

Thermographische Prüfung von Solarzellen auf Risse und Kontaktierungsfehler

Udo NETZELMANN

Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

Kurzfassung. Die Anbindung von Kontaktbändern (Busbars) an Solarzellen wurde mit Hilfe von aktiver Thermographie mit Blitzlichtanregung beziehungsweise resistiver Stromheizung detektiert. Risse in Solarzellen konnten mit Blitzlichtanregung und besonders gut mit induktiver Anregung nachgewiesen werden. Bei letzterer wird die Risspitze besonders gut detektiert. Die Verfahrensvarianten arbeiten mit Prüfzeiten von 15 ms und eignen sich daher auch für die Produktionsprüfung.

1. Einführung

Die Solarindustrie ist, um wettbewerbsfähig zu sein, auf hocheffiziente Prozesse bei der Fertigung von Solarmodulen angewiesen. Dazu gehören prozessstaugliche in-line und off-line Messverfahren, von denen einige neue Varianten im Rahmen eines Förderprojekts untersucht wurden. Eine Teilaufgabe in diesem Projekt war es, durch Einsatz der aktiven Thermographie in einem frühen Stadium im Produktionsprozess kritische Fehler an der Solarzelle zu erkennen.

Thermographische und Infrarotverfahren dienen seit längerem der Erkennung von lokalen inneren Kurzschlüssen und Halbleiterdefekten. Dazu werden Techniken wie Dark-Lock-in Thermographie (DLIT), Thermographie mit Lastmodulation oder im nahen Infrarot die Elektrolumineszenz eingesetzt [1,2]. Es wurde über auch Risserkennungsverfahren mit zeilenförmiger optischer Erwärmung [3] und Kontaktierungsprüfung mit induktiver Anregung [4] berichtet. In diesem Beitrag werden zwei Prüfaufgaben an Zellen mit aktiv thermographischen Verfahren behandelt: Die Fehlanbindung von Kontaktbändern und die Rissprüfung mit induktiver Anregung.

1. Experimentelle Untersuchungen

1.1 Untersuchungen zur Fehlanbindung von Kontaktbändern (Busbars)

Zur Ableitung der Ströme von der Solarzelle dienen auf die Metallisierung aufgelötete Kontaktbänder auf beiden Seiten der Zelle. Ist deren Anbindung an das metallisierte Silizium nicht perfekt, so ist dies visuell nicht erkennbar. Die blitzlichtangeregte Impulsthermographie wurde verwendet, um die Zelle von der durchgängig metallisierten Rückseite her kurzzeitig aufzuheizen. Abb. 1 zeigt den verwendeten Aufbau zur Prüfung.

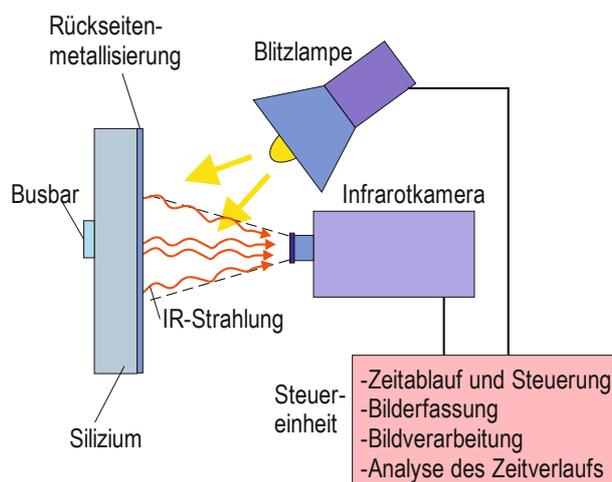


Abb. 1. Schema der Prüfanordnung mit Blitzlichtanregung zur Prüfung von Kontaktbändern auf mangelnde Verbindung.

Charakteristikum der Solarzelle ist, dass das Silizium für das optische Anregungslicht undurchsichtig ist, während es für die thermische Strahlung relativ transparent ist. Eine erwärmte Solarzelle strahlt daher hauptsächlich und in beiden Richtungen über die aufgebrauchte Rückseitenmetallisierung ab. Dies kann man ausnutzen, um Probleme mit der geringen Emissivität des glänzend metallischen Kontaktbandes (Busbar) zu umgehen. Der Prüfansatz besteht darin, dass Wärme zunächst mit Hilfe einer starken Blitzlampe flächig in der Rückseitenmetallisierung freigesetzt wird. Die Wärme diffundiert dann schnell durch das Silizium. Befindet sich das Kontaktband in innigem thermischem Kontakt mit dem Silizium, so wirkt es als Wärmesenke und das Silizium wird sich an dieser Stelle schneller abkühlen als in der Umgebung. Ein negativer Kontrast entsteht im Temperaturverteilungsbild der Rückseitenmetallisierung, das die Infrarotkamera aufnimmt. An den Stellen, wo das Kontaktband nicht angebunden ist, fehlt dieser Kontrast.

Für diesen Prüfansatz wurde die Wahl des Infrarot-Wellenlängenbereichs der Kamera sowie die Wahl des Zeitpunkts nach der Anregung untersucht. Eine Messung im mittleren Infrarot erwies sich als günstig. Ein typisches Ergebnis zeigt Abb. 2.

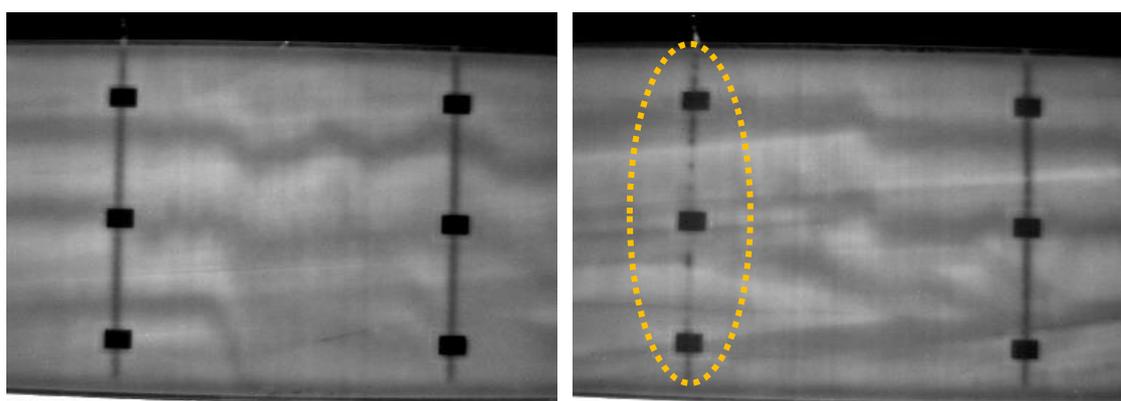


Abb. 2. Zelle mit gut angebundenem Kontaktband (links) und Zelle mit schlechter Anbindung (rechts, Markierung) im Thermographiebild ca. 14 ms nach Blitzanregung. Hellere Grauwerte entsprechen höherer Strahlung/Temperatur. Bildausschnitt ca. 7,5 cm x 10 cm.

Die Fehleranzeigen sind bereits in den Rohdaten gut zu erkennen. Das rechte Bild in Abb. 2 zeigt einen Bereich, wo Wärme nicht in das Kontaktband abfließen kann und damit

eine höhere Temperatur verbleibt. Durch eine Auswertung des zeitabhängigen Temperaturabklingverhaltens (Puls-Phasen Analyse) kann der Kontrast noch verbessert werden. In den Bildern werden auch schwache Strukturen sichtbar, die von der Kristallstruktur herrühren. Diese können manchmal stark ausgeprägt sein und bilden dann einen Störhintergrund. Dennoch konnte in einer Vielzahl von untersuchten Prüfmustern die Fehlanbindung von Kontaktbändern erkannt werden.

Eine Komplikation tritt auf, wenn sich zum Zeitpunkt der Prüfung bereits auf beiden Seiten der Zelle Kontaktbänder in übereinanderliegender Position befinden. Das kameraseitige Kontaktband schirmt dann die Infrarotstrahlung mit den eventuellen Fehleranzeigen ab, weil es aus Metall und damit strahlungsundurchlässig ist. Es wäre noch denkbar, dass das Kontaktband selbst die Wärme abstrahlt. Seine hochglänzende Oberfläche verhindert aber, dass man nach Wärmediffusion in das Band brauchbare Infrarotsignale von seiner Oberfläche erhält (Abb. 3).

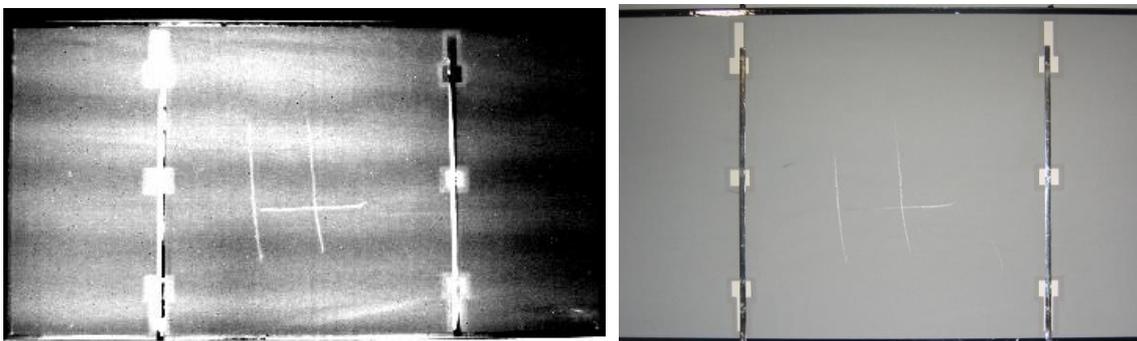


Abb. 3. Links: Thermographie mit Blitzanregung von Probe 225 mit Kontaktbändern auf beiden Zellenseiten. Das kameraseitige Kontaktband verdeckt mögliche Kontraste durch Fehlanbindung des rückseitigen Bandes. Seine glänzende Oberfläche führt zu starken Kontrasten mit extremen scheinbaren Temperaturunterschieden. Rechts: Probenfoto aus Kamerasicht.

Um diesem Hindernis zu begegnen, wurde ein neues Prüfkonzept erprobt. Der Ansatz besteht darin, die Kontaktbänder direkt über einen von außen einbrachten Stromfluss aufzuheizen und die Ausbreitung der Wärme in die Zelle zu verfolgen (Abb. 4).

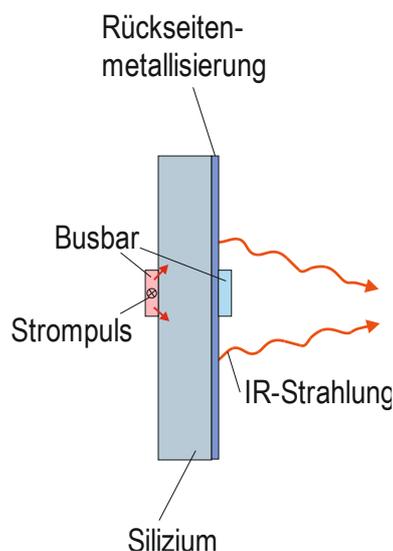


Abb. 4. Schema der Prüfanordnung mit Strompulsanregung zur Prüfung von Kontaktbändern auf mangelnde Verbindung.

Ein rechnersteuerbarer Stromgenerator wurde verwendet, der es erlaubt, das Kontaktband moduliert thermisch aufzuheizen.

Die Wärme breitet sich von dem aufgeheizten Kontaktband in das Silizium aus, wobei es auch lateral vom Band wegdiffundiert. Ist der Wärmeübergang durch mangelnde Busanbindung gestört, so geschieht das wesentlich schwächer und langsamer als bei guter Anbindung. Der laterale Wärmefluss in das Silizium wird nun über die Emission der Rückseitenmetallisierung sichtbar, auch wenn gegenüberliegend ein weiterer Busbar bereits aufgebracht ist. Lock-in Technik wurde auf Grund der geringen verfügbaren Heizleistung eingesetzt.

In Abb. 5 ist ein mit dieser Technik erhaltenes Thermographiebild von der Rückseite der Zelle zu sehen. Die Erwärmung des Busbars auf der abgewandten Frontseite ist als heller Streifen zwischen den Stromeinspeisungspunkten zu erkennen. Das kameraseitige Kontaktband deckt nur einen Teil des hellen Streifens ab. Ein fehlerbehafteter Bereich ist daran zu erkennen, dass der helle Streifen lokal etwas dunkler wird (im Bereich der Markierung).

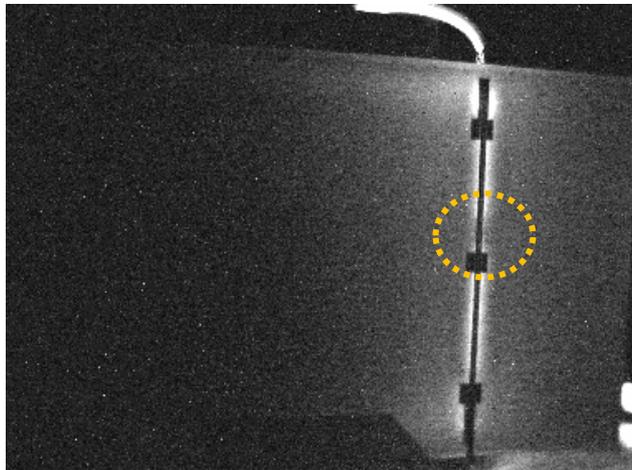


Abb. 5. Thermographisches Bild einer Zelle mit lokal mangelnder Verbindung (Markierung) des Busbars auf der von der Kamera abgewandten Zellenseite.

1.2 Prüfung von Zellen auf Risse

Rissbildung im Silizium der Zelle ist visuell oft kaum zu erkennen und ebenfalls im Produktionsprozess nachzuweisen. Beim thermographischen Prüfansatz werden Wärmeströme erzeugt, die mit dem Riss wechselwirken. Diese können ebenfalls durch die Blitzthermographie angeregt werden. Bei ungünstiger Rissorientierung senkrecht zur Oberfläche ist der Kontrast jedoch schwach und die Lage der Rissspitze oft nicht erkennbar. Dies ändert sich bei Verwendung der Induktionsthermographie. Die im Silizium über einen Induktor angeregten Ströme müssen dem Rissverlauf folgen und konzentrieren sich an den Rissflanken und besonders an der Rissspitze, wo sie durch Ohmsche Verluste deutliche Temperaturkontraste hervorrufen.

Die Blitzanregungstechnik eignet sich grundsätzlich auch für den Nachweis von Rissen. Im folgenden Beispiel ist oben an der Zelle eine lange Rissanzeige zu erkennen (Abb. 6). Auch visuell kaum erkennbare Risse werden so sichtbar, wie z. B. in Abb. 7. Die dort gefundene Rissanzeige könnte aber auch mit einem Hintergrundsignal aus der Kristallstruktur verwechselt werden. Diese ist ebenfalls auf der Fläche der Zelle zu erkennen.

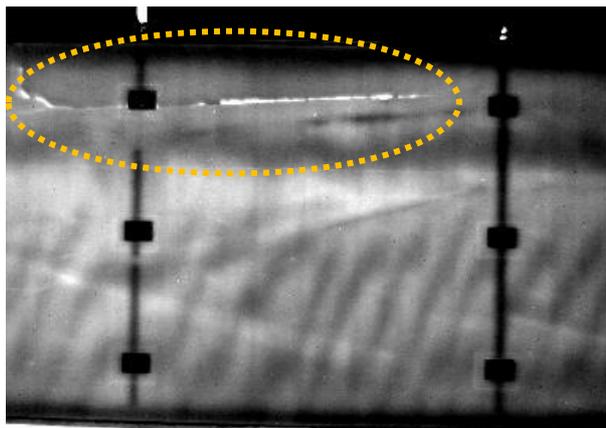


Abb. 6. Rissanzeige (Markierung) an einer Solarzelle mit flächiger Blitzlichtanregung. Die übrigen Kontraste rühren von der Kristallstruktur her.

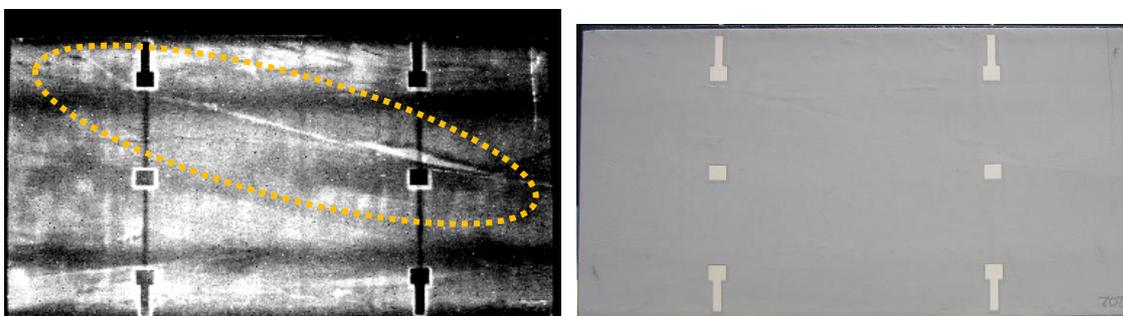


Abb. 7. Links: Anzeige eines langen Risses im Thermographiebild der einer Zelle, der visuell kaum zu erkennen ist. Rechts: Probenfoto.

Die flächige Aufheizung ist für den Nachweis senkrecht zur Siliziumfläche stehender Risse weniger geeignet, da die Wärmeströme parallel zur Rissflanke abfließen und wenig Wechselwirkung mit dem Riss aufweisen. Der Kontrast kommt unter Umständen nur durch Emissionsgradunterschiede zwischen Oberfläche und Riss bei vorhandener Rissöffnung zustande. Zur Rissspitze hin kann der Kontrast völlig verschwinden und unsichtbar werden. Damit wird die Risslänge nicht einschätzbar.

Als Alternative zur flächigen Aufheizung wurde die elektrische Aufheizung durch Induktion erprobt. Mit einem Generator wird ein kurzer (etwa 70 ms), intensiver Strompuls erzeugt und auf eine Induktionsspule gegeben. Die Anregungsfrequenz liegt bei etwa 180 kHz. In dem elektrisch leitenden Silizium werden elektrische Wechselströme erzeugt, die durch Ohmsche Verluste zu einer lokalen Erwärmung führen. Wegen der geringen elektrischen Leitfähigkeit des Siliziums liegt die elektromagnetische Skintiefe bei einigen cm, so dass das gesamte Volumen des Siliziums und, wegen der geringen Dicke, auch der Metallisierung von Strom durchdrungen wird. Abb. 8 zeigt den Messaufbau.

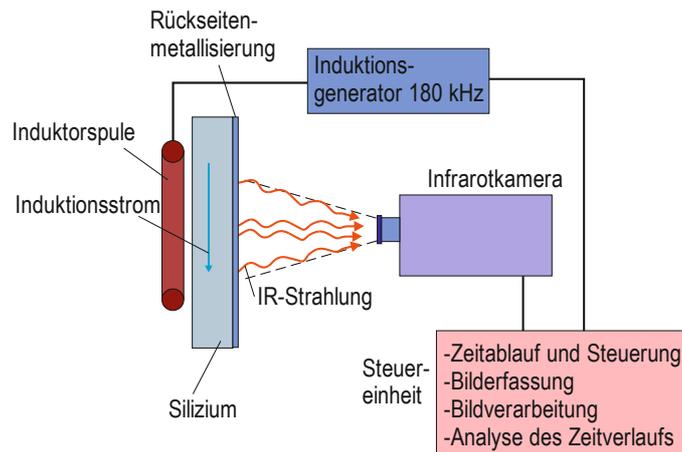


Abb. 8. Schema der Prüfanordnung mit induktiver Anregung zur Prüfung von Solarzellen auf Risse.

Die Induktorspule berührt die Solarzelle nicht, sondern befindet sich in einen gewissen Arbeitsabstand. Die Erwärmung wird über die thermische Strahlung von der Rückseitenmetallisierung sichtbar. Mechanismus für die Rissdetektion ist hierbei, dass die Ströme im Silizium und in der Rückseitenmetallisierung Umwege nehmen müssen, wenn ein Riss den Stromweg versperrt. Sie folgen dem Rissverlauf und konzentrieren sich besonders an der Risspitze (Abb. 9).

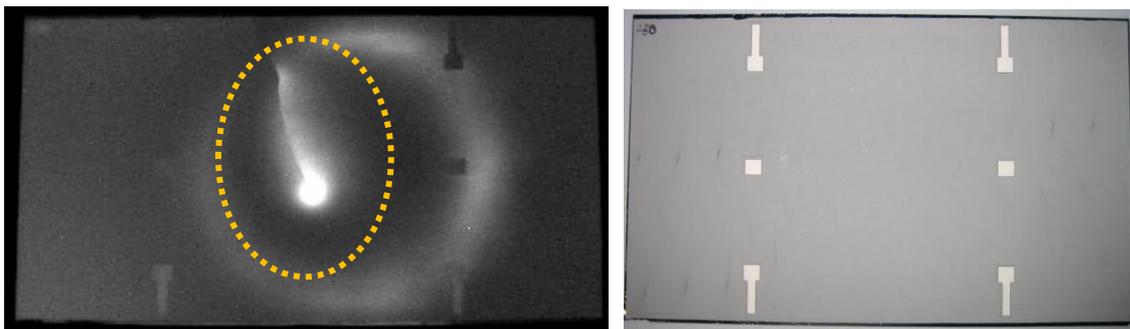


Abb. 9. Links: Thermographiebild einer Solarzelle mit Rissanzeige (Markierung). Rechts: Foto der Probe.

In Abb. 9 ist ein Beispiel zu sehen. Direkt unter der Induktorspule ist die Stromdichte im Silizium am größten. Auf Grund der runden Induktionsspule sieht man ein ringförmiges Erwärmungsmuster, dessen Größe der der Spule entspricht. Daneben ist jedoch deutlich die den Rissverlauf umgebende Erwärmung zu sehen. Die Risspitze wird mit besonders hohem Kontrast angezeigt. Auch bei unregelmäßigem Rissverlauf sind die Risskontraste gut im Bild zu erkennen (Abb. 10).

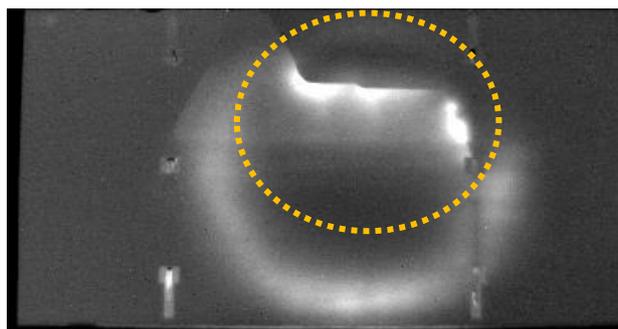


Abb. 10. Thermographiebild einer Zelle mit unregelmäßigem Rissverlauf.

Für die Produktionskontrolle kann man auch eine bewegte Spule verwenden, an der die Zelle vorbeifährt (bzw. bewegte Zelle und statische Spule). Vorteil wäre dabei die Homogenisierung der Anregung durch eine lineare Bewegung, z. B. in horizontaler Richtung. Dabei würde jede Probenstelle auf einem Streifen einmal nahe an der Anregungsspule vorbeikommen. Die Prüfung in Bewegung verkürzt auch die Prüfzeit. Es muss schon aufgrund der Anforderungen der Prüftechnik schnell geprüft werden, da die gezeigten thermischen Kontraste wegen der hohen thermischen Diffusivität des Siliziums schnell wieder verschwinden.

1.3 Fehler in der Rückseitenmetallisierung

Es wurden verschiedene Fehler, wie Kratzer und Vertiefungen in der Rückseitenmetallisierung untersucht.

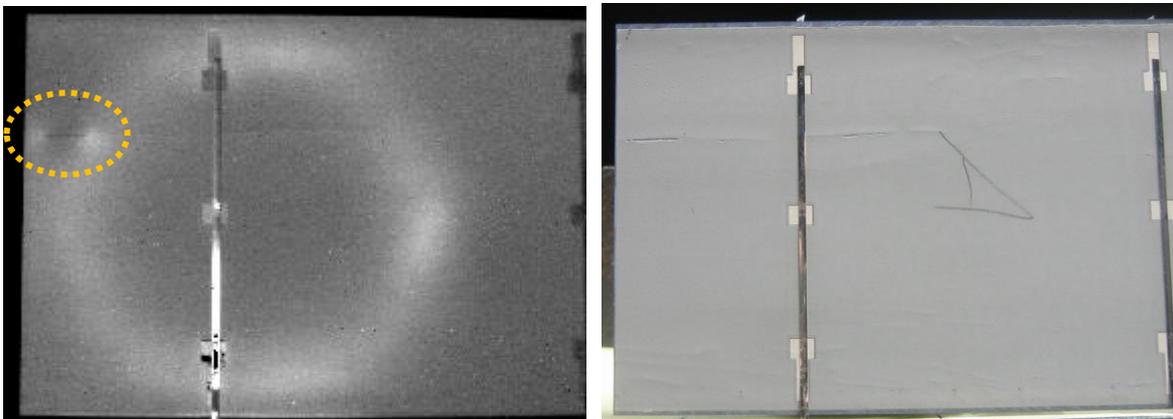


Abb. 11. Links: Anzeige einer länglichen Vertiefung in der Rückseitenmetallisierung (Markierung). Rechts: Probenfoto.

Fehler in der Rückseitenmetallisierung sind mit induktiver Anregung erkennbar (Abb. 11). Ein Graben in der Metallisierung erscheint durch zwei leichte Maxima an den Enden der Vertiefung (Markierung). Dies zeigt, dass auch in der Metallisierung ein nennenswerter Induktionsstromfluss stattfindet. Der weitere Verlauf dieses Fehlers nach rechts wird dagegen kaum nachgewiesen.

Es können auch Bereiche fehlender Rückseitenmetallisierung erkannt werden. Insgesamt ist aber der Fehlerkontrast eher gering, so dass man die Fehler in der Metallisierung mit optischer Fehlererkennung im Sichtbaren vermutlich genauso gut oder besser erkennen könnte.

4. Zusammenfassung

Die fehlende Anbindung der Kontaktbänder lässt sich mit aktiver Thermographie gut erkennen. Eine erträgliche Störung stellt dabei der Hintergrundkontrast durch die Kristallstruktur der Zelle dar.

Die Randbedingung, dass im Fertigungsprozess bereits auf beiden Seiten der Zelle die Kontaktbänder aufgebracht sein können stellte zunächst ein Hindernis bei der Prüfung dar. Dieses Problem konnte jedoch durch den Einsatz einer elektrischen Aufheizung der Busbars gelöst werden.

Risse in den Zellen wurden sowohl mit dem Verfahrensansatz der Blitzlichtheizung als auch mit Induktionsanregung gefunden. Als sichererer Ansatz erscheint jedoch die Induktionsthermographie. Rissverlauf und die Rissspitze werden mit gutem Kontrast wiedergegeben.

Fehler in der Rückseitenmetallisierung können auch thermographisch nachgewiesen werden, allerdings wird die Nachweisempfindlichkeit nicht besser als bei optischer Inspektion sein.

Die Prüfungen mit Blitzthermographie und mit Induktionsthermographie sind schnell, so dass bei der Einzelmessung ein Messergebnis in Form von Rohdaten ca. 15 ms nach Prüfbeginn verfügbar ist. Prüfungen mit einer Durchlaufgeschwindigkeit der Zellen von 1 m/s erscheinen realistisch.

Referenzen

- [1] O. Breitenstein, J. Rakotoniaina, and M. Al Rifai, 'Quantitative Evaluation of Shunts in Solar Cells by Lock-in Thermography', Prog. Photovolt: Res. Appl. 11 (2003), p. 515-526,
- [2] C. Buerhop, J. Bachmann, 'Aktive Thermographie zu lokalen Fehlercharakterisierung in Photovoltaikmodulen', Thermografie-Kolloquium 2009, DGZfP-Berichtsbände; 119-CD, (DGZfP, Berlin 2009), Vortrag 07
- [3] S. Fulga und H. Eigenbrod, 'Den Mikrorissen auf der Spur', QZ 54 (9) (Carl Hanser München, 2009) 48-50
- [4] J. Bohm und K.-J. Wolter, 'Anregungstechnik für die Induktiv Angeregte Thermografie in der Aufbau- und Verbindungstechnik', DGZfP-Jahrestagung 2013 - Poster 40

Danksagung

Wir bedanken uns beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) für die Förderung des Forschungsprojekts im Rahmen des Verbundvorhabens "StringControl", FKZ 0325310C.