

Vom Datenmanagement über das Traceability-System zur zielgerichteten Nutzung

Der digitale Zwilling in der Batteriezellfertigung

A. Kies, J. Krauß, A. Schmetz, C. Baum, R. H. Schmitt, C. Brecher

Der digitale Zwilling birgt große Potenziale hinsichtlich der Qualitätssteigerung in der Produktion. Die Implementierung eines solchen ist jedoch in hohem Maße abhängig vom spezifischen Anwendungsfall und die Übertragung theoretischer Modelle in die Praxis geht häufig mit großem Aufwand einher. In diesem Beitrag wird die Konzeptionierung eines digitalen Zwillings in der Batteriezellfertigung thematisiert und evaluiert.

STICHWÖRTER

Batteriefertigung, Digitalisierung, Industrie 4.0

1 Einleitung

Der fortschreitende Klimawandel macht einen Wechsel von der Nutzung konventioneller Energiequellen hin zu erneuerbaren notwendig, womit die Unabdingbarkeit einer effizienten Speicherung von elektrischer Energie einhergeht [1]. Dies mündet in einem Boom der Nachfrage nach Batteriezellen – Experten zufolge wird der Markt für Lithium-Ionen-Batteriezellen von heute jährlich etwa 200 GWh auf über 2000 GWh bis 2030 wachsen [2]. Die Fertigung der Zellen geht für Unternehmen jedoch mit einer enormen Komplexität einher. Hierbei erweist sich die Zellqualität als zentrale Herausforderung [3]. Die mit der vierten industriellen Revolution einhergehende Digitalisierung und Vernetzung der Produktion birgt große Potenziale hinsichtlich der Steigerung der Qualität [4]. Die Aufnahme und nutzenstiftende Verarbeitung von Daten, die im Produktionsumfeld bereits in großer Menge erhoben werden, ist dabei essenziell. Die Aggregation verschiedenartiger Daten stellt hierfür ein elementares Kriterium dar [5]. Betrachtet man die Batteriezelle während ihrer Fertigung, dann kann die Aggregation über die verschiedenen Produktionsprozesse mithilfe eines geeigneten Traceability-Systems – das als digitaler Faden fungiert – bewerkstelligt werden [6]. Der so generierte digitale Schatten ermöglicht mithilfe der aggregierten Daten die Ableitung des digitalen Zwillings. Die Nutzung des digitalen Zwillings wiederum wird durch die auf Algorithmen basierende Erstellung von Modellen realisiert, anhand derer Rückschlüsse auf das reale Gegenstück gezogen werden können [5].

2 Fertigung von Batteriezellen

Für eine Vielzahl der Anwendungen von Batteriezellen hat sich die Lithium-Ionen-Technologie bislang als beste Lösung

Digital Twin in Battery Cell Production – From Data Management and Traceability System to Target-Oriented Application

The digital twin has great potential with regard to quality improvement in production. However, the implementation of such a twin is highly dependent on the specific use case and the transfer of theoretical models into the real world often involves a great degree of effort. This article addresses and evaluates the conceptualization of a digital twin in battery cell manufacturing.

herauskristallisiert [7]. Der Fokus dieses Beitrags liegt dabei auf der Produktion von Rundzellen, deren Fertigung sich in die Elektrodenfertigung, die Zelleassemblierung und die Formierung der Zellen unterteilen lässt (vgl. **Bild 1**) [8].

Die Elektrodenfertigung stellt den kritischen Faktor der Zellfertigung dar. Kathode und Anode bestimmen die Kerneigenschaften einer Zelle und sind essenziell für deren Qualität [8]. Ihre Herstellung folgt dabei denselben Prozessschritten. Die Elektrodenfolien werden jeweils mit einer hergestellten Paste aus Aktivmaterialien beschichtet, getrocknet, kalandriert, in das benötigte Format geschnitten und abschließend nochmals unter Vakuum getrocknet [9, 10].

In der Assemblierung werden Anode, Kathode und Separator aufgewickelt und inklusive zweier Isolatoren in das Gehäuse eingeführt. Die Zelle wird anschließend mit Elektrolyt befüllt und verschlossen [10]. Einige charakteristische Merkmale der Zelle prägen sich erst mit der initialen Aufladung der Zelle aus, die während der Formierung stattfindet. Abschließend werden die Funktionalitäten der Zellen getestet [8].

3 Idee des digitalen Zwillings

Das Konzept der Nutzung eines Zwillings, also der Nachbildung eines Produkts zur Reflexion des Verhaltens des Originals, wurde von der NASA bereits für die Apollo-Missionen genutzt. Damals verblieb ein exakter Nachbau – der „Zwilling“ – des Raumfahrzeuges auf der Erde, um mithilfe dessen durch Simulation der Bedingungen im Orbit Rückschlüsse auf den Zustand des Originals ziehen zu können [11]. Seit der erstmaligen Erwähnung des Begriffs „Digital Twin“ 2010 in einer Veröffentlichung der NASA wird die Idee eines solchen in Wissenschaft und Industrie zunehmend diskutiert [11, 12]. Kernelemente, die einen digi-



Bild 1. Aufbau der Batteriezellfertigung [9]. Bild: Fraunhofer IPT

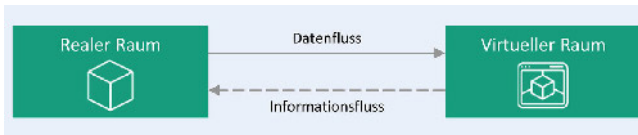


Bild 2. Idee des digitalen Zwillings [13]. Bild: Fraunhofer IPT

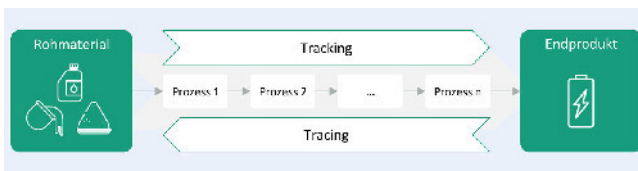


Bild 3. Traceability [18]
Bild: Fraunhofer IPT

talen Zwillings beschreiben, bilden dabei: die physische Welt, die virtuelle Welt, der Datenfluss von der physischen in die virtuelle Welt sowie der Informationsfluss in umgekehrter Reihenfolge (vgl. **Bild 2**) [13].

Die begrenzte Verbreitung sowie die Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten digitaler Zwillinge haben jedoch dazu geführt, dass bislang keine vollständige und allgemeingültige Definition existiert [14]. Diese Vielfalt mündet ebenfalls in der Absenz eines einheitlichen Vorgehens zur Einführung eines digitalen Zwillings [15]. Die Konzeptionierung des digitalen Zwillings komplexer Produkte während der Fertigung soll nachfolgend beleuchtet und anschließend deren Anwendung auf die Prozesse der Elektrodenfertigung der Batterie zelle im Rahmen des Projekts „Forschungsfertigung Batterie zelle“ beschrieben werden.

4 Konzeptionierung des digitalen Zwillings

Die detaillierte Auseinandersetzung mit dem physikalischen Gegenstück und die Ableitung einer zielgerichteten Definition des zu erstellenden digitalen Zwillings anhand dieser ist essenziell, um letztlich keine nutzlosen Informationen zu generieren [15]. Daraufhin ist eine Charakterisierung des zu fertigenden Produkts hinsichtlich der Parameter, die den Soll-Zwilling beschreiben, unabdingbar. Vor dem Hintergrund der Vermeidung eines Erschaffens von „Datenmonstern“ [16] sind die identifizierten Parameter basierend auf Analysen und gemäß dem definierten Ziel im Hinblick auf ihre Wichtigkeit zu bewerten.

Andererseits umfasst das Datenmanagement auch die Granularität der aufzunehmenden Daten sowie die dafür notwendige Messtechnik. Folglich sind Datentransfer und -vorverarbeitung für jeden untersuchten Prozess zu gewährleisten. Durch die Aggregation der Daten mithilfe einer Traceability-Lösung lassen sich interprozessuale Abhängigkeiten erfassen. Unter Traceability wird dabei „die Möglichkeit, Daten zur Rekonstruktion eines

Verlaufs zu erfassen“ [17] verstanden. Grundsätzlich lassen sich zwei Funktionen identifizieren, die die Traceability umfasst: Tracking – die vorwärtsgerichtete Verfolgbarkeit – und Tracing – die rückwärtsgerichtete Verfolgung des Endproduktes (vgl. **Bild 3**) [17].

Folglich erweist sich das Traceability-System als digitaler Faden, der die Produktionsprozesse miteinander verbindet [6]. Hierfür ist zunächst die physische Kennzeichnung des Produkts in Form einer Codierung vorzunehmen. Für die Erfassung und Aufzeichnung der prozessbezogenen Daten ist anschließend eine Identifizierung anhand der erfolgten Markierung notwendig. Die unikatgenaue Zuordnung erfolgt dabei über die Wahl einer geeigneten Identifizierungsnummer [18]. Das Überführen der Daten in den digitalen Zwilling ermöglicht Analysen und Simulationen zur datenbasierten Prozessoptimierung. Die Identifikation von Anwendungsfällen, die nach den Stufen der Datenanalyse kategorisiert werden können, gewährt eine zielgerichtete Nutzung des digitalen Zwillings [15, 19].

5 Der digitale Zwilling in der Forschungsfertigung Batterie zelle

Bild 4 stellt hierzu einen Überblick des digitalen Zwillings im Rahmen der Forschungsfertigung Batterie zelle dar. Eine Erläuterung der einzelnen Aspekte erfolgt in diesem Abschnitt.

Eines der zentralen Ziele, das in der Forschungsfertigung Batterie zelle mit der Einführung des digitalen Zwillings verfolgt wird, ist die Optimierung der Produktion im Hinblick auf die Zellqualität. Zur Erreichung dieses Ziels wurden im Projekt basierend auf projektinternem Know-how qualitätskritische Parameter identifiziert. Hierzu wurde für die Identifikation der Parameter eine Unterscheidung hinsichtlich ihrer Größenart vorgenommen. Um eine im Hinblick auf die Ziele angemessene Menge der Daten aufzunehmen, wurden Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge der Parameter auf Basis von Expertenwissen identifiziert. Hierdurch konnten für die Elektrodenfertigung 118 qualitätskritische Parameter ermittelt werden, die die Zelle während der Produktion charakterisieren – von der Partikelmorphologie der Eingangsmaterialien bis hin zu etwaigen Lösungsmittelresten in den Elektroden am Ende ihrer Produktion. Für die Erfassung einer Vielzahl dieser Größen wurde ebenfalls geeignete Messtechnik abgeleitet: die Partikelmorphologie bspw. kann über energiedispersive Röntgenspektroskopie, Lösungsmittelreste mithilfe eines Fourier-Transform-Infrarotspektrometers gemessen werden. Darüber hinaus werden die Daten der identifizierten Prozessparameter direkt über die jeweilige Anlage erfasst.

Schließlich sollen die erfassten Daten verarbeitet, übertragen und gespeichert werden [20]. Die Akquisition der Daten – von Anlagen, Sensorik oder weiteren Datenquellen – bildet dabei den Startpunkt der Datenpipeline in die digitale Welt. Verfügbarkeit

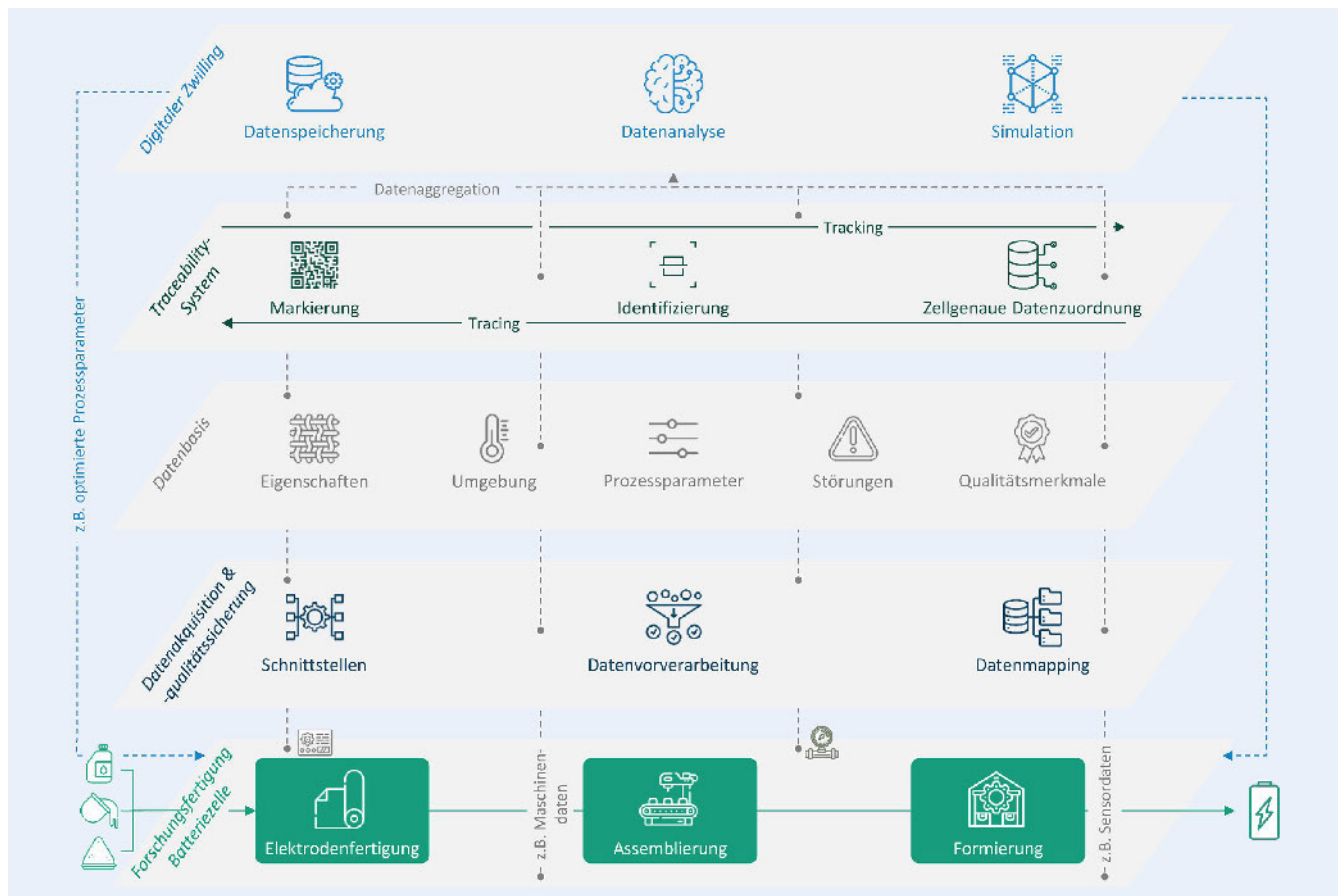


Bild 4. Big Picture des digitalen Zwillings. Bild: Fraunhofer IPT

sowie technische Effizienz und Effektivität bedingen den Einsatz verschiedener Technologien. Maschinendaten können über Industriestandards wie OPC UA angebunden werden. Falls keine standardisierte, sondern eine proprietäre Schnittstelle vorhanden ist, werden diese Anbindungen mit wiederverwendbaren Adapter-Modulen vorgenommen und in ein standardisiertes Format übersetzt. Dieser Adapter-Ansatz findet ebenfalls Anwendung, wenn die benötigte Auflösung und Frequenz der Daten durch die OPC UA-Schnittstelle nicht erreicht wird oder eine Anbindung von Legacy-Systemen notwendig ist. Im Anschluss findet die Datenvorverarbeitung statt, um die Qualität der aufgenommenen Daten sicherzustellen. Hierfür werden unter anderem Methoden der Synchronisierung der Datenreihen, Datenreduktionen oder eine syntaktische Datenintegration eingesetzt. Basierend auf dem Wissen von Experten wurde hierfür beispielsweise der Slittingprozess als stabil und die Varianz der Schnittbreite als niedrig identifiziert. Dies erlaubt eine Reduktion der Daten der Breite einer einzelnen geslitteten Elektrode auf den Mittelwert der Datenreihe. Somit wird durch die Übertragung der Daten zur Hinterlegung im digitalen Zwilling die Berücksichtigung angemessener Datenmengen für die einzelnen Prozesse sichergestellt. Plausibilitätsprüfung sowie Augmentierung der Daten durch Experteneingaben stellen wichtige Schritte eines iterativen Verbesserungsprozesses im Rahmen der Datenqualitätssicherung dar. Die Datenvorverarbeitung ist eng mit der Entwicklung des digitalen Zwillings verknüpft, da für die syntaktische Datenintegration ebenfalls Standards und Ontologien aus dem digitalen Zwilling genutzt werden können, um frühzeitig austauschbare Datenbasen zu

schaffen. Die Reduktion der Daten in der Vorverarbeitung unter Beibehaltung aller Informationen ist zudem ein wichtiger Schritt für die Effizienz und Konsistenz der Datenspeicherung und das übergreifende Datenmanagement. Aufgrund einer starken Heterogenität der Daten erfolgt die Datenspeicherung durch ein übergreifendes Datenbankmanagementsystem, auf das der digitale Zwilling zugreifen kann.

Eine wichtige Komponente zur Datenübertragung stellt die Middleware und damit eine verbundene Plattform für das Industrial Internet of Things (IIoT) dar. Die Middleware abstrahiert die Komplexität für die darüber liegenden Anwendungen. Damit umfasst die hier betrachtete Middleware die Orchestrierung und Verwaltung der Datenströme. Diese Datenströme folgen teilweise einer Zentralisierung in spezifische Systeme wie der IIoT-Plattform, aber insbesondere für die größtmögliche Effektivität des digitalen Zwillings ebenso dem Konzept der verteilten Datensilos mit klaren Zugriffsoptionen. Diese Hybridarchitektur geht mit einer erhöhten Komplexität der Verwaltung der Datenströme einher. Daher werden hier Broker wie MQTT und Data Streaming Frameworks wie Apache Kafka – was die ACID-Eigenschaften (atomicity, consistency, isolation, durability) erfüllt und somit ebenfalls der Datenkonsistenzsicherung dient – eingesetzt. Die IIoT-Plattform übernimmt darauf aufbauende Aufgaben wie eine einfache Exploration der Status der Anlagen und Datenquellen (zum Beispiel durch dort integrierte Dashboards) sowie Monitoring-Aufgaben [21].

Ein Schwerpunkt bei der Konzeptionierung des digitalen Zwillings liegt auf der Entwicklung eines Traceability-Systems,

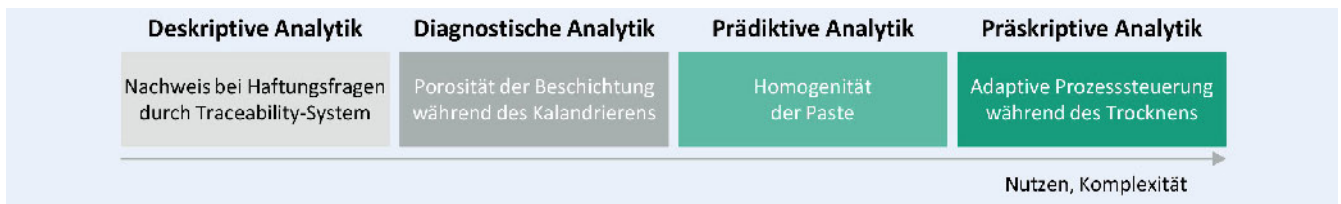


Bild 5. Anwendungsfälle in der Elektrodenfertigung. Bild: Fraunhofer IPT

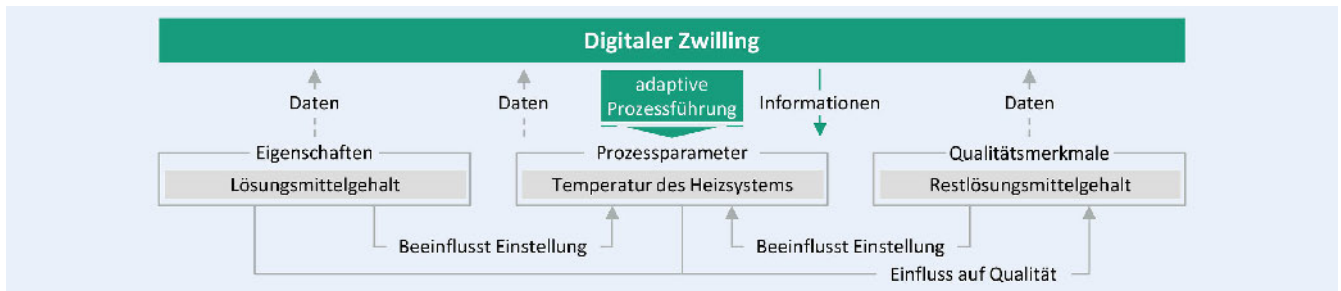


Bild 6. Adaptive Prozessführung während des Trocknens. Bild: Fraunhofer IPT

mit dessen Hilfe die zellspezifische Zuordnung der Daten von der Elektrodenfertigung bis zur Formierung der Zellen sichergestellt und damit die Analyse und Generierung von Informationen für jede Zelle interprozessual ermöglicht wird. Dazu werden die Elektroden mittels Laser oder Tinte – in Form eines QR- oder Data Matrix-Codes – codiert und so jeder Zelle eine eindeutige ID zugeordnet. Zur Gewährleistung einer durchgängigen Rückverfolgbarkeit werden die je Elektrode hinterlegten Daten schließlich so transformiert, dass sie während der Assemblierung mit den Daten der zugehörigen Hülle – die ebenfalls eine Markierung enthält – verknüpft und fortan weitere Prozessdaten unikatgenau zugeordnet werden können.

Schließlich werden auf Basis des generierten Wissens Anwendungsfälle für den digitalen Zwilling abgeleitet. Diese werden anhand der Stufen der Datenanalyse kategorisiert, wobei mit den Stufen jeweils sowohl ein steigender Komplexitätsgrad als auch Nutzen einhergeht: deskriptiv („Was ist passiert?“); diagnostisch („Warum ist es passiert?“); prädiktiv („Was wird passieren?“); präskriptiv („Was sollte getan werden?“) [19] (siehe Bild 5).

Deskriptive Analytik: Mithilfe des Traceability-Systems kann eine lückenlose Rückverfolgbarkeit auf Zellniveau realisiert werden. Dieser zu erbringende Nachweis ist hinsichtlich aufkommender Haftungsfragen essenziell und bietet darüber hinaus ein enormes Kosteneinsparungspotenzial: durch die unikatgenaue Zuordnung der Produktionsparameter kann der Rückruf ganzer Chargen vermieden werden [15].

Diagnostische Analytik: Durch Analysen kann die Ursache eines Fehlers, der beispielsweise im Rahmen des Kalandrierens detektiert wird, diagnostiziert werden. Über die abgeleitete Kritikalität der Parameter konnte die Porosität der Beschichtung als kritisches Merkmal für den Erfolg des Kalandrierens identifiziert werden. Diese wird vom Prozess des Beschichtens beeinflusst. Durch die automatisierte Detektion einer suboptimalen Beschichtungsporosität kann die diagnostische Analytik genutzt werden, um die Ursache zu identifizieren, die hier im Rahmen des Beschichtungsprozesses liegt. Auf Grundlage dieser Information lassen sich notwendige Handlungen zur Beseitigung des Problems ableiten. Hierdurch kann wiederum die Qualität des Produktes verbessert oder Ausschuss vermieden werden.

Prädiktive Analytik: Für die Elektrodenfertigung wird das Beispiel der Homogenität der Paste als konkreter Anwendungsfall bemüht. Die Homogenität der Paste wurde im Rahmen des Projektes als kritisches Qualitätsmerkmal des Prozesses der Pastenherstellung identifiziert. Als solches hat es Einfluss auf weitere Merkmale in der Elektrodenfertigung – beispielsweise die Schichthomogenität nach dem Prozess des Beschichtens, die ebenfalls kritisch für die Qualität der fertigen Zelle ist. Durch den Einsatz von Machine Learning-Algorithmen können die erfassten Daten zur Homogenität der Paste analysiert werden. Die Qualität der Zelle kann so in Abhängigkeit dieses Parameters bereits im ersten Prozess der Zellfertigung vorhergesagt werden. Bei diesen Vorhersagen kommen in erster Linie Machine Learning-Algorithmen des Supervised Learnings zum Einsatz. Werden die Parameter mittels numerischer Werte beschrieben, zeigen Ensemble Learning wie „xgboost“ und „lightGBM“ hohe Performanz. Werden Bilddaten genutzt, lohnt sich der erhöhte Aufwand auf Deep Learning zurückzugreifen – beispielsweise Multi-Layer Perceptron und Convolutional Neural Networks. Die Vorhersagen dienen dem Anwender, der darauf aufbauend frühzeitig Gegenmaßnahmen einleiten kann.

Präskriptive Analytik: Bild 6 veranschaulicht darüber hinaus die adaptive Prozesssteuerung im Kontext der präskriptiven Analytik am Beispiel des Trocknens. Sowohl der Lösungsmittelgehalt zu Beginn des Prozesses als auch die Temperatur des Heizsystems beeinflussen die Qualität der Elektrode am Ende des Trocknens – hier repräsentiert durch den Restlösungsmittelgehalt. Durch Aufnahme der Daten und Verarbeitung dieser im digitalen Zwilling wird die adaptive Prozessführung ermöglicht: die Temperatur des Heizsystems kann qualitätsoptimierend geregelt werden.

Zur Integration der oben beschriebenen Analytik in das Gesamtsystem ist der digitale Zwilling erneut der zentrale Einstiegspunkt. Der digitale Zwilling stellt verschiedene Sichten auf die vernetzten Daten und Wissen bereit, sodass verschiedene Systeme und Analytikdienste hierauf in einer technisch automatisierbaren Art mit standardisierten Schnittstellen zugreifen können. Dadurch können die Analytikmodelle und -dienste selbst sowohl als Teil oder Erweiterung einer Komponente des Gesamtsystems (zum Beispiel als Applikation in einer IIoT-Plattform) eingebun-

den sein oder eigenständig als Microservice-Architektur bereitstellen. Diese Flexibilität erlaubt die Integrierbarkeit von neuen Analytikdiensten ohne starre Vorgaben oder Begrenzungen durch andere Komponenten. Entsprechend lassen sich die Ergebnisse dieser Analytikdienste zielabhängig integrieren. So kann beispielsweise ein Dienst für die prädiktive Analytik der Pastenhomogenität die Ergebnisse in die IIoT-Plattform zurückspielen, die dann diese Informationen den Usern darstellt oder diese alarmiert. Gleichzeitig kann der Dienst der präskriptiven Analytik die Ergebnisse direkt an einen definierten Zugriffspunkt dem Edge-Gerät des Trockners bereitstellen, sodass von dort Parameter für die Temperaturregelung angepasst werden, ohne eine direkte Verbindung der Maschinensteuerung in das gesamte Netzwerk zu benötigen.

6 Digitalisierung als Chance

Der digitale Zwilling in der Zellfertigung stellt einen entscheidenden Faktor hinsichtlich der Digitalisierung und folglich der Steigerung der Qualität der Zelle dar. Abschließend kann festgehalten werden, dass der digitale Zwilling einen ersten Schritt auf dem Weg zur digitalisierten, vernetzten Batteriezellfertigung in Deutschland darstellt. Die praktische Umsetzung der Konzeption kann als ein Enabler der am Anfang beschriebenen Vision einer wettbewerbsfähigen deutschen Zellfertigungsindustrie angesehen werden. Zugleich ist der digitale Zwilling Fundament weiterer Forschungsvorhaben entlang des Lebenszyklus einer Batteriezele.

FORSCHUNGSFERTIGUNG BATTERIEZELLE

Die Forschungsfertigung Batteriezele ist die zentrale Forschungs- und Fertigungsinfrastruktur zur Befähigung der Industrie für eine ökonomische und ökologische Produktion von Batteriezellen. Ziel der Forschungsfertigung Batteriezele ist es, den Innovations- und Kommerzialisierungsprozess von Produktionstechnologien für bestehende und zukünftige Zellformate zu beschleunigen.

Das Projekt „FoFeBat – Forschungsfertigung Batteriezele Deutschland“ wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert (Förderkennzeichen: 03XP0256).

Literatur

- [1] Lewerenz, S.: Pros and Cons of Batteries in Green Energy Supply of Residential Districts – A Life Cycle Analysis. In: Albrecht S.; Fischer, M.; Leistner, P. et al. (Hrsg.): Progress in Life Cycle Assessment 2019. Cham: Springer International Publishing 2019, S. 159–172
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Batterien „made in Germany“ – ein Beitrag zu nachhaltigem Wachstum und klimafreundlicher Mobilität. Stand: 2021. Internet: <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Dossier/batteriezellfertigung.html>. Zugriff am 02.02.2021
- [3] VDMA Batterieproduktion (Hrsg.): Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030 – Update 2018. Frankfurt am Main: VDMA Verlag GmbH 2018
- [4] Weyrich, M.; Ebert, C.: Reference Architectures for the Internet of Things. IEEE Software 33 (2016) 1, S. 112–116
- [5] Kuhn, T.: Digitaler Zwilling. Informatik-Spektrum 40 (2017) 5, S. 440–444
- [6] Eigner, M.; Detzner, A.; Schmidt, P. H. et al.: Definition des Digital Twin im Produktlebenszyklus. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 114 (2019) 6, S. 345–350
- [7] Kampker, A.; Vallée, D.; Schnettler, A.: Elektromobilität – Grundlagen einer Zukunftstechnologie, Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg 2013
- [8] Pettinger, K.-H.; Kampker, A.; Hohenthanner, C.-R. et al.: Lithium-Ion Cell and Battery Production Processes. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications. Berlin/Heidelberg: Springer 2018, S. 211–226
- [9] Kampker, A.: Elektromobilproduktion, Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg 2014
- [10] Brodd, R. J.; Tagawa, K.: Lithium-Ion Cell Production Processes. In: van Schalkwijk, W. A., Scrosati, B. (Hrsg.): Advances in Lithium-Ion Batteries, Boston, Massachusetts: Springer US 2002, S. 267–288
- [11] Rosen, R.; von Wichert, G. et al.: About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. IFAC-PapersOnLine, 48 (2015) 3, S. 567–572
- [12] Shafto, M.; Conroy, M.; Doyle, R. et al.: DRAFT Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap – Technology Area 11. Washington: National Aeronautics and Space Administration NASA 2010
- [13] Grieves, M.; Vickers, J.: Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems (Excerpt). Florida Institute of Technology 2016
- [14] Eigner, M.: Digitaler Zwilling – Stand der Technik. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 115 (2020) special, S. 3–6
- [15] Massonet, A.; Kiesel, R.; Schmitt, R. H.: Der Digitale Zwilling über den Produktlebenszyklus. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 2020, 115 (2020) special, S. 97–100
- [16] Boschert, S.; Rosen, R.: Digital Twin – „The Simulation Aspect“ In: Hehenberger, P.; Bradley, D. (Hrsg.), Mechatronic Futures. Cham: Springer International Publishing 2016, S. 59–74
- [17] ten Hompel, M.; Heidenblut, V.: Taschenlexikon Logistik. Berlin/Heidelberg: Springer 2011
- [18] Weckenmann, A.; Dietmaier, A.; Akkasoglu, G.: Qualitätssicherung und Traceability in der Montage. In: Feldmann, K. (Hrsg.): Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren, 2. Auflage. München: Hanser 2014, S. 834–856
- [19] Sallam, R.; Steenstrup, K.; Eriksen, L. et al.: Industrial Analytics Revolutionizes Big Data in the Digital Business, Gartner Research 2014
- [20] Schmitt, R. H.; Ellerich, M.; Schlegel, P. et al.: Datenbasiertes Qualitätsmanagement im Internet of Production. In: Frenz, W. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0: Recht, Technik, Gesellschaft. Berlin/Heidelberg: Springer 2020, S. 489–516
- [21] Schmetz, A.; Siegburg, R.; Zontar, D.; Brecher, C.: Middleware for the IIoT. Study of the International Center of Networked, Adaptive Production (ICNAP), Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, Aachen, 2019



Alexander D. Kies, M. Sc.
Bild: Fraunhofer IPT

Jonathan Krauß, M. Sc.

Arno Schmetz, M. Sc.

Dr.-Ing. **Christoph Baum**

Prof. Dr.-Ing. **Robert H. Schmitt**

Prof. Dr.-Ing. **Christian Brecher**

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
Steinbachstr. 17, 52074 Aachen
Tel. +49 241 / 8904-498
alexander.kies@ipt.fraunhofer.de
www.ipt.fraunhofer.de