



Neue Möglichkeiten für berührungslose Qualitätskontrolle

Inline-Inspektion von Batterien und Lackierungen mit Terahertz-Messtechnik

Die Elektroden sind die Kernstücke einer Batterie. Berührungslose Messtechniken können die Qualität der Elektroden schon während der Herstellung überwachen. Das Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM hat seine Terahertz-Messtechnik weiterentwickelt und bietet neue Möglichkeiten zur Inline-Beschichtungskontrolle von Batteriezellen oder nassen Lackierungen.

Jens Klier, Stefan Duran, Daniel Molter, Joachim Jonuscheit

Terahertz-Wellen liegen im elektromagnetischen Spektrum zwischen Infrarotlicht und Mikrowellen. Inspektionssysteme auf Grundlage von Terahertz-Strahlung arbeiten als optische Verfahren berührungslos und zerstörungsfrei.

Sie messen die Laufzeitunterschiede der an den Schichtgrenzen teilreflektierten Wellen und ermitteln daraus die Schichtdicke.

Damit ist die Terahertz-Messtechnik das einzige Verfahren, das Einzelschichten

in Mehrschichtsystemen im industrierelevanten Dickenbereich von 10 bis 1000 μm sowie auf verschiedenen Substraten wie Metall und Kunststoff präzise erfassen kann.

Schichtdickenmessung in der Batteriezellproduktion

Damit eine Batterie die optimale Leistung erbringt, muss die Beschichtung der Elektroden hinsichtlich Schichtdicke und Homogenität hohen Anforderungen genügen. Bisher wird die Schichtdicke mithilfe von Beta- und Röntgen-Strahlung ermittelt. Diese erfassen jedoch nur die Gesamtdicke, also die Folie mitsamt Beschichtung. Dies erfordert Differenzmessungen vor und nach dem Beschichten. Wenn dabei nicht immer an exakt derselben Bandposition gemessen wird, ist das Ergebnis fehlerhaft.

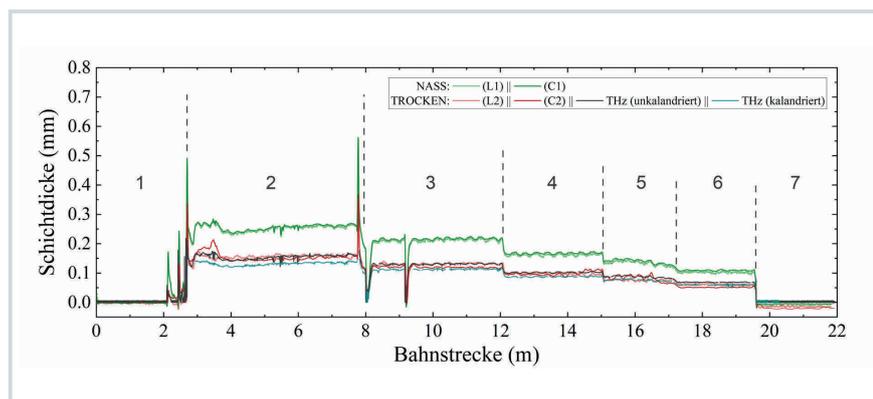
Terahertz-Strahlung bietet die Lösung für präzise Dickenmessungen von absorbierenden oder leitfähigen Schichten. Mit Terahertz-Systemen lassen sich solche Schichten schneller und genauer messen, denn die Messtechnik erfasst direkt die Dicke der Be-

Einsatz, um die Schichtdicke sowohl im nassen (L1/C1) als auch im trockenen (L2/C2) Zustand indirekt zu messen. Durch die zusätzliche Integration eines Terahertz-Sensors können die Ergebnisse der verschiedenen Messverfahren während des Beschichtungsprozesses miteinander verglichen werden. Im Rahmen der Versuche wurde eine Folie mit Lithium-Eisenphosphat beschichtet, einem gängigen Material für Kathoden. Die Anpassung der Pumpleistung an der Schlitzdüse sowie der Abstand zwischen Düse und Folie ermöglicht es, die Schichtdicke variabel zu gestalten.

Die gesamte Beschichtung lässt sich in sieben Phasen einteilen:

- Phase 1 und 7: Folie unbeschichtet
- Phase 2 bis 6: Auftrag von LFP mit unterschiedlicher Schichtdicke

Die Schichtdickenänderungen zwi-



Schichtdickenmessung während des Beschichtungsprozesses mit verschiedenen Sensoren.

© Fraunhofer ITWM

schichtung. Und das in einer Rekordzeit von weniger als fünf Millisekunden. Zahl und Position der Messköpfe sowie die Messfrequenz lassen sich flexibel an unterschiedliche Anforderungen anpassen.

Versuche liefern überzeugende Ergebnisse

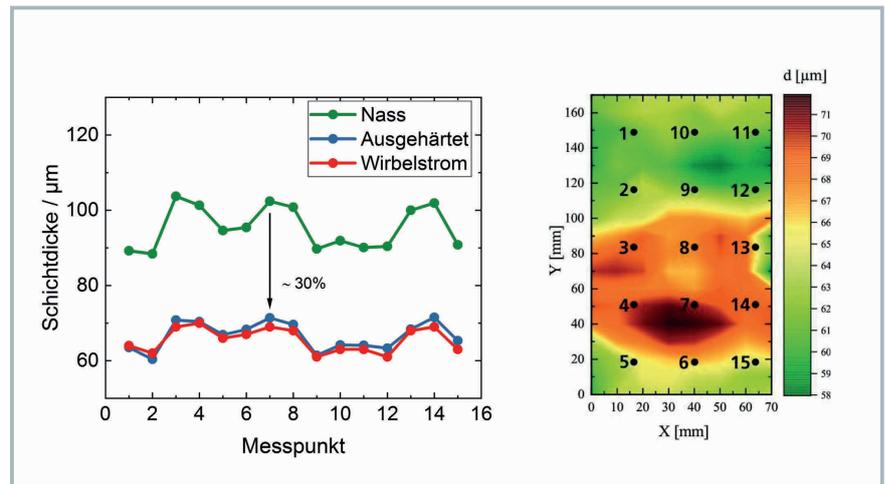
Die Ergebnisse von Versuchen zur Terahertz-Messtechnik sind vielversprechend und zeigen das große Potenzial dieser Technologie für die Produktion von Batteriezellen. Ein Beispiel hierfür ist ein Versuch an einer industriellen Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsanlage im Zentrum für digitalisierte Batteriezellproduktion des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung IPA in Stuttgart.

In dieser Anlage kommen laserbasierte sowie kapazitive Abstandssensoren zum

schen den einzelnen Phasen sind sehr gut erkennbar. Es fällt auf, dass die Messungen L2 und C2 in Phase 7 (Folie unbeschichtet) nicht den Wert 0 µm anzeigen, sondern eine deutliche Abweichung von circa -20 µm zeigen.

Diese Drift veranschaulicht ein häufiges Problem bei indirekten Messverfahren und erklärt die Abweichungen zur Terahertz-Messung, die als direkte Messmethode keine erneute Referenzierung benötigt.

Durch die anschließende Kalandrierung (Verdichtung) der beidseitig beschichteten Folie wird die Oberflächenrauheit verringert, und die elektrischen Eigenschaften der Kathode verbessern sich. Da bei den bisher eingesetzten Techniken (Beta- und Röntgen-Technik) nur die Gesamtdicke erfasst wird, erhält man keine spezifische Information zur Beschichtungsdicke auf >>>



Entwicklung der Schichtdicke während des Trocknungsprozesses. Die Werte wurden im nassen und im ausgehärteten Zustand mittels Terahertz-Messtechnik gemessen. Farbskalierungen entsprechen magnetinduktiven Messungen (rechts).

© Fraunhofer ITWM

INFORMATION & SERVICE

AUTOREN

Jens Klier, Stefan Duran, Daniel Molter, Joachim Jonuscheit

LITERATUR

Molter, D.; Ellenberger, K.-S.; Klier, J.; Duran, S.; Jonuscheit, J.; von Freymann, G.; Vieweg, N.; Deninger, A.: Kilohertz Pixel-Rate Multilayer Terahertz Imaging of Subwavelength Coatings Appl. Sci. 12 (10), 4964 (2022).

Mohammadzadeh, S., Keil, A., Jonuscheit, J., & Friederich, F.

Non-destructive characterization of electrode films for lithium-ion battery cells with an optoelectronic terahertz fmcw radar.

In 2023 20th European Radar Conference (EuRAD) (pp. 90–93). (2023)

ANSPRECHPARTNER

Dr. Joachim Jonuscheit

KONTAKT

Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM

Fraunhofer-Platz 1

67663 Kaiserslautern

T +49 631 31600 4911

joachim.jonuscheit@itwm.fraunhofer.de

www.itwm.fraunhofer.de/schichtdickenmessung-terahertz

Control, Halle 7, Stand 7301

der Ober- und Unterseite. Die Terahertz-Messtechnik hingegen kann die Beschichtungsdicken auf beiden Folienseiten getrennt ermitteln.

Mehrere Hersteller arbeiten an der Trockenbeschichtung von Batteriefolien. Dieser Ansatz verkürzt den Trocknungsprozess und führt zu einer signifikanten Reduzierung des CO₂-Ausstoßes, was die Umweltbilanz des Herstellungsprozesses verbessert. Die Terahertz-Messtechnik ist in diesem Zusammenhang besonders vorteilhaft, da der Einsatz von Beta- und Röntgenstrahlung aus prozessbedingten Gründen ausgeschlossen ist.

Nasslack-Inspektionssysteme auf Basis von Terahertz-Wellen

Auch für nasse Lackierungen bieten Terahertz-Systeme vielversprechende Möglichkeiten. Moderne Lackierungen bieten

nicht nur eine ansprechende Optik, sondern schützen auch effektiv vor Korrosion, Kratzern und Witterungseinflüssen. Der Aufbau einer Lackierung ist daher häufig komplex und erfordert den Einsatz verschiedener Technologien, die erst im Zusammenspiel optimale Ergebnisse liefern. Aufwendige Mehrschichtlackierungen finden nicht nur Anwendung im Automobil- und Flugzeugbau, sondern auch bei der Veredelung von Rotor- und Turbinenblättern, Schiffsrümpfen sowie Tabletten.

Für die Qualitätskontrolle ist es zunehmend wichtig, die Schichtdicken bereits früh im Lackierprozess zu messen. Ähnlich wie bei der Elektrodenbeschichtung besteht hier die Herausforderung darin, dass die Lackierung in diesem Stadium noch feucht ist und damit spezielle Anforderungen an die Messtechnik stellt: Während des

Industrie-Workshop: Schichtdickenmessung

Unsere Experten für Materialcharakterisierung und -prüfung präsentieren neueste Messtechnik in Aktion: In unserem Workshop für die Industrie am 5. November 2025 am Fraunhofer ITWM demonstrieren sie live berührungslose Verfahren zur Schichtdickenmessung und diskutieren Anwendungsmöglichkeiten zur frühzeitigen Pro-

zesskontrolle für unterschiedliche Branchen – von der Automobil- und Luftfahrtindustrie bis zur Medizintechnik. Teilnehmer haben die Möglichkeit, eigene Proben mitzubringen und gemeinsam mit unseren Experten erste Messungen vorzunehmen.

www.itwm.fraunhofer.de/seminar-schichtdickenmessung

Trocknungsprozesses ändert sich die Materialzusammensetzung des Films kontinuierlich, da Lösungsmittel oder Wasser verdampfen. Diese Variationen müssen durch präzise Messverfahren berücksichtigt werden, um die Umweltbelastung sowie den Ressourcenverbrauch im Lackierprozess zu minimieren.

Berührungslose und exakte Qualitätsprüfung

Im Rahmen eines Versuchs wurde der Fähigkeitsnachweis für die Schichtdickenmessung an Nassfilmen erfolgreich erbracht. Hierzu wurden Bleche kontrolliert lackiert, zwischengetrocknet und schließlich vollständig ausgehärtet. Nach jedem Schritt kam die Terahertz-Messtechnik zum Einsatz, um die Schichtdicke der Beschichtungen zu überprüfen.

In der ersten Messreihe wurde ein Blech mit einem Metallic-Basislack im relevanten Dickenbereich beschichtet. Die Messungen zeigen sowohl die Abnahme der Schichtdicke während des Trocknens, als auch eine hervorragende Übereinstimmung der mittels Terahertz- und Wirbelstrom-Sensorgemessenen Schichtdicke des getrockneten Lacks. Durch die hohe Messrate der Terahertz-Systeme sind schnelle, großflächige Rastermessungen möglich. Damit können Schichtdickenverteilungen feinaufgelöst erfasst und der Lackierprozess optimiert werden.



Das Messmodul des Terahertz-Messsystems kann individuell an die Messaufgabe angepasst und beispielsweise für Reflexionsmessungen auf einen Roboter montiert werden.

© Fraunhofer ITWM

Präzise messen ohne Gefahr für die Gesundheit

Die Terahertz-Messtechnik ermöglicht eine berührungslose und zerstörungsfreie Analyse von nassen und trockenen Filmen, sei es als Einzelschicht oder in einem Mehrschichtsystem. Geeignete Trägermaterialien sind Metalle, Kunststoffe und Verbundwerkstoffe wie CFK. Die innovative Technik misst bis zu 1.000 Messungen pro Sekunde und wertet diese online aus, wobei Schicht-

dicken im Bereich von 10 bis 1.000 μm mit einer Reproduzierbarkeit von besser als 1 μm bestimmt werden können.

Der Einsatz des Terahertz-Lackinspektionssystems ist unkompliziert: Der Arbeitsabstand kann je nach Aufgabenstellung zwischen 5 und 20 cm variieren. Zudem ist bei Terahertz-Wellen keine strahlenschutztechnische Abschirmung notwendig, da sie nicht ionisierend und somit gesundheitlich unbedenklich sind. ■