosier- und Mischprozesses, dem kontinuierlichen Mischen mittels Extruder. Die Produktion des Slurries wird herkömmlich mittels Batchverfahren durchgeführt, bei dem definierte diskrete Produkte in Behältern erzeugt werden. Die Eigenschaften und Qualität von batchweise gefertigten Produkten lassen sich vergleichsweise leicht mit etablierten Verfahren verfolgen. Beim kontinuierlichen Mischen werden hierbei die Eingangsmaterialien der Anlage kontinuierlich zugeführt, vermengt und das Slurry ebenso

kontinuierlich erzeugt, Bild 6. Die kontinuierliche Verfolgung rieselnder Feststoffe beziehungsweise fließender Pasten ist eine der aktuellen Herausforderungen in Bezug auf die Rückverfolgbarkeit, da sich herkömmliche Traceability-Verfahren des Batchprozesses hier nicht anwenden lassen und noch keine etablierte Alternative existiert [10]. Diesem Aspekt sowie weiteren Ansätzen hinsichtlich der Rückverfolgbarkeit und der Verknüpfung anlagen- und produktseitiger Parameter, automatisierter Auswertung und Identifikation von Korrelationen widmen sich die Mitarbeitenden der Fraunhofer-Gesellschaft. Des Weiteren werden gemeinsame Vorhaben mit Anlagenherstellern, Sensor- und Softwarefirmen initiiert, um ein umfassendes Traceability-System entlang der gesamten Prozesskette zu entwickeln. Zukünftig soll so auch die Nutzung künstlicher Intelligenz zur Identifikation und Prognose notwendiger Adaptionen der Materialverarbeitung und Prozesse in Hinblick auf optimierte und effiziente Batteriezellproduktion möglich werden.

Fazit und Ausblick

In der Batteriezellfertigung bietet der digitale Zwilling vielfältige Optimierungsmöglichkeiten – speziell im Bereich der Produktqualität sowie der Prozessoptimierung, denen eine immense Bedeutung zukommt. Auf Batteriezebene wird der digitale Zwilling durch ein geeignetes Traceability-System erst ermöglicht. Um gleichzeitig die unikatgenaue Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten und jegliche negativen Einflüsse auf die Batterie zu minimieren, ist eine Vielzahl verschiedener Faktoren zu berücksichtigen – einige dieser Faktoren wurden im Rahmen der durchgeführten und in diesem Beitrag beschriebenen Analyse der Kennzeichnungsmethoden direkt adressiert. Neben den untersuchten und bereits in anderen Branchen etablierten Technologien zur eindeutigen Rückverfolgbarkeit werden in Zukunft auch neuartige Verfahren zum Einsatz kommen, zum Beispiel die eindeutige Erkennung inhärenter Materialeigenschaften, spezifische Fluoreszenzmarker auf Polymerbasis oder die Mikrostrukturierung von Oberflächenstrukturen mittels Laser. Der mögliche Einsatz dieser Technologien wird ebenso im Rahmen der Batteriezellfertigung untersucht. Die Überführung der erarbeiteten Konzepte in die praktische Umsetzung und deren Evaluation in der Serienfertigung werden schließlich im Projekt FoFeBat durchgeführt, um auf Basis des digitalen Zwillings die Produktion zu optimieren. //

Literaturhinweise

- [1] Jinasena, A.; Burheim, O. S.; Strömman, A. H.: A Flexible Model for Benchmarking the Energy Usage of Automotive Lithium-Ion Battery Cell Manufacturing. In: Batteries 7 (2021), Nr. 1: 14. Doi: 10.3390/batteries7010014
- [2] World Economic Forum (Hrsg.): A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030. Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation, 2019
- [3] Pettinger, K.-H.; Kampker, A.; Hohenthanner, C.-R.; Deutschens, C.; Heimes, H.; Hemdt, A. vom: Lithium-ion cell and battery production processes. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications. Berlin/Heidelberg, 2018, S. 211-226
- [4] Schmitt, R. H.; Kurzhals, R.; Ellerich, M.; Nilgen, G.; Schlegel, P.; Dietrich, E.; Krauß, J.; Latz A.; Gregori, J.; Miller, N.: Predictive Quality – Data Analytics in produzierenden Unternehmen. Predictive Quality – Data Analytics in manufacturing enterprises. In: Bergs, T.; Brecher, C.; Schmitt, R. H.; Schuh, G. (Hrsg.): Internet of Production: Turning Data into Value. Fraunhofer-Gesellschaft, 2020, S. 226-253
- [5] Stark, R.; Damerau, T.: Digital Twin. In: Chatti, S.; Tolio T. (Hrsg.): CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Berlin/Heidelberg, 2019, S. 1-8
- [6] Kies, D. A.; Krauß, J.; Schmetz, A.; Baum, C.; Schmitt, H. R.; Brecher, C.: Der digitale Zwilling in der Batteriezellfertigung. Digital Twin in Battery Cell Production – From Data Management and Traceability System to Target-Oriented Application. In: wt 111 (2021), Nr. 5, S. 286-290. Doi: 10.37544/1436-4980-2021-05-20
- [7] Berger, K.; Schöggel, J. P.; Baumgartner, R. J.: Digital battery passports to enable circular and sustainable value chains: conceptualization and use cases. In: Journal of Cleaner Production, Elsevier, 2021
- [8] Spur, G.: Handbuch Fügen, Handhaben und Montieren. München, 2013
- [9] Riexinger G.; Doppler J. P.; Haar C.; Trierweiler, M.; Buss A.; Schöbel, K.; Ensling, D.; Bauernhansl, T.: Integration of Traceability Systems in Battery Production. In: Procedia CIRP 93 (2020), S. 125-130. Doi: 10.1016/j.procir.2020.04.002
- [10] Sommer, A.; Leeb, M.; Haghi, S.; Günter, F. J.; Reinhart, G.: Marking of Electrode Sheets in the Production of Lithium-Ion Cells as an Enabler for Tracking and Tracing. In: Procedia CIRP 104 (2021), S. 1011-1016. Doi: 10.1016/j.procir.2021.11.170

Förderhinweis

Das Projekt „FoFeBat – Forschungsfertigung Batterie zelle Deutschland“ wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert. Förderkennzeichen: 03XP0256, 03XP0416.

Autoren | Kontakt

Dr. Jonathan Krauß, Abteilungsleiter Digitalisierung in der Batteriezellfertigung, Fraunhofer FFB, jonathan.krauss@ffb.fraunhofer.de

Thomas Ackermann, M. Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter Digitalisierung in der Batteriezellfertigung, Fraunhofer FFB, thomas.ackermann@ffb.fraunhofer.de

Dr. Kristina Borzutzki, wissenschaftliche Mitarbeiterin Produkt- und Produktionstechnologie, Fraunhofer FFB, kristina.borzutzki@ffb.fraunhofer.de

Alexander D. Kies, M. Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter Produktionsqualität und Messtechnik, Fraunhofer IPT, alexander.kies@ipt.fraunhofer.de

Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batterie zelle FFB
Mendelstraße 11
48149 Münster
www.forschungsfertigung-batterie zelle.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
Steinbachstraße 17
52074 Aachen
www.ipt.fraunhofer.de



Batteriezellfertigung

Thomas Siebel: Die Batterieproduktion rückt an den Automobilbau heran. www.springerprofessional.de/link/19623108

Christiane Köllner: Northvolt plant Bau einer Gigafabrik in Schleswig-Holstein. www.springerprofessional.de/link/20224022

Aufstiegsstoff.

Fachwissen, das kleben bleibt.



Wer nach oben will, für den ist das Beste gerade gut genug: Mit **adhäsion**, der einzigen deutschsprachigen Fachzeitschrift für die industrielle Kleb- und Dichttechnik, profitieren Sie zehn Mal im Jahr von wertvollem Insiderwissen, praxisrelevanten Informationen und den neuesten Trends und Technologien. Sie erhalten Zugriff auf den größten Wissenspool der Branche – ein unersetzlicher Vorsprung, der Ihnen im beruflichen Wettbewerb klare Vorteile sichert. Testen sie unser umfangreiches Serviceangebot: analog als Zeitschrift oder digital als E-Magazin, Website und Newsletter, jetzt auch für Ihr mobiles Endgerät optimiert. Profitieren Sie als Abonnent außerdem von unserem umfangreichen Online-Archiv mit allen Fachbeiträgen seit 2003 und dem „Handbuch Klebtechnik“ – dem aktuellen Nachschlagewerk für den Klebpraktiker.

Alle Infos erhalten Sie unter www.adhaesion.com

adhäsion KLEBEN+DICHTEN