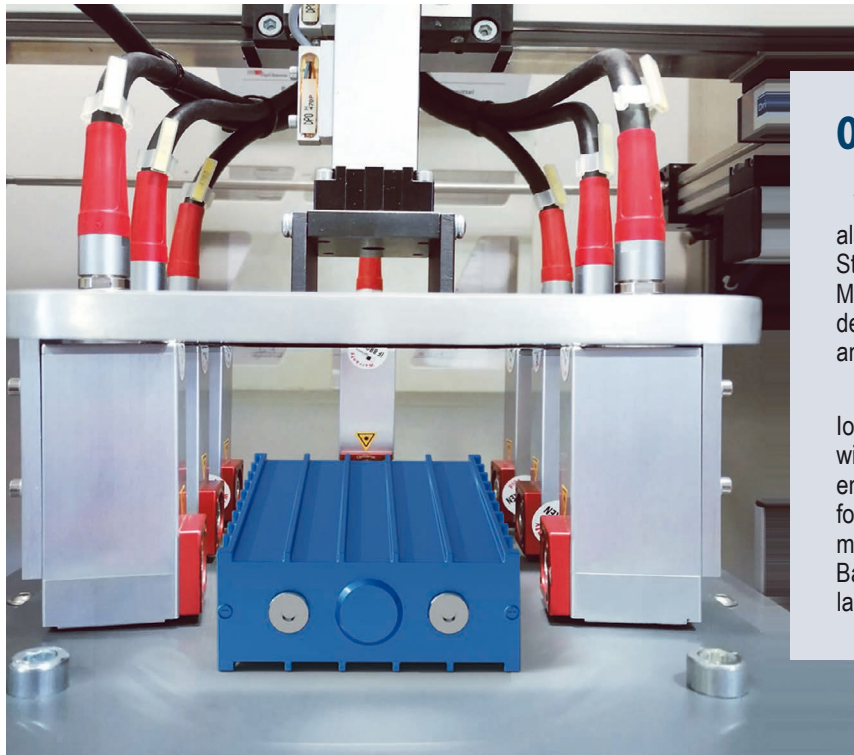


Qualitätssicherung in der Batterieproduktion

Inline-Prüftechnik von Lithium-Ionen-Batterien



OptiSense goes Battery

Vor über zwanzig Jahren ging OptiSense als Spin Off des Fraunhofer Instituts an den Start. Heute gilt der Hersteller aus Haltern als Marktführer miniaturisierter Messlösungen, deren Qualität und Technologie als "Designed and Made in Germany" sprichwörtlich ist.

Das gilt auch für die Messung an Lithium-Ionen-Batteriezellen. In diesem Whitepaper wird gezeigt, dass mithilfe der von OptiSense entwickelten, speziellen Prüftechnik ein fotothermisches "Frühwarnsystem" entsteht, mit dem sich Ausschuss reduzieren und die Batterieherstellung kontinuierlich verbessern lassen.

Damit eine Lithium-Ionen-Batterie wettbewerbsfähig ist, muss sie kostengünstig hergestellt werden, eine hohe Energiedichte aufweisen und möglichst lange halten. Bei der Fertigung von Batteriezellen in millionenfacher Stückzahl ist eine hohe Qualität enorm wichtig, denn eine fehlerbehaftete Produktion kann im Extremfall zu Selbstzerstörung und Brand der Batterie führen. Vor allem muss die Batterie also sicher sein.

Produktionsintegrierte Prüfsysteme - idealerweise gekoppelt mit intelligenten Datenkonzepten - werden dabei mehr und mehr zu einem zentralen Element für eine effektive Qualitätssicherung und der damit einhergehenden erhöhten Wirtschaftlichkeit in der Batterieproduktion.

Einen wichtigen Beitrag zu den Aspekten Kostensenkung, Ressourcenschonung und Sicherheit für die Lithium-Ionen-Batterien kann hier die photothermische Schichtdickenmessung leisten, wie sie von OptiSense angeboten wird.

Leistungsfähige und kostengünstige Energiespeicher als Schlüsselkomponente im Wettbewerb

Die Produktion von Lithium-Ionen-Zellen steht vor großen Herausforderungen. Eine rapide steigende Nachfrage bei gleichzeitig wachsenden Anforderungen an Qualität und geringe Preise setzen Zellhersteller weltweit unter Druck. Daher gilt es, die Prozesseffizienz und -stabilität kontinuierlich zu erhöhen, sowie die Wettbewerbsfähigkeit und Nachhaltigkeit über die nächsten Jahre hinweg weiter abzusichern.

Um diese Ziele zu erreichen, sind bestehende Ansätze jedoch nicht länger ausreichend. Für die zukünftige Verbreitung von Lithium-Ionen-Batterien zur mobilen oder stationären Energiespeicherung gilt es, die Fertigungskosten der Batteriezellen weiter zu senken. Für eine wirtschaftliche Herstellung sind deshalb weniger Produktionsfehler und die damit verbundenen geringen Ausschussraten eine zentrale Stellschraube.

Ausschussraten als zentrale Stellschraube

Um die bestmögliche Qualität in der Batterieproduktion sicherzustellen, sollten Mängel bereits früh im Fertigungsprozess - also noch vor der Weiterverarbeitung - detektiert werden. Bisher werden Batterien fast ausschließlich am Ende der Wertschöpfung im sogenannten End-of-Line-Test auf funktionelle Fehler geprüft. Marktreife Prüfverfahren für diese anspruchsvollen Aufgaben sind kaum existent, da traditionelle Messverfahren, wie z.B. mit Wirbelstromsensoren durch den direkten mechanischen Kontakt den Prozessfluss beeinträchtigen würden. Mit der von OptiSense entwickelten photothermischen Messtechnik erhalten Hersteller von Lithium-Ionen-Batterien nun ein „Frühwarnsystem“ an die Hand, das Batteriekomponenten bereits im Produktionsprozess prüfen kann.

Photothermisches Prüfverfahren für die Zellfertigung

Um Produktionsfehler bei den verschiedenen Zellformaten frühzeitig



Die speziell entwickelte photothermische Inline-Prüftechnik optimiert die Qualität der Batterieherstellung kontinuierlich: vom Slurryauftrag über die Coil-Prüfung (li) bis zur Messung der funktionsrelevanten Lackschichtdicke auf dem Gehäuse der Batterie

zu erkennen, entwickelte der deutsche Hersteller OptiSense ein Prüfsystem, das im Wesentlichen auf Photothermie zurückgreift, um die Dicke von Beschichtungen – hier Elektroden und Isolation der Batteriezeile – berührungslos und zerstörungsfrei zu ermitteln. Dabei werden die unterschiedlichen thermischen Eigenschaften von Beschichtung und Untergrund genutzt, um die absolute Schichtdicke zu bestimmen.

Die Oberfläche der Beschichtung wird mit einem kurzen, intensiven Lichtimpuls um einige Grad aufgeheizt und kühlt anschließend durch Ableitung der Wärme in tiefere Bereiche wieder ab. Dabei sinkt die Temperatur umso schneller, je dünner die Beschichtung ist. Der zeitliche Temperaturverlauf wird mit einem schnellen, hochempfindlichen Infrarotsensor erfasst und in eine entsprechende Schichtstärke umgerechnet.

Präzise Vermessung

Durch den punktförmigen Messfleck lassen sich dabei auch Ecken und Kanten kleinster Bauteile präzise vermessen. Die dabei gewonnenen Datenmengen werden durch ein intelligentes Konzept aggregiert, strukturiert und ausgewertet. Somit wird es für Batteriehersteller möglich, Fehlermuster zu erkennen, Produktionsabläufe zu optimieren und ein ganzheitliches Produktionsdatenmanagement zu etablieren. Dies eröffnet völlig neue Qualitätskriterien und Standards in der Batteriezellfertigung.

Die Batterieherstellung

In den nachfolgend dargestellten Prozessstufen der Batterieherstellung können die Zellen in den unterschiedlichen Produktionsphasen mit dem Messverfahren von OptiSense geprüft werden. Durch das Inline-Prüfsystem ist es möglich, bereits während der Herstellung zerstörungsfrei Schichtdickenintoleranzen zu detektieren.

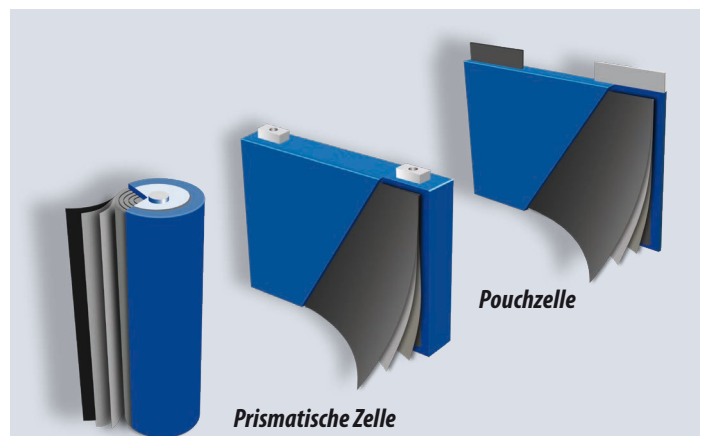
Messung der Slurry-Beschichtung

Im ersten Schritt werden die pulverförmigen Ausgangsstoffe der Elektroden mit Wasser und Lösungsmittel gemischt.

Für die Anode ist das vor allem Graphit, also Kohlenstoff. Für die Kathode ist es ein Metalloxid bestehend aus Nickel, Kobalt, Mangan und natürlich Lithium. Aus den Bestandteilen entstehen Elektrodenpasten, die man Slurry nennt. Die Slurries werden auf dünne, metallische Trägerfolien aufgetragen. Die Paste der Kathode kommt auf eine Alufolie, die der Anode streicht man auf Kupferfolie. Bereits in diesem frühen Prozessstadium ist es mit Hilfe des OptiSense-Verfahrens möglich, Aussagen über die Qualität der Schichtdicke zu treffen. Die Methodik wurde vom Hersteller bereits in Serienversuchen im Laboraufbau erfolgreich an Elektroden getestet.

Das Besondere beim Slurry-Auftrag

Der Slurry-Auftrag geschieht beidseitig, die Folie kann also nicht abgelegt werden. Sie schwebt durch eine



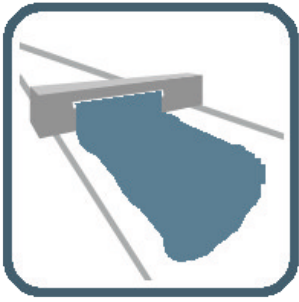
Rundzelle

Prismatische Zelle

Pouchzelle

Rundzelle, prismatische Zelle und Pouch-Zelle

Lithium-Ionen-Batteriemodule sind aus mehreren Batteriezellen zusammengesetzt. Jede Batteriezelle besteht dabei aus Anode, Kathode, einem Separator, sowie den flüssigen, ionenleitfähigen Elektrolyten. Durch flüssige Elektrolyten bewegen sich die Lithium-Ionen von einem Pol zum anderen. Das geschieht in einem Vakuum, so dass keine Luft eindringt. Die Batteriezellen übernehmen die zentrale Aufgabe der Batterie: die Speicherung und Freisetzung von Energie. Je nach Anwendung – z. B. in der Unterhaltungselektronik oder in der Automobilindustrie – unterscheiden sich Zellgrößen sowie deren Format. Die Mehrheit der Batteriezellen ist in drei Formaten erhältlich: zylindrisch, prismatisch und als dünne, biegsame Pouch-Variante. Die verschiedenen Zellformate werden zwar in ähnlichen Prozessschritten gefertigt, ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch in der Herstellung: bei der zylindrischen Zelle werden die Elektroden und Separatoren gewickelt, bei der Pouch-Zelle werden diese gestapelt. Die Komponenten einer prismatischen Zelle können mittlerweile sowohl flach gewickelt als auch gestapelt werden. Das Gehäuse der prismatischen Zelle besteht – im Gegensatz zur Pouch-Zelle – aus festem Material, meist Metall.



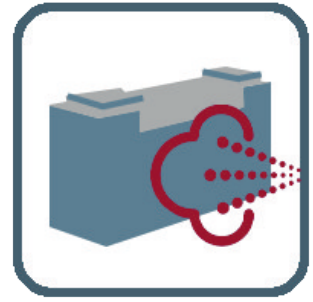
Slurry-Auftrag:
Auftragen des Batteriepulvers



Trocknung:
Verdampfung der Lösungsmittel



Walzen und Schneiden:
Verdichtung der Elektroden und
Zuschnitt der Folie



Zell-Finishing:
Elektrodenfolien stapeln und
Versiegelung der Außenhaut

Maschine zum Trocknen auf einem Luftkissen. Bereits nach diesem Prozessschritt eröffnen sich signifikante Kostensenkungspotenziale durch Detektion von Fehlbeschichtungen und Vermeidung von Trocknungsrisen. Die leistungsstarken und modularen Prüfsysteme der „Paint Checker industrial Tube“ Sensoren eignen sich besonders für diese anspruchsvolle Aufgabe durch die Integration in den Automationsprozess einer solchen Produktionslinie.

Elektroden-Prüfung via OptiSense-Technik

Im nächsten Schritt durchläuft die Folie ein Walzwerk, der Fachbegriff lautet Kalandrieren. Bei dieser Verdichtung wirken 200 Tonnen Druck auf die Folie. Das Ziel ist eine einheitliche Dicke, der Wert darf nur einige Mikrometer von der gewünschten Höhe abweichen. Die OptiSense-Technik kann die Schichtdicke der gewalzten Folie, also das Anodenmaterial (Graphit) auf Kupferfolie und das Kathodenmaterial (Lithium-Verbindung) auf Aluminiumfolie, prüfen. Die kurzen Messzeiten der OptiSense-Technik prädestinieren das berührungslose Verfahren für die Inline-Charakterisierung während des Kalandrierens von Lithium-Ionen-Batterien. Dafür werden die Sensoren an verschiedenen Positionen an der Walzanlage integriert. Durch die Kombination vieler einzelner Sensoren zu einem Sensor-Array steigt die Detektionssicherheit an, gleichzeitig ist der Aufbau weniger anfällig für Fehlmessungen.

Die Coil-Prüfung

Für eine Batteriezelle ist das Folienband noch zu breit, darum wird es in schmale Längsstreifen geschnit-

ten. Nun hat man ein langes, schmales Elektrodenband, das maschinell auf die richtige Länge gebracht wird. Auch die weiße Separatorfolie, die zwischen die beiden Elektroden kommt, wird auf Länge geschnitten. Und auch in diesem Prozessschritt – nach dem Trocknen und Kalandrieren – kann das photothermische Prüfsystem gewinnbringend eingesetzt werden, um Fehler wie Schichtinhomogenität berührungslos zu untersuchen und Ausschuss zu vermeiden.

Das Zell-Finishing

Nachdem die beschichteten Elektrodenfolien getrocknet, gewalzt und auf die entsprechende Größe zugeschnitten sind, werden sie zu Batteriezellen assembliert. Dazu stapeln Maschinen die einzelnen Blätter. In einer Zelle liegen mehrere Stapel übereinander. Überstehende Leiterföhnchen werden abgeschnitten und so die Elektroden auf einheitliche Länge gebracht. Die Föhnchen bilden den Anschluss zur Energiezufuhr, also den Plus und Minuspol

der Zelle. Sie sind die Verbindung zur Außenwelt, alle innenliegenden Föhnchen im Zellstapel werden per Laser miteinander verschweißt. Bei Pouch-Zellen landet der fertige Zellstapel in einer Alufolie. Sie wird später so versiegelt, dass ein wasserdichter Beutel entsteht. Die Pouch-Zelle ist biegsam. Dank ihrer großen Oberfläche kann Wärme gut abgeleitet werden. Bei prismatischen Zellen umgibt ein Gehäuse die Batterie, das durch einen speziellen Lack versiegelt und damit geschützt wird. Die Schichtdickenprüfung des Lacks ist mit dem modernen Opti-Sense-Verfahren bereits erfolgreich in der Linie im Einsatz – und zwar im Automobilbereich:

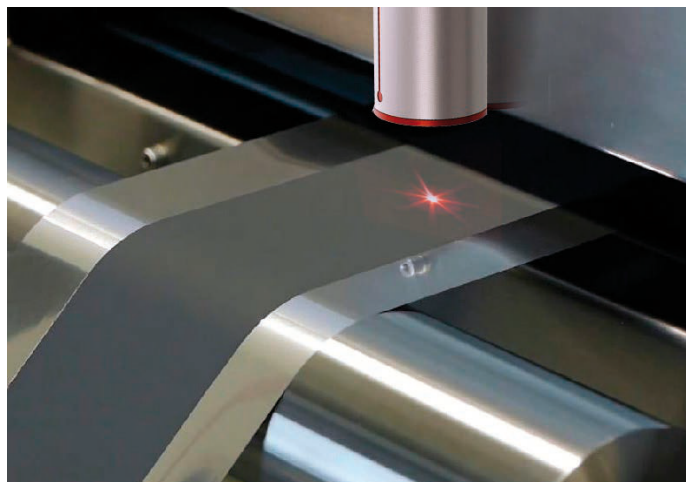
Von der Batteriezelle zum Modul

Viele Automobilhersteller verwenden zur Energiespeicherung in ihren E-Mobilen flache Pouch-Zellen, die sich aufgrund ihrer flexiblen Hülle in beliebiger Form herstellen und falten lassen. Als Schutz gegen Beschädigungen und zur Wärme-

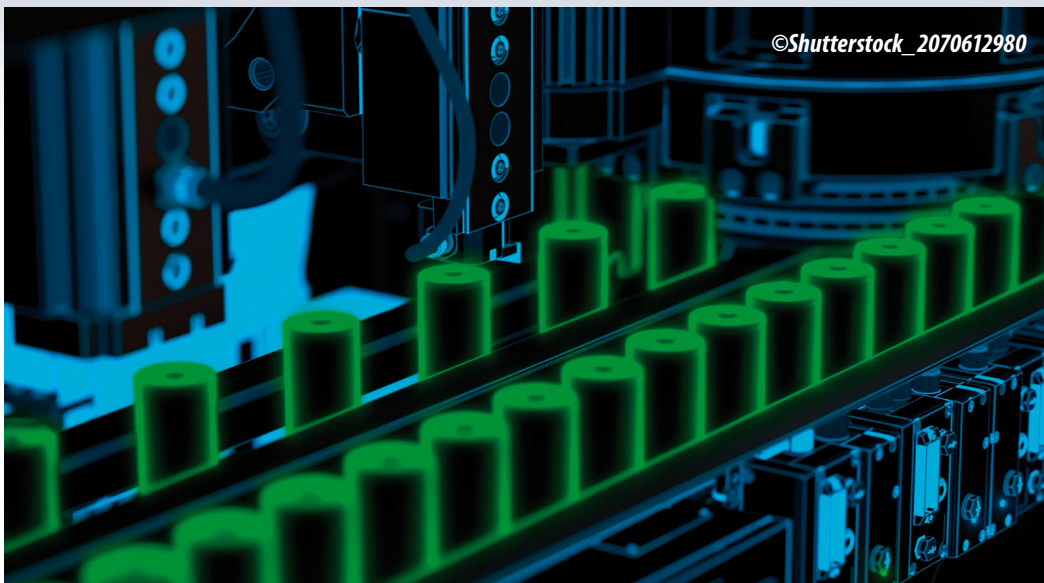
ableitung erhalten die Zellen ein stabiles Aluminiumgehäuse, das hermetisch laserverschweißt wird. Das Gehäuse wird je nach Hersteller anschließend mit einem lichterhärtenden, Lack beschichtet, der direkt im Anschluss in einer UV-Kammer ausgehärtet wird. Mehrere dieser Zellen werden zu Batteriemodulen zusammengefasst, deren Größe und Anzahl wiederum Leistung und Reichweite des Fahrzeugs bestimmen. Dabei liegen bis zu 800 Volt Spannung an – deutlich mehr als an der heimischen 230 Volt Steckdose. Deshalb müssen die Zellen zuverlässig voneinander isoliert werden, um einen Kurzschluss und ein mögliches Abbrennen der ganzen Batterie sicher zu verhindern. Dazu wird das Zellenäußere mit einer Beschichtung versehen, die sowohl die Oberfläche schützen als auch die notwendige Isolationsfunktion übernehmen muss. Die Beschichtungsdicke ist dabei ein sicherheitsrelevanter Parameter, den es in der Produktion sorgfältig zu überwachen gilt. Mithilfe der photothermischen Technik lassen sich die Schichtdicke genau überprüfen.

Beschichtungsdicke des Zelläußeren ist sicherheitsrelevanter Faktor

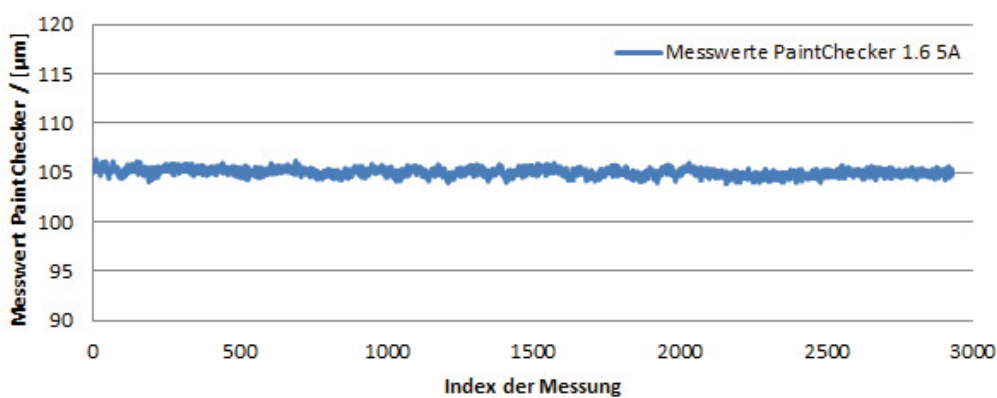
Da die Beschichtungsdicke eine funktionskritische Kenngröße ist, müssen alle Arten von Beschichtungsfehlern wie ungleichmäßiger Lackauftrag oder Lackverlauf aber auch Beschädigungen, Kratzer, Risse oder eingeschlossene Fremdpartikel wie Staub oder Fussel zuverlässig erkannt werden. Auch hier ist eine berührungslose, 100-Prozent-Prüfung schon vor dem Aushärten sinnvoll: Dazu fährt jede Zelle direkt nach der Applikation auf einem Trans-



OptiSense-Technik prüft das Coil, ein langes, schmales Elektrodenband



Messwerte PaintChecker 1.6 5A



Messmittelfähigkeit unter Beweis gestellt: Die äußerst geringe Streuung der Messwerte belegt die hohe Qualität der photothermischen Schichtdickenmessung

portband in eine Messstation, in der die Dicke der Beschichtung an mehreren Stellen von OptiSense-Systemen berührungslos geprüft wird. Mit dem photothermischen Messverfahren steht eine schnelle, quantitative Schichtdickenbestimmung zur Verfügung, die genaue, reproduzierbare Ergebnisse liefert. Allerdings sind kurze Taktzeiten und beengte Platzverhältnisse an der Tagesordnung und bedeuten einige ganz besondere Herausforderungen. Um die Qualität der Beschichtung insgesamt beurteilen zu können, wird wie oben skizziert an mehreren Stellen gemessen. Aber die Messzeit lässt sich physikalisch bedingt nicht beliebig verkürzen. Das Anfahren mehrerer Messpunkte nacheinander dauert zu lange und für eine simultane Mehrpunktmessung sind die konventionellen, am Markt verfügbaren Sensoren schlichtweg zu groß.

Deshalb wurde ein System entwickelt, das mehrere Punkte gleichzeitig vermessen kann und dessen

Sensoren klein genug sind, um sie im eng begrenzten Bauraum nebeneinander unterzubringen. Nach nur viermonatiger Entwicklungszeit entstand mit dem PaintChecker industrial n-gauge ein photothermisches Messsystem zur berührungslosen, zerstörungsfreien Schichtdickenmessung, das mehrere Sensorköpfe gleichzeitig ansteuern kann. Es eignet sich für feuchte und trockene organische Beschichtungen wie Farben, Lacke und Pulver auf Metall, Gummi und Keramik. Das System besteht aus einem zentralen Controller, an den bis zu acht Sensoren über Kabel anschließbar sind. Zur softwareseitigen Integration in die Fertigungsanlage hat der PaintChecker industrial n-gauge verschiedene Schnittstellen zu einer übergeordneten SPS.

Performance-Parameter für Anwendungen in der Elektromobilität

Indem der Strahlengang der Optik um 90° gefaltet wurde, gelang es,

den Sensorkopf soweit zu verkürzen, dass er auch in äußerst beengte Bauumgebungen passt. Mit dem nur 150 g leichten Winkelsensor können bei gerade einmal 40 mm Bautiefe Schichtdicken bis 300 µm schnell, genau und reproduzierbar gemessen werden. Mehrere Beschichtungsanlagen wurden inzwischen mit den neuen OptiSense-Prüfsystemen ausgestattet und lieferten sofort hervorragende Ergebnisse. Dabei unterliegt die Beschichtungsdicke als funktionskritische Qualitätskenngröße strengen Anforderungen an die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messung. Im Rahmen einer Messmittelfähigkeitsanalyse konnte das photothermische Messverfahren von Optisense einmal mehr seine Überlegenheit unter Beweis stellen. Nach 6 ½ Stunden Dauertest mit über 2.900 Messzyklen lag die Standardabweichung der Messung unter einem halben Mikrometer und war damit weit genauer als das, was mit üblichen Wirbelstrom- oder magnetinduk-

tiven Messverfahren erreicht werden kann. Die gewonnenen Erkenntnisse der E-Mobilität für Personenkraftwagen lassen sich auf die Aufgabenstellungen für Nutzfahrzeuge, E-Bikes sowie andere Zellformate übertragen.

Digitalisierung der Batterieherstellung

Mit Blick auf den Transformationsprozess spielt eine vernetzte, digital unterstützte Produktion und Qualitätssicherung von Batteriezellen und -modulen eine immer größere Rolle. Die Digitalisierung der industriellen Produktion ist ein Schlüssel, um die gesamte Fertigungskette zu optimieren und somit die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen zu steigern. Daher erprobt OptiSense auf industrienahen Pilotlinien innovative datengetriebene Ansätze der Prozessüberwachung, Steuerung und Qualitätssicherung. So können Batterieherstellungsprozesse modular und bedarfsgerecht ausgerichtet werden, um die Produktqualität signifikant zu erhöhen und die Wirtschaftlichkeit der Batterieproduktion zu steigern.

Fazit

Dieses Whitepaper formuliert Lösungsangebote für die Großserienproduktion aller drei Lithium-Ionen-Batterieformate (Rund-, Prisma-, Pouch-Zelle) in gleich mehreren Herstellungsstadien: beim Slurryauftrag, in der Produktion der Elektrodenfolien, im Cell-Finishing und bei der Gehäuselackierung. Mit der von OptiSense entwickelten photothermischen Messtechnik erhalten Hersteller von Lithium-Ionen-Batterien ein „Frühwarnsystem“ an die Hand, dass Batteriefolien bereits vor dem Trocknen und auch über mehrere Produktionsschritte hinweg prüfen kann und damit Ausschuss deutlich minimiert. Beschichtungsdicken – immer unter den Aspekten der Kostensenkung, Ressourcenschonung und Sicherheit – sind der Flaschenhals in der Batterieproduktion. Die Referenzen und die Alleinstellungsmerkmale der Prüflösungen von OptiSense schaffen beste Voraussetzungen, sich nachhaltig und langfristig in dem Zukunftsfeld Batterieherstellung zu positionieren und sind Basis für eine wettbewerbsfähige Zellfertigung. ◀