

Abbildende Wirbelstromsensoren zur hochauflösenden berührungslosen Abbildung von elektrischen Eigenschaften schlecht leitender Objekte

Henning Heuer^{1*}, Martin Schulze¹, Marcus Klein^{2♦}

Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren FhG IZFP Dresden,
Maria-Reiche Str. 2, 01109

Suragus GmbH, Dresden,

Krügerstraße 22, 01326

Zusammenfassung

Viele Verbundwerkstoffe (z.B. Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe) und Schichtsysteme (z.B. Photovoltaikzellen), die eine elektrische Leitfähigkeit aufweisen, lassen sich mit Hilfe fortgeschrittener Wirbelstromprüftechnik charakterisieren. Dieser Beitrag berichtet über eine neu entwickelte, abbildende Hochfrequenz-Wirbelstrommethode, mit der insbesondere schlecht leitfähige Objekte zerstörungsfrei geprüft werden können, die mit konventioneller Wirbelstromtechnik bisher nicht prüfbar waren. Damit können die Vorteile der Wirbelstromprüftechnik wie z.B. Kontakt- und Koppelmittelfreiheit, Schnelligkeit, Automatisierbarkeit auch in der Massenfertigung von Solarzellen oder CFK Strukturen genutzt werden.

1 Einleitung

Sowohl kohlefaserverstärkte Kunststoffe als auch Schichtsysteme und insbesondere Dünnschichtsysteme werden zunehmend in vielen Produkten eingesetzt. Bei allen Applikationen spielt die Messung der Homogenität und Schichtdicke eine zentrale Rolle. Hier sind besonders inline-fähige Verfahren gefragt, welche berührungslos arbeiten sowie sehr schnell und vakuumtauglich sind. [1][2] Besonders bei Schichtsystemen mit Schichtdicken im Nanometer- und niedrigem Mikrometer-Bereich sowie in mehrschichtigen Schichtsystemen bieten sich Wirbelstromverfahren an. Durch spezielle Sensoren sind solche Systeme sehr gut für die Inline Prüfung geeignet. Durch Optimierung von Messsystem, Sensoren und Auswertalgorithmen ist es möglich, die Grenzen des Messsystems stark aufzuweiten und sehr hohe Genauigkeiten zu erzielen. Im Beitrag werden Messergebnisse von abbildenden Wirbelstromverfahren anhand von aktuellen Beispielen aus den Bereichen Photovoltaik und CFK (kohlenstoffverstärkte Kunststoffe) gezeigt. So ist bei Solarzellen die Garantie der Effizienz und Leistungskonstanz für ein konkurrenzfähiges Solarmodul von großer Wichtigkeit. Um diese zu gewährleisten sind fertigungsnahe Prüf- und Kontrollschritte mit teils automatisierten Bewertungsverfahren notwendig. Ein standardisiertes und verbreitetes Prüfverfahren ist die Elektrolumineszenz-Prüfung (El-Prüfung) zur Detektion von Rissen im Silizium, Fingerunterbrechungen und Bereichen schlechter Frontseitenkontaktierungen. In diesem Kapitel werden als Alternative das bildgebende Wirbelstromverfahren und seine erweiterten Prüfmöglichkeiten im Vergleich zur El-Prüfung vorgestellt. Kohlefasermaterialien und deren Komposite gewinnen in verschiedensten Anwendungsbereichen zunehmend an Bedeutung. Im Unterschied zu metallischen Werkstoffen befinden sich die Erprobung technologischer

* Kontakt: henning.heuer@izfp-d.fraunhofer.de

♦ Suragus GmbH Sensors & Instruments <http://www.suragus.de>

Verfahrensparameter sowie eine entsprechend zertifizierte Qualitätssicherung für mehrlagige Aufbauten noch im Entwicklungsstadium. Für die Inline-Inspektion sowie die manuelle Kontrolle von unlaminiertem Rohgelege existiert noch keine adäquate Prüflösung. Bleiben Fehler im Ausgangsmaterial unentdeckt, kann dies zu weitreichenden Konsequenzen wie frühzeitiger Materialermüdung in der Materialpaarung führen. Häufig werden solche Fehler erst nach der Fertigstellung komplexer CFK-Baugruppen bemerkt, so dass die oft sehr aufwendig produzierten Teile verworfen werden müssen. Basierend auf dem am IZFP entwickelten Multifrequenzwirbelstrommesssystem können nun die Mehrzahl von auftretenden Fehlern, die während der Produktion des Rohgeleges entstehen, sichtbar gemacht werden.

2 Experiment - Hochfrequenz Wirbelstromprüfung

Zur Messung von sehr kleinen Leitfähigkeitsänderungen oder der Dicke sehr dünner Schichten, werden Wirbelstromverfahren mit sehr hohen Messfrequenzen benötigt. Die Frequenz mit der die Wirbelströme angeregt werden, beeinflusst die Eindringtiefe δ mit $\delta \sim 1/f$ (Skinneffekt) und die durch den sich zeitlich ändernden Fluss $U_{\text{ind}} \sim d\Phi/dt$ die Signalamplitude in der Messspule. D.h. mit steigender Frequenz nehmen die Eindringtiefe ab und die Signalamplitude zu. Das Fraunhofer IZFP in Dresden hat ein Gerätesystem entwickelt, mit dem die zerstörungsfreie Prüfung im Frequenzbereich bis 100 MHz Anregungsfrequenz ermöglicht wird. Die Gerätesystemplattform „EddyCus[®]“ beinhaltet angepasste Sensorik, Elektronik, Applikations- und Kalibrierungs-Prozeduren sowie Auswertalgorithmen. Zur Erstellung von Abbildern der elektrischen Eigenschaften von zu prüfenden Objekten werden ortsauflösende Wirbelstromsensoren mit einem mechanischen Manipulator über die Oberfläche des Prüfobjektes bewegt. Durch Auftragen der Messsignale über dem Messort werden C-Scans der Messwerte erzeugt. Zur Reduzierung von Scanzeit und für Inline-Anwendungen können auch Linien- oder Matrix- Sensoren verwendet werden. [3][4]

Der universelle Wirbelstrommessplatz EddyCus[®] MPECS (Multi Parameter Eddy Current Scanner) wurde entwickelt, um schnell und einfach Leitfähigkeitsbilder von strukturierten und unstrukturierten Schichten sowie mehrlagigen Schichtsystemen zu erstellen (Bild. 1). Da verschiedene Qualitätsparameter über die Abbildung der lokalen Leitfähigkeit bestimmt werden können, kommt das Gerät in vielen verschiedenen Industrien zur Anwendung. Das Gerät scannt mit 4 Frequenzen die zu charakterisierenden Prüfobjekte ab, wodurch zeitgleich Informationen aus unterschiedlichen Tiefen gewonnen und dargestellt werden. Eine umfangreiche Software unterstützt die Separation verschiedener Leitfähigkeitseffekte und erlaubt so die gezielte Auswertung bestimmter Eigenschaften.

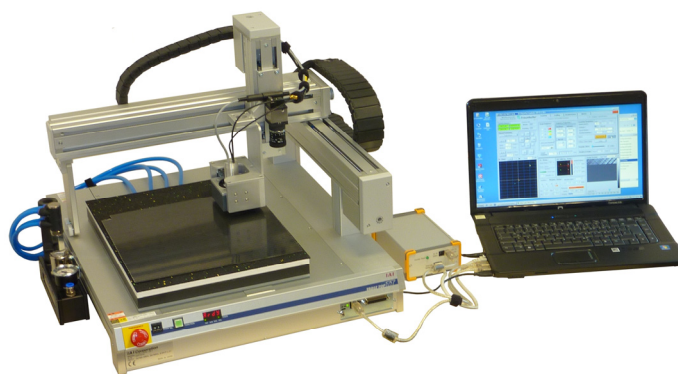


Bild. 1 EddyCus[®] MPECS - Abbildendes Wirbelstromprüfsystem der Suragus GmbH

3 Ergebnisse

3.1 Wirbelstromprüfung von Kohlefaserverbundwerkstoffen

Kohlenstofffasern weisen eine elektrische Leitfähigkeit (Graphit $\sim 3 \times 10^6$ S/m) von ca. 1/10 der Leitfähigkeit von Aluminium auf. Werden Kohlenstofffasern in einen Kunststoff

eingebettet und zu kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen verarbeitet, verringert sich die Summenleitfähigkeit auf ca. 1/1000 der Leitfähigkeit von Aluminium. Die Summenleitfähigkeit ergibt sich aus der Häufigkeit und der Leitfähigkeit der Kohlenstofffasern in einem Probenvolumen, der Übergangswiderstände benachbarter Fasern und der kapazitiven Kopplung der Fasern über den eingebrachten Kunststoff (oder Luft im Falle eines textilen Ausgangsmaterials). Wird dieses Material von außen einem elektromagnetischen Wechselfeld ausgesetzt, wird in den Kohlenstofffasern eine Spannung induziert, die zu einem Stromfluss innerhalb einer Faser (Wirbelströme) und zu Ringströmen in einem Fasernetzwerk (verbundene benachbarte Fasern) führt. Zusätzlich treten durch das die Fasern umgebene dielektrische Material kapazitive Effekte auf. Der im CFK angeregte Stromfluss weist ein Magnetfeld auf, welches dem Anregungsfeld entgegenwirkt und von außen gemessen werden kann. Anregung und Detektion des im CFK angeregten Wirbelstromflusses kann mit Induktionsspulen erfolgen. Durch abscannen eines Werkstoffes mit einer ortsauflösenden Induktionsspule (Abb.2) werden 2d Bilder generiert. Durch Verwendung mehrerer Anregungsfrequenzen können ohmsche Eigenschaften (Information über die Faserverteilung) von dielektrischen Eigenschaften (Information über den Kunststoff) gut separiert werden. Die Änderung der komplexen Impedanz der Messspule beim Scannen über die Probenoberfläche wird durch Realteil $\text{Re}(Z(f))$ und den Imaginärteil $\text{Im}(Z(f))$ bei der jeweiligen Frequenz beschrieben. (Abb. 2)

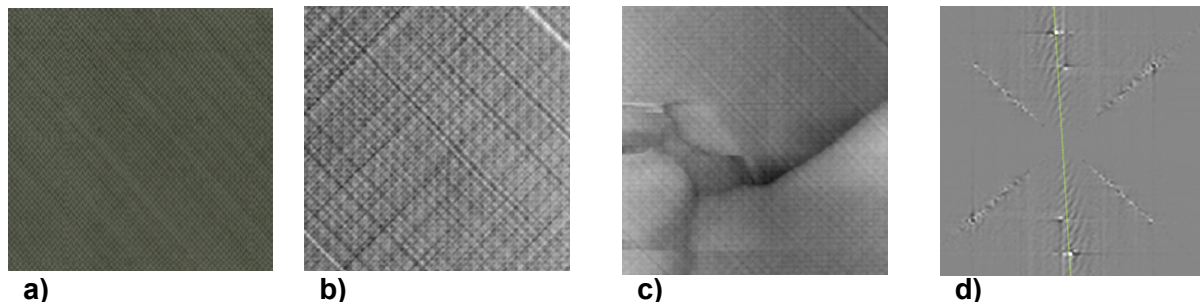


Bild.2 a) Photographie eines 30 x 30cm großen 5-Axial CF-Geleges, b) Realteil und c) Imaginärteil des Wirbelstromsignals der gleichen Probe. Bild d) zeigt eine 2d FFT des Realteils zur Texturanalyse.

Die Qualität der so gewonnen Bilder ist ausreichend für eine Orientierungsanalyse mittels 2d FFT. Aufgrund der geringen spezifischen Leitfähigkeit typischer CFK Materialien liegt eine optimale Prüffrequenz im Bereich zwischen 10 und 80 MHz. [3]

3.1 Dünnschichten und komplexe Dünnschichtsysteme

Dünne Funktionsschichten werden in einer Vielzahl von Anwendungen wie beispielsweise der Elektronik, Display- oder Photovoltaikindustrie eingesetzt. Durch die Notwendigkeit zur Kostenreduzierung bei gleichbleibend höchsten Anforderungen an Qualität und Zuverlässigkeit entstehen neue Anforderungen an die Prüftechnik zur Prozesssteuerung und Qualitätssicherung. Produkte aus den genannten Industrien sind in der Regel komplexe Mehrlagenaufbauten aus einer Vielzahl von dünnen Funktionsschichten, deren elektrische Eigenschaften und Defektfreiheit produktionsnah geprüft werden müssen. [4]

Ein wichtiger Qualitätsparameter von Dünnschichtsystemen ist der elektrische Schichtwiderstand, der Einflüssen von z. B. Schichtdicke, Mikrostruktur, chemischer Zusammensetzung unterliegt. Sinnvoll ist ein Schichtwiderstandsmonitoring insbesondere nach Abscheidungs- und Strukturierungsprozessen oder z.B. als finale Qualitätskontrolle. Ein leistungsfähiger Ansatz, um Informationen über den Schichtwiderstand und andere elektrisch charakterisierbare Größen zu erhalten, ist die hier vorgestellte hochauflösende abbildende Wirbelstromprüfung. Mit den Vorzügen der Wirbelstromtechnik (berührungslos, kontaktmittelfrei, schnell und geringer apparativer Aufwand) ist diese Methode gut in Produktionsprozesse integrierbar und arbeitet zerstörungsfrei. [5]

Es wurde ein Gerät für den Einsatz im Labor entwickelt, mit dem Schichtdicken-schwankungen, defekte Kontakte, Delaminationen, Kurzschlüsse, Risse, Fingerfehler, Verunreinigungen und Inhomogenitäten (Bild. 3) in dünn- und waferbasierten Solarzellen nachweisbar sind.

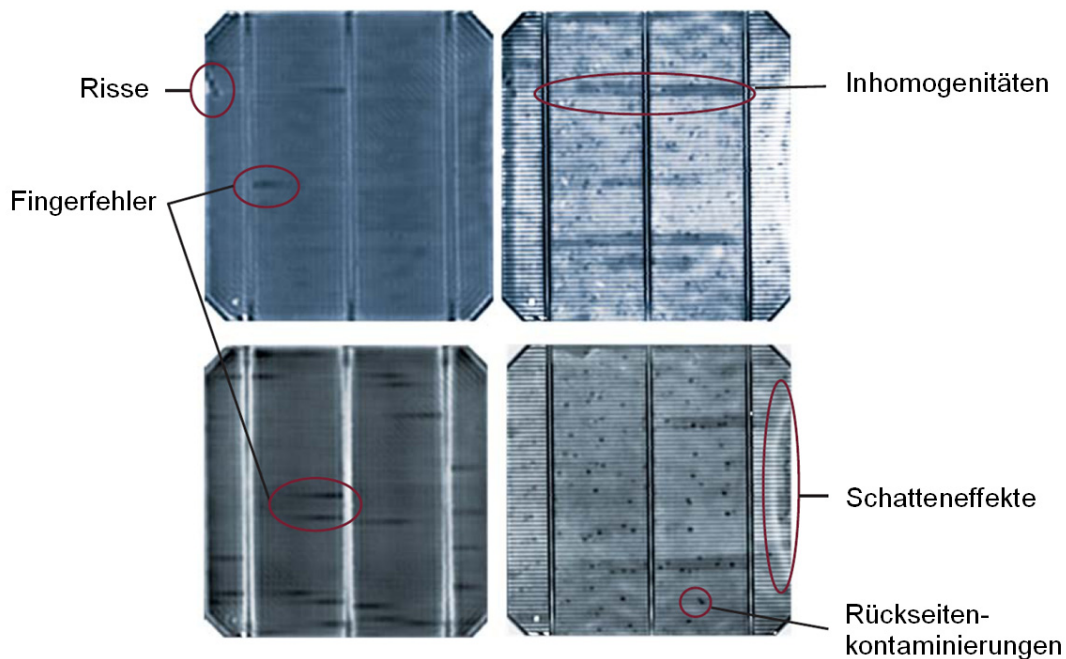


Bild. 3 Hochauflösende abbildende Wirbelstromprüfung an monokristallinen Silizium-Solarzellen zeigen Fehler in der Elektrodenstruktur(links), Inhomogenitäten sowie Rückseitenverunreinigungen (rechts)

Die Anzeigen auf der Zellenoberfläche (Bild 3 links) zeigen Qualitätsunterschiede der Siebgedruckten Fingerelektroden. Auf der rechten Seite in Bild 3 sind Rückseiten- und Bulk Kontaminationen deutlich zu erkennen. Mit keiner anderen Methode können diese Eigenschaften zerstörungsfrei und Inline detektiert werden. Auch Elektrolumineszenz reagiert nur auf die aktiven Bereiche der Solarzelle und liefert keine Information zum Zustand der Rückseite bzw. des nicht aktiven Volumens. Kontaminationen von der Rückseite können jedoch während des Betriebes der Solarzelle in die aktiven Bereiche (pn-Übergang) diffundieren und die Leistung der Zelle nach einer gewissen Betriebszeit reduzieren.

Literatur

- [1] H. Heuer, S. Hillmann, M. Röllig, M. H. Schulze, K-J. Wolter, „Thin Film Characterization Using High Frequency Eddy Current Spectroscopy“, IEEE Conference on Nanotechnology, Genua, 2009
- [2] DIN 54140 Zerstörungsfreie Prüfung; Induktive Verfahren (Wirbelstromverfahren); Teil 1 04.76: Allgemeines; Teil 2 03.84: Begriffe; Teil 3 09.87: Darstellung und allgemeine Eigenschaften von Spulensystemen
- [3] M. H. Schulze, H. Heuer, M. Küttner, N. Meyendorf, „Mehrfrequenz-Wirbelstromprüfverfahren zur Qualitätskontrolle bei der Produktion von Kohlefaser-Multiaxialgelegten“, Konferenzbeitrag DGZfP-Jahrestagung, 2009
- [4] S. Hillmann, M. Klein, H. Heuer, „Schichtdicken-Charakterisierung dünner, leitfähiger Schichtsysteme mittels Wirbelstromtechnik“, DGZfP-Jahrestagung - Poster, 2010
- [5] S. Hillmann, H. Heuer, N. Meyendorf, „High frequency eddy current device for near surface material characterizations“, Proc. of SPIE, Vol. 7293 729308-1, 2009