

Ortsaufgelöste Wirbelstromprüfung an mono- und multikristallinen Siliziumsolarzellen

Martin SCHULZE, Henning HEUER
Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Dresden
Maria-Reiche-Straße 2, 01109 Dresden

Kurzfassung. Die Garantie von Leistungskonstanz und Effizienz sind 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 Verfahren ist die Elektrolumineszenzprüfung (El-Prüfung) zur Detektion von Rissen im Silizium, Fingerunterbrechungen und Bereiche schlechter Frontseitenkontaktierungen. In diesem Posterbeitrag wird als Alternative das bildgebende Wirbelstrom Verfahren und seine erweiterten Prüfmöglichkeiten im Vergleich zur El-Prüfung vorgestellt.

Martin Schulze
Dr. Henning Heuer

Fraunhofer-Institut
für Zerstörungsfreie Prüfverfahren
(IZFP), Institutsteil Dresden

Tel.: +49 (0)351-26482 43
Email: martin.schulze@izfp-
d.fraunhofer.de

Einleitung

Die Garantie von Leistungskonstanz und Effizienz sind 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 Verfahren ist die Elektrolumineszenzprüfung (EL-Prüfung) zur Detektion von Rissen im Silizium, Fingerunterbrechungen und Bereiche schlechter Frontseitenkontaktierungen. In diesem Beitrag wird als Alternative das bildgebende Wirbelstrom Verfahren und seine erweiterten Prüfmöglichkeiten im Vergleich zur EL-Prüfung vorgestellt.

Grundlagen

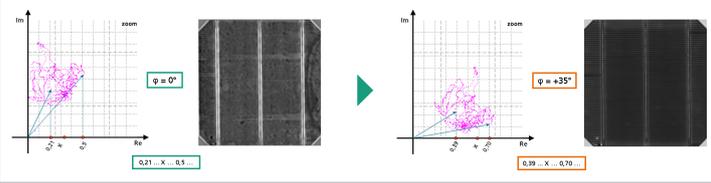


Abb.1:

Darstellung des Verfahrens der Offline Vektorrotation. Die komplexen Messwerte Z werden dabei auf die reelle Achse projiziert. Somit kann nachträglich zwischen Real- und Imaginärbild ein optimaler Phasenwinkel gefunden werden, bei welchem sich Fehler verstärken bzw. Störungen eliminieren lassen.

Die Nullpunkt kompensiert erfolgt dabei entweder in Luft oder auf einem homogenen und nachweislich fehlerfreien Gebiet auf der Probe.

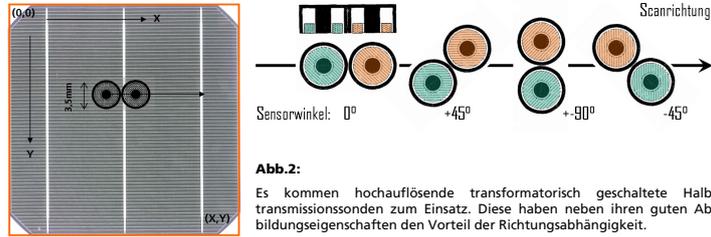


Abb.2:

Es kommen hochauflösende transformatorisch geschaltete Halbtransmissionssonden zum Einsatz. Diese haben neben ihren guten Abbildungseigenschaften den Vorteil der Richtungsabhängigkeit.

Voruntersuchungen

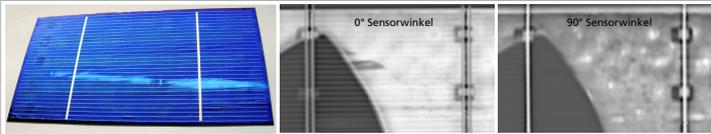


Abb.3:

Multikristalline Solarzelle mit teilweise fehlender Rückseitenmetallisierung (dunkle halb ovale Bereiche). Messungen wurden mit unterschiedlichen Sensororientierungen durchgeführt. Sehr deutlich ist das durch die Richtungsabhängigkeit hervorgerufene verschwommene Busbar- (0°) und Kantensignal (90°) zu erkennen. Die Finger erscheinen bei paralleler Sensororientierung erwartungsgemäß kontrastreicher. Die hellen Bereiche im rechten Wirbelstrom C-Scan (90°) entstehen mit hoher Wahrscheinlichkeit durch Korngrenzeneffekte im Silizium.

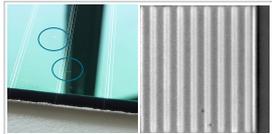
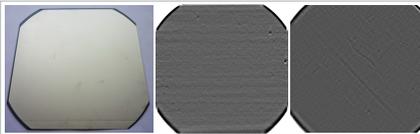


Abb.4:

Dünnschicht-Solarzelle mit amorph abgeschiedenem Silizium. Defekte der Aluminium Rückseitenmetallisierung können durch das 3,5mm dicke Glassubstrat sehr deutlich detektiert werden. (links Foto, rechts WS C-Scan)

Abb.5:

Siliziumsubstrat mit 13µm Aluminium Rückseitenmetallisierung. Kontaminierungen und Anrisse im Silizium werden sichtbar.



Kamerabasierte Elektrolumineszenz als Standardprüfverfahren

Elektrolumineszenz (EL) ist die Aussendung von Licht als Folge einer von außen an die Solarzelle angelegten Spannung. Die in der Solarzelle injizierten Elektronen rekombinieren mit vorhandenen Löchern, wobei die in diesem Vorgang frei werdende Energie zu einem geringen Teil in Form eines Photons abgegeben wird. Das mit einer CCD-Kamera aufgenommene Bild zeigt die Intensitätsverteilung der Lumineszenzstrahlung.

Generell sind alle Effekte, die zu lokaler Reduzierung der Ladungsträgerkonzentration führen, im Elektrolumineszenzbild sichtbar. Die Ursachen für eine reduzierte Ladungsträgerkonzentration sind vielfältig und lassen sich in den meisten Fällen gut unterscheiden. Die Ortsauflösung ist durch die Pixelzahl des Detektors limitiert.



Abb.6:

EL-Bild einer monokristallinen Silizium Solarzelle

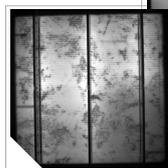


Abb.7:

EL-Bild einer multikristallinen Silizium Solarzelle

Ergebnisse an monokristallinen Silizium Solarzellen

Im Wirbelstrom C-Scan kommen bei bestimmten Messfrequenzen und komplexen Phasenwinkeln φ unterschiedliche Fehler zum Vorschein. Die gefilterten Bilder entstanden nach einer vertikalen Tiefpassfilterung. Der Bildverarbeitungsalgorithmus wurde nach seiner Generierung unverändert auf alle Proben angewandt. Zu erkennen sind bearbeitete C-Scans an dem Vermerk „gefiltert“.

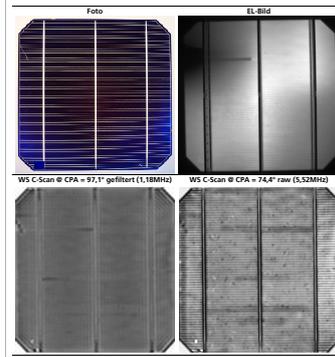


Abb.8:

Diese Zelle hat einen Riss am linken oberen Rand. Dieser und eine Fingerunterbrechung sind im EL-Bild zu erkennen. Der WS C-Scan visualisiert den Riss und eine zusätzliche Fingerunterbrechung. Im rechten C-Scan sind zusätzlich 2 Abdrücke des Ofenconveyors zu sehen.

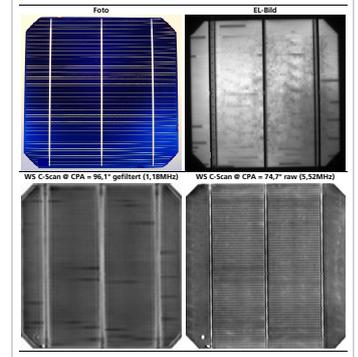


Abb.9:

Diese Zelle hat mehrere Fingerunterbrechungen und einen erhöhten Serienwiderstand (dunkler Bereich im EL-Bild). Indiz für einen erhöhten Serienwiderstand könnte das Fehlen der äußeren linken und rechten Finger im WS C-Scan (5,52MHz) sein.

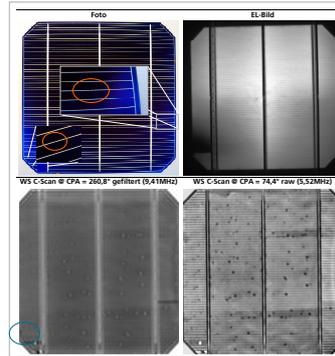


Abb.10:

Sehr kleine Fingerunterbrechungen können bei einer höheren Messfrequenz (9,41MHz) mit einem besseren Kontrast abgebildet werden (vgl. Abb.8 – 1,18MHz). Interessant ist, dass bei korrektem Serienwiderstand alle Finger sichtbar bleiben.

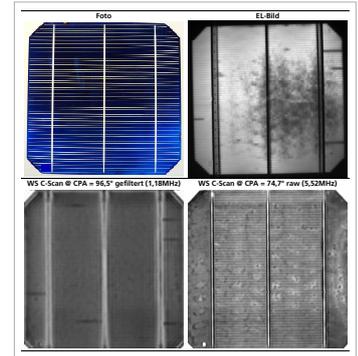


Abb.11:

Stark erhöhter Serienwiderstand lässt die Finger im rechten WS C-Scan verschwinden. Zusätzliche Fingerunterbrechungen werden im linken Scan sichtbar. Die Schuppen (5,52MHz) ist der Topographie der Rückseitenmetallisierung zu schulden.

Ergebnisse an multikristallinen Silizium Solarzellen

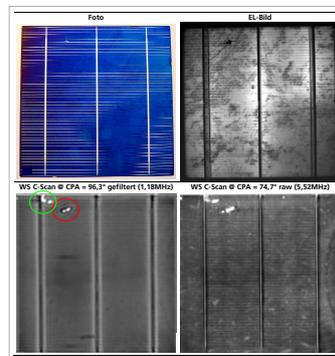


Abb.12:

Ein Riss (rote Markierung) kommt sehr deutlich zum Vorschein. Ein im EL-Bild unentdeckter Riss (grüne Markierung) und mehrere Fingerunterbrechungen können zusätzlich aufgedeckt werden.

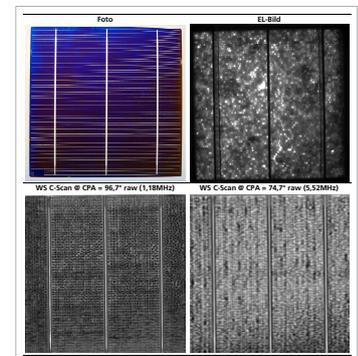


Abb.13:

Diese Zelle wurde im Durchlaufofen überfeuert. Die Topographie der Rückseitenmetallisierung ist in beiden WS C-Scans deutlich zu erkennen.

Zusammenfassung und Ausblick

Der am häufigsten aufgetretene Fehler „Fingerunterbrechung“ kann mit der ortsaufgelösten Wirbelstromprüfung sicher detektiert werden. Im Vergleich dazu ist die Separation gleicher Defekte bei multikristallinen Solarzellen mittels Elektrolumineszenzprüfung schwierig.

Bezüglich dieser Prüfaufgabe bietet das Wirbelstromverfahren eine überlegende Alternative. Weiterhin können mittels WS Prüfung auch Dicke und Topographie der Rückseitenmetallisierung bewertet werden. Ob die Qualität der Kontaktierung der Frontseitenelektroden, welche z.B. einen veränderten Serienwiderstand verursacht, sicher erkannt werden kann, ist Inhalt weiterer Forschung.