



Nachhaltige Batteriezellenproduktion durch Digitalisierung

Joachim Montnacher

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

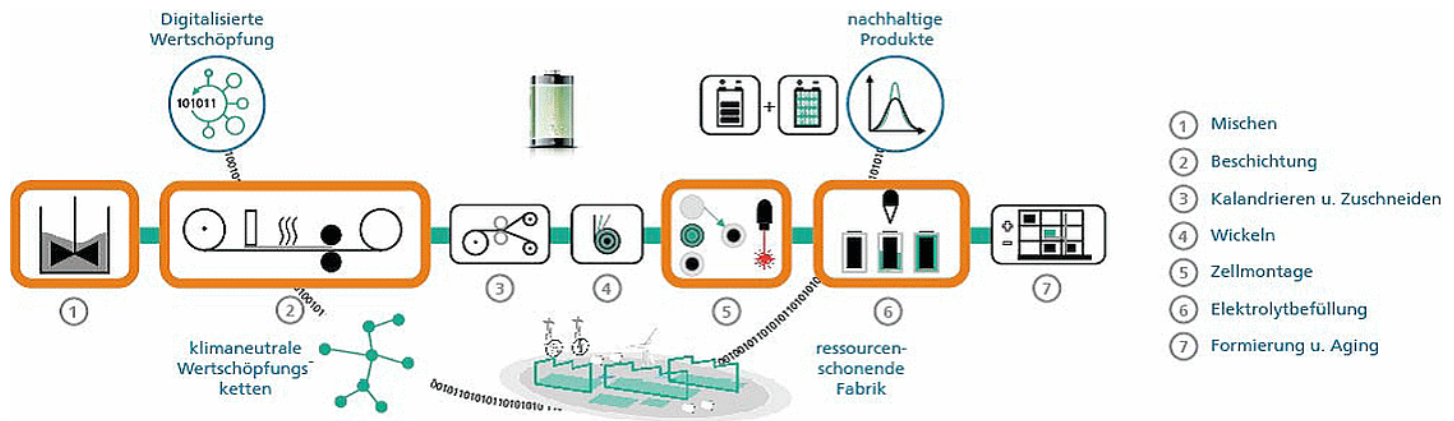


Abb. 1: Aufbau der gesamten Prozesskette zur Herstellung von Batteriezellen.

Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität ist die Batteriezelle. Damit entfällt auf die Batterie nicht zuletzt ein entscheidender Anteil der Wertschöpfung eines Elektroautos. Einer der Gründe, weshalb Batteriezellen auch in Europa und Deutschland produziert werden sollen. Wesentliche Voraussetzung dafür ist eine qualitativ hochwertige Batteriezellenproduktion. Mit einer durchgängigen Digitalisierung der Wertschöpfungskette kann diese umgesetzt werden. Im Zentrum für Digitalisierte Batteriezellenproduktion (ZDB) am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA sind bereits wesentliche Prozessschritte der gesamten Fertigungskette der Batteriezellenherstellung vorhanden.

Die Wertschöpfungskette in der Batteriezellenproduktion durchgängig zu digitalisieren, gehört zu den wesentlichen Aufgaben des ZDB. Dabei unterstützt das Zentrum die Optimierung und Skalierung von bestehenden (Li-Ionen) und zukünftigen (Post-Li-Ionen) Batteriezellkonzepten und deren Fertigungsverfahren. Im Vordergrund steht immer die Steigerung und Stabilisierung der Produktqualität. Um diese zu erreichen,

optimiert das ZDB einzelne Produktionsprozesse, verkettet Produktionseinheiten mit der übergeordneten Prozess- und Gebäudeinfrastruktur. Hier soll die gesamte Fertigungskette der Batteriezellenherstellung aufgebaut und digitalisiert werden.

Kooperationspartner sind das Fraunhofer IPA, die Universität Stuttgart und verschiedene Unternehmen. Das Zentrum für Digitalisierte Batteriezellenproduktion wird durch das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg gefördert.

Digitalisierte Dispergieranlage für die Batteriefertigung

Die Herstellung einer Batteriezelle, die z.B. bei einem Elektroauto zum Einsatz kommt, ist ein komplexer Prozess, der viele einzelne Arbeitsschritte umfasst. Er beginnt mit der Produktion der Elektroden, wobei eine Paste – Experten sprechen von Slurry – auf ein Substrat, meist eine metallische Folie, aufgetragen wird. Die Paste ist das aktive Material in einer Zelle. Sie besteht aus einem Pulvergemisch wie Lithium, Kobalt, Bindemittel, Dispergieradditiven und leitfähigen Stoffen wie Leitruß. Dieses

Pulver wird mit einem Lösemittel zu einer Paste oder Slurry angerührt. Das IPA bringt für diesen ersten Schritt der Batteriefertigung jahrzehntelange Erfahrung mit.

Eine große Herausforderung ist dabei die Entstehung von Aggregaten und Agglomeraten im Mischprozess. Bei der Elektrode sind Agglomerate besonders fatal, denn diese können zu einem Kurzschluss führen und machen die Batterie letztlich unbrauchbar. Ein weiteres Problem kommt dazu: Die aktive Schicht, die Elektrode, »atmet«. Bei jedem Be- und Entladen ändert sie ihr Volumen und könnte sich deshalb vom Substrat ablösen. Die Folge wäre ein Versagen der Batteriezelle, beispielsweise durch einen



Abb. 2: Ein Labormitarbeiter vergleicht die Dispersionen

Kurzschluss. Die Gefahr droht vor allem bei hohen Energiedichten, wie sie für das Auto nötig sind. Die Paste muss also fest auf dem Substrat haften. Schon bei der Dispersion muss man ein Optimum von elektrochemischen Eigenschaften und mechanischer Stabilität finden.

Dabei hilft eine voll digitalisierte Dispergieranlage, die in den IPA-Laboren steht. Sie ist mit zahlreichen Sensoren ausgestattet, sodass man während des Mischprozesses erkennt, wie sich die Paste entwickelt. Die Sensoren messen rheologische Eigenschaften, Partikelgrößenverteilung, Energieeintrag und vieles mehr. Sie detektieren jede Abweichung schon während der Verarbeitung, sodass bei Bedarf der Mischprozess angepasst werden kann. Ist eine homogene Paste entstanden, sorgen sie dafür, dass die Anlage nicht zu lange läuft. Nur ein Bruchteil der beim Mischen und Rühren eingesetzten Energie wird für das eigentliche Dispergieren verwendet. Ein Großteil der eingesetzten Energie wird als Wärme frei, ohne die Dispersion wesentlich zu verbessern. Die Reduzierung der frei werdenden Wärmeenergie bietet ein großes Einsparpotenzial.

Experimentieren und Simulieren

Mit der digitalisierten Dispergieranlage lassen sich nicht nur herkömmliche Pasten herstellen. Die Experten können auch mit neuen Materialien experimentieren, wie sie aus ökologischen Gründen über kurz oder lang notwendig werden. So sollen potenziell gesundheitsschädliche organische Lösemittel durch wasserbasierte Medien ersetzt werden. Die vielen Daten aus der Anlage helfen dabei, besser zu verstehen, was genau beim Dispergieren passiert. Bisher gibt es hier noch viele Fragen. Das Wissen lässt sich nutzen, um die Modelle zur Prozesssimulation zu verbessern. Vorab simulierte Prozesse können den Entwicklungsprozess verkürzen und so Zeit und Geld sparen.

Die Daten helfen dabei, die Ausschussraten erheblich zu reduzieren. Denn in der Fabrik von morgen sind alle Geräte, die zur Batteriezellenproduktion nötig sind, miteinander vernetzt. Dann könnte



Abb. 3: Mischen im Dispergiertechnikum des Fraunhofer IPA

die Beschichtungsanlage, sobald sie ein Problem erkannt hat, die Dispergieranlage anweisen, länger zu mischen oder andere Parameter einzustellen. Das Ziel ist letztlich ein selbstlernendes System, das keine Eingriffe von außen erfordert.

Smarte Produktion für hochwertige Batteriezellen

Derzeit ist die Produktion von Batteriezellen mit großen Herausforderungen verbunden. Meist wandert ein relativ hoher Anteil der Produktion als Ausschuss auf den Müll, was erhebliche Kosten verursacht. Die Ursache: Erst am Ende wird

die fertige Zelle auf ihre Funktionsfähigkeit hin getestet. So geht jeweils eine ganze Charge verloren, wenn irgendwo im Fertigungsprozess ein Fehler aufgetreten ist. Da Batteriezellen sehr empfindlich sind, genügen schon Kleinigkeiten, um für erheblichen Ärger zu sorgen: etwa eine zu hohe Luftfeuchtigkeit im Raum oder ein erhöhter Druck in einer Presse.

Digitalisierung und Vernetzung können Abhilfe schaffen. Das bedeutet, dass zahlreiche Sensoren von jedem Prozessschritt Daten sammeln. Die Informationen werden zentral verwaltet. Ziel ist, dass die Software nicht nur Fehler frühzeitig erkennt, sondern auch analysiert, wie es dazu kommen konnte – und die Ursache behoben werden kann. Dafür müssen alle Maschinen digitalisiert sowie die Umgebungsbedingungen überwacht werden.

Verbesserte Nassbeschichtung

Erster Schritt bei der Fertigung ist die Herstellung der Elektroden. Kern jeder Batterie ist ein Verbund von Anode und Kathode mit einer hauchdünnen Sperrschicht dazwischen. Das IPA hat eine intelligente Nassbeschichtungsmaschine für Anodenmaterial entwickelt und aufgebaut, die alle Voraussetzungen mitbringt, um in einem digitalisierten Fabrikumfeld zu bestehen.



Abb. 4: Nassbeschichtungsanlage

Schlitzdüsenbeschichtung

Abgesehen von der Digitalisierung unterscheidet sich ihre Vorgehensweise nicht von einer herkömmlichen Anlage: Eine Breitschlitzdüse ermöglicht eine kontinuierliche Rolle-zu-Rolle-Beschichtung des Anodenmaterials auf eine Trägerfolie. Ein Trockner entzieht die Feuchtigkeit. Neu ist, dass Sensoren zahlreiche Daten sammeln und Fehler sofort ausfindig machen. Ein optisches System tastet die beschichtete Folie nach dem Trocknen ab und erkennt, ob die Schichtdicke und die Kantenschärfe stimmen und die Beschichtung homogen aufgetragen ist. Zusätzlich druckt die Anlage auch in regelmäßigen Intervallen einen QR-Code mit allen relevanten Qualitäts- und Prozessparametern auf die Folie, der eine eindeutige Nachverfolgbarkeit der hergestellten Beschichtungen erlaubt. Dadurch können später, in jeder Batterie alle Prozessparameter und Rohstoffdaten während der Herstellung nachvollzogen werden.


Sensoren und intelligenter Werkstückträger für die Digitalisierung

Bis zur fertigen Batteriezelle sind freilich weitere Arbeitsschritte nötig. Das Zwischenprodukt muss dabei von einer zur anderen Maschine transportiert werden. Hier setzen IPA-Experten an, um weitere Informationen zu sammeln. Ein intelligenter Werkstückträger, dient nicht nur dem Transport, sondern generiert auch Daten, indem er etwa das Gewicht von jedem Bauteil bestimmt. Zunächst gilt es aber herauszufinden, welche Daten für ein optimales Ergebnis überhaupt nötig sind. Während der Entwicklungsphase sind deshalb mehr Sensoren im Einsatz als eigentlich nötig. Es müssen zunächst mehr Daten erfasst werden als später in der Produktion, mit dem Ziel letztlich die gesamte Fertigungskette der Zellproduktion zu digitalisieren, um eine hohe gleichbleibende Qualität der Zellen zu erreichen.

Trockenbeschichtung als Alternative

Die Nassbeschichtung von Elektroden hat auch Nachteile: Vor allem sind gängige Lösemittel gesundheitsschädlich,

Durchgängige Datenerfassung- Parameter bei der Elektrodenherstellung



Materialerfassung	Pastenherstellung	Elektrodenherstellung
Kategorie	Material ID (mehrere)	Pasten ID
Name	Rezeptur/Zusammensetzung	Pumpgeschwindigkeit
Hersteller/Lieferant	Mengen	Schlitzweite
Batch/Charge Nr.	Feststoffgehalt	Maskendicke
Reinheit	Mischaggregat	Bahngeschwindigkeit
Partikelgröße (D50)	Mischdauer	Bahnspannung
Partikelgröße (D90)	Leistung	Trocknungstemperaturen
Spezifische Oberfläche	Umdrehungen	Oberflächenqualität (optisch)
Dichte	Viskosität	Schichtdicke

manche können sogar Krebs verursachen. Deshalb dürfen sie nicht in die Umwelt entweichen und müssen aufwendig zurückgewonnen werden. Zudem ist der Temperaturbehandlungsprozess komplex und verursacht hohe Energiekosten. Um beim kontinuierlichen Herstellungsprozess dennoch eine akzeptable Produktionsgeschwindigkeit zu erreichen, sind Trockenstrecken mit mehr als 20 Metern nötig. Eleganter ist es, auf Lösemittel zu verzichten und die Schichten trocken aufzubringen.

Elektrostatische Pulverbeschichtung

Das IPA arbeitet seit 2011 an einer Trockenbeschichtung als Alternative zur herkömmlichen Nassbeschichtung. Die IPA-Experten haben bereits mehrere Patente auf ihre Trockenbeschichtung bekommen und zwei Prototypen bauen

lassen: Die Pulvermischung wird mit Luft durchströmt, in einen flüssigkeitsähnlichen Zustand versetzt und im elektrischen Feld als dünne Schicht abgeschieden. Man spricht von elektrostatischer Pulverbeschichtung. Allerdings ist auch bei dieser Methode eine Temperaturbehandlung nötig, wenn auch wesentlich platzsparender und energieeffizienter als bei der Nassbeschichtung.

Das Pulver enthält kleine Kunststoffpartikel, die als Klebstoff wirken, damit das Material haftet. Infrarotstrahlung schmilzt den Kunststoff im weiteren Prozess auf, um die Funktionsschicht dauerhaft auf dem Substrat zu fixieren. Dieses Verfahren hat große Vorteile: Es kommt nicht nur ohne schädliche Lösemittel aus und braucht keine großen An-



Abb. 5: Kompakte Anlage zur Trockenbeschichtung von Batteriespeicherelektroden

lagen, aufgrund des Materialnutzungsgrads von fast 100 Prozent fällt auch kein Abfall an. Zudem benötigt die Trockenbeschichtung weniger Energie als die Nassbeschichtung.

Laserschweißen in der Batteriezellenproduktion

Der Laser kommt bei einem nachfolgenden Arbeitsschritt zum Einsatz. Nachdem Anode und Kathode beschichtet sind, werden sie mit einem Separator getrennt und aufgerollt. Dieser fingergroße »Wickel« kommt in einen Behälter und wird schließlich mit ihm verschweißt.

Das innovative Fertigungsverfahren zum Fügen von Metallen besitzt eine hohe Geschwindigkeit und Maßgenauigkeit von bis zu $\pm 0,01$ mm. Dabei schont Laserschweißen auch das Material. Es verzichtet sich nicht. Denn der Laser gibt die Energie punktgenau innerhalb kürzester Zeit ab.

Werden dem Prozess noch eine Scanneroptik hinzugefügt und ein Faserlaser genutzt, können komplexe 3D-Geometrien bearbeitet werden, ohne das darunter befindliche Werkstück zu bewegen. Dies spart nicht nur Zeit, sondern auch Werkzeuge, die zur Bewegung und Positionierung des Werkstücks notwendig wären.

Digitalisierung des Laserschweißens

Die Herausforderung ist, das Gerät für die digitale Produktion tauglich zu machen. Sensoren ermitteln die Güte der Schweißnaht, und eine Wärmebildkamera erkennt die Temperaturverteilung. Quasi in Echtzeit überträgt ein OPC-UA-Server die Prozessdaten der Laserzelle an eine übergeordnete Cloud. Über diese kann der Prozess detailliert überwacht und die Laserparameter dynamisch angepasst werden. Die gespeicherten Daten lassen sich auch im Nachgang zur Qualitätsbeurteilung und zum Anpassen der Prozessparameter für nachfolgende Prozessschritte heranziehen. Ziel ist es, den Vorgang zu automatisieren, sodass sich der gesamte Schweißprozess selbst steuert.



Abb. 6: Laserschweißen in der Batteriezellenproduktion

Automatisierung und Digitalisierung der Batteriezellenmontage

Die Montage von Lithium-Ionen-Batteriezellen, die Assemblierung, ist ein besonders herausfordernder Arbeitsschritt: Die Elektroden werden in ein Gehäuse gesteckt, mit einem flüssigen Elektrolyt benetzt und befüllt und schließlich wird der Behälter verschlossen. Schon winzige Verunreinigungen genügen, um später einen Kurzschluss zu verursachen, der einem Bauteil ausfall gleichkommt. Das verknüpfende Element von Assemblierung und Digitalisierung ist der intelligente Werkstückträger.

Es gibt verschiedene Bauformen von Batteriezellen. Die IPA-Wissenschaftler konzentrieren sich auf das zylindrische Zellformat, hier sind die Elektroden wie eine Roulade zu einem Wickel aufgerollt. Ihr Ziel ist es, den Wickel zuverlässig handzuhaben und vollautomatisch und ohne Beschädigung in das Gehäuse einzusetzen. Das ist umso schwieriger, als die Fügebauteile keine gleichbleibenden Eigenschaften haben, sondern jeder Wickel ein Einzelstück ist. Zusätzlich vorgesehene Sensoren sollen deshalb die Wickel vor dem Einbringen abtasten und seine Eigenschaften wie die exakten Abmessungen und die Oberflächenbeschaffenheit messen, um so auf beim

Einsetzen auftretende Toleranzabweichungen entsprechend reagieren zu können.

Der Aufwand ist nötig, weil schon kleine Abweichungen der relativen Lage der einzelnen Fügepartner die Funktionsfähigkeit der Zelle beeinträchtigen. Als sehr kritisch einzustufen sind die beim Handhaben und der Montage des Wickels bestehenden Gefahren der Beschädigung der Elektrodenoberfläche durch Kollision und die Generierung von Partikeln durch Abrieb. So kann bereits ein kleinstes Partikel im späteren Betrieb zu einem Kurzschluss und damit zu einem Ausfall führen. Das IPA arbeitet daher an einer automatisierten und digitalisierten Montagelösung, die in einem erweiterten speziellen Laborbereich umgesetzt wird. Da unter anderem die Reinheit und Luftfeuchtigkeit erheblichen Einfluss auf die erreichbare Qualität hat, herrschen im Labor die reinen und gleichbleibend trockenen Umgebungsbedingungen, die für die Montageprozesse erforderlich sind. Die Fertigstellung eines betriebsbereiten MontageLABs ist für Ende 2019 geplant.

Automatisierte Montage von Wickel und Becher

Steckt der Wickel in dem Becher, der das Gehäuse bildet, ist die Arbeit noch lange nicht erledigt. Zunächst muss er am Becherboden angeschweißt werden.

Dieses erfolgt derzeit durch Widerstandsschweißen. Dabei muss die erforderliche Schweißelektrode hochpräzise und kollisionsfrei axial durch den freien Kanal im Wickelzentrum geführt und an der Verbindungsstelle mit definierter Kraft aufgesetzt werden. Sich dabei an der Verbindungsstelle ablegende Verunreinigungen oder eine fehlerhafte Positionierung des Werkzeugs haben Auswirkung auf die Verbindungsqualität. Der Ansatz der IPA-Experten ist auch hier die Integration zusätzlicher Sensoren zur Prozessüberwachung und Qualitätskontrolle. Dieser gilt auch für den im Zuge der weiteren Montage vorgesehenen Verbindungsprozess zur Kontaktierung des oberen Ableiters.

Ein weiterer entscheidender qualitäts- und sicherheitsrelevanter Arbeitsschritt ist das Einbringen des flüssigen Elektrolyts in die vormontierte Becherbaugruppe unter definierten trockenen Umgebungsbedingungen und Schutzgasatmosphäre. Hierbei muss der Elektrolyt in den Wickel eindringen, was dem Einpressen einer Flüssigkeit in einen Backstein gleicht. Dies kann je nach Zustand einige Minuten dauern und unterschiedliche Dosiermenge erforderlich machen. Auch dieser Vorgang muss zuverlässig gestaltet und die Fülldauer hinsichtlich der Serienproduktion deutlich reduziert werden. Allerdings ist Vorsicht geboten: Füllt man zu viel Elektrolyt ein, kommt die Zelle verschmutzt aus der Anlage. Füllt man zu wenig ein, ist die Leistung der Zelle vermindert. Sensoren sollen den Vorgang deshalb überwachen und für optimale Befüllung sorgen.

Werkstückträger als verknüpfendes Element

Neben der vorgesehenen prozessspezifischen Adaption zusätzlicher Sensorik in den einzelnen Montagestationen wird am IPA ein neuartiger intelligenter Werkstückträger eingesetzt werden. Dieser ermöglicht über die Funktionalität herkömmlicher Werkstückträger hinaus die aktive Kommunikation mit der Fertigungssteuerung, das Monitoring der Umgebungsbedingungen, das durchgängige Tracking sowie die Interaktion mit dem Bediener. Er bildet damit ein Kernelement der Digitalisierung bei der Montage und stellt das Bindeglied zu den vor- und nachgeschalteten Prozessen dar. Damit wird der Forderung einer durchgängigen Losverfolgung nachgekommen.

Die Implementierung der Maßnahmen in eine Industrie-4.0-Umgebung soll ein cloudbasiertes Verarbeiten und serviceorientiertes Verwerten der Prozessdaten ermöglichen und so zur Steigerung von Qualität und Durchsatz einen wesentlichen Beitrag leisten.



Abb. 7: Modell des für den Einsatz in der digitalisierten Batteriezellenproduktion konzipierten intelligenten Werkstückträgers (ZDB.smartWT)

Alle Abbildungen:

Quelle Fraunhofer IPA