

# PHOTOSCANNING-VERFAHREN ZUR NICHTINVASIVEN CHARAKTERISIERUNG FABRIKATIONSBEDINGTER DEFEKTE IN SOLARZELLEN

B. Schmieder, T. Döhler, S. Rolle, F. Ruede, T. Schurig, H. Ketelsen, B. Gruska

## Zusammenfassung

Das Photoscanning-Verfahren dient der zerstörungsfreien Detektion von Defekten in Solarzellen. Die Daten ermöglichen Rückschlüsse auf grundlegende physikalische Parameter der Zelle, wie zum Beispiel den Wirkungsgrad, bzw. mechanische Störungen. Es erlaubt eine umfassende Charakterisierung einer Vielzahl von unterschiedlichen Solarzellentypen. Innerhalb des Projektes werden diese Einsatzmöglichkeiten des Photoscanning-Verfahrens verifiziert. Seit 2011 wurde die Weiterentwicklung des Verfahrens innerhalb einer Kooperation mit der Firma SENTECH als Projektträger, der Physikalisch Technischen Bundesanstalt und der TH Wildau als Projektbeteiligte fortgesetzt.

## Abstract

The photoscanning method serves as a kind of measurement for non-invasive detection of mechanical and electrical defects in solar cells. The signals allow conclusions about basic physical parameters of the cell, e.g. the effectiveness or mechanical disturbances. It permits a widespread characterization of many different solar cell-types. Within the project, the possible applications of the photoscanning in the field of solar cells-characterization get verified. Since 2011 the advancement of the method continued with a cooperation of the company "SENTECH Instruments GmbH" as project leader, the "Physikalisch Technische Bundesanstalt" and the "Technical University of Applied Sciences Wildau" as project participants.

## » I. THEMATIK

Die zuverlässige Vermessung von Solarzellen im Produktionsprozess ist eine Möglichkeit, die Weiterverarbeitung fehlerhafter Solarzellen zu verhindern, den Ausschuss zu reduzieren, Kosten zu senken und die Qualität zu erhöhen. Als Folge können die Zellen am Markt günstiger angeboten werden. Um alle wichtigen Charakterisierungsmerkmale einer Solarzelle ermitteln zu können, stehen bislang nur Messverfahren zur Verfügung, die stichprobenartige Vermessungen der Eigenschaften zulassen bzw. nur bestimmte Parameter vermessen. Für die berührungslose Untersuchung sämtlicher prozessierter Zellen im Produktionsprozess auf elektrische Eigenschaften und mechanische Fehler gibt es derzeit kein Verfahren am Markt.

## » II. FUNKTIONSWEISE EINER SOLARZELLE

Eine Solarzelle besteht aus einem Gebiet mit Elektronenüberschuss (n-dotiertes Gebiet) und einem Gebiet mit Elektronenmangel (p-dotiertes Gebiet).

Diese beiden Gebiete bilden an ihrer Grenzfläche den pn-Übergang mit einer besonderen Potentialverteilung, auch Raumladungzone genannt. Durch die Einwirkung von Licht werden bei ausreichender Strahlungsenergie zusätzliche Elektronen-Loch-Paare generiert. Dies führt zur sogenannten Zellspannung einer beleuchteten Solarzelle und kann als elektrische Energie genutzt werden. Fehlerhaftes Material führt zum Verlust von Elektronen-Loch-Paaren und damit zum Verlust elektrischer Energie (Schmieder 2011).

## » III. AUSGEWÄHLTE VERFAHREN ZUR SOLARZELLENANALYSE

Es haben sich derzeit drei bildgebende Untersuchungsverfahren zur Qualitätskontrolle von Solarzellen etabliert: die Photolumineszenz, die Elektrolumineszenz und die Thermographie.

Photo- und Elektrolumineszenz nutzen den Rekombinationsprozess in einer Solarzelle aus. Die Ladungsträger werden durch eine äußere Energiequelle getrennt. Nachfolgend rekombinieren

die Ladungsträger wieder und senden dabei Photonen aus. Diese Photonen werden detektiert. Insgesamt erhält man also eine Information zum Lebensende der Ladungsträger. An Defekten ist die Rekombinationswahrscheinlichkeit größer, so dass hier eine höhere Photonenanzahl nachgewiesen wird.

Der Unterschied der beiden Verfahren liegt in den Untersuchungsbedingungen. Während bei der Elektrolumineszenz die Energiezufuhr (Anregung) über Kontakte an der Zelle erfolgt, kann die Anregung bei der Photolumineszenz kontaktlos über die Beleuchtung der Zelle erfolgen (Schmieder 2011, Kiliani 2009, Prietzel 2010).

Die Thermographie-Messung erfordert eine Lichtquelle im Infrarotbereich (Wärmestrahlung) und eine Infrarotkamera zur Detektion. Die zugeführte Wärme verteilt sich in der Solarzelle. Das Auftreten eines Defektes stört den Wärmefluss, wodurch fehlerhafte Bereiche verdeutlicht werden können (Käs 2003, Eigenbrod 2009). Dies wurde im Rahmen des Projektes nachgestellt.

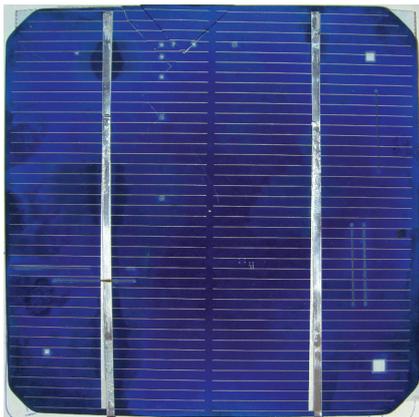


Abb. 1) Photographie einer defekten Zelle

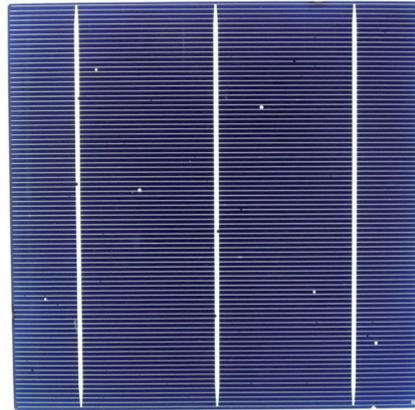


Abb. 3) Photographie einer Solarzelle mit Frontdruckfehlern (weiße Punkte)

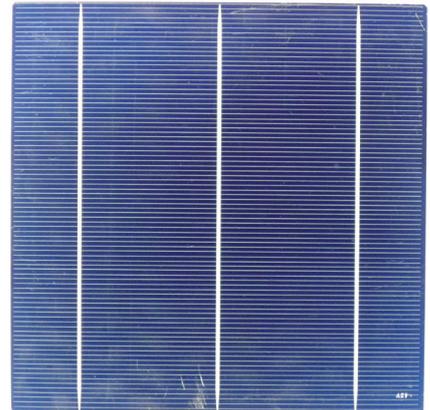


Abb. 5) Photographie der Zelle 18

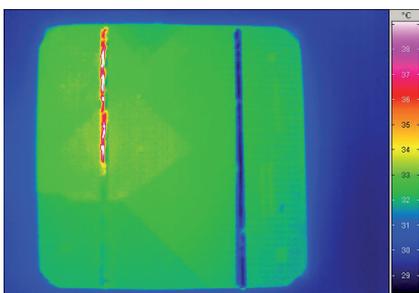


Abb. 2) Thermographie-Untersuchung einer defekten Zelle

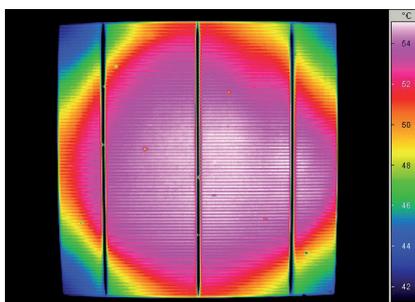


Abb. 4) Thermographie-Untersuchung einer Solarzelle mit Frontdruckfehlern

In Abbildung 2 sind deutlich Brüche in der Zelle detektiert, die in der optischen Ansicht (Abbildung 1) nicht zu erkennen sind. Die Oberflächenfehler in Abbildung 3 und 4 können ebenfalls mit diesem Verfahren untersucht werden.

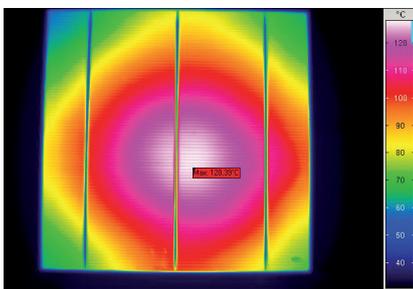


Abb. 6) Thermographie-Messung der Zelle 18

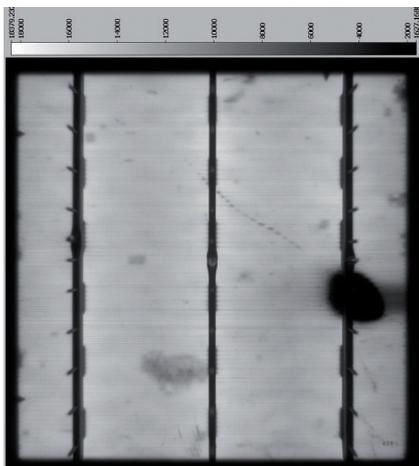


Abb. 8) Elektrolumineszenzaufnahme der Zelle 18

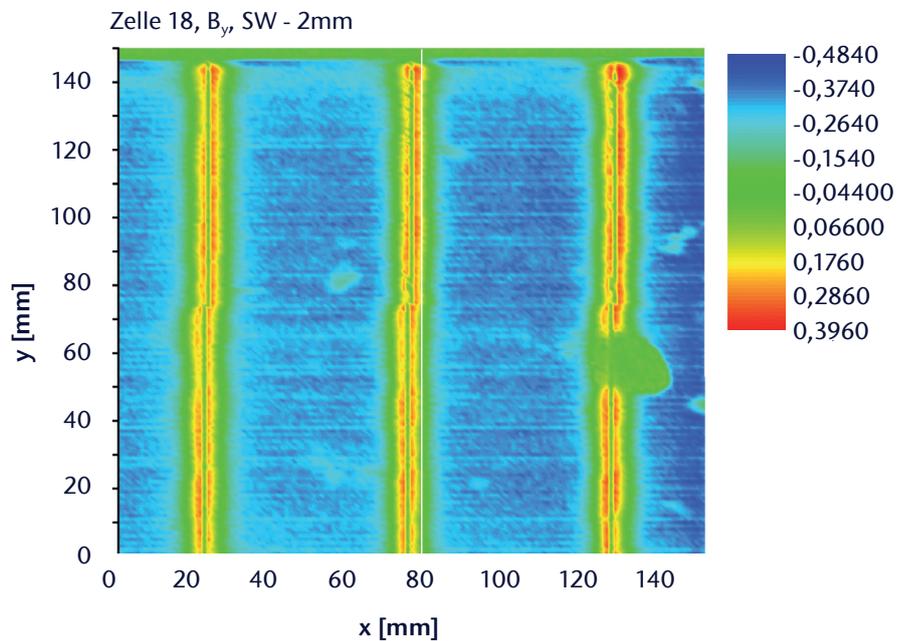


Abb. 7) Photoscanning-Aufnahme der Zelle 18

Nicht detektierbar sind Fehler in den elektrischen Eigenschaften, wie der Vergleich in den Abbildungen 5–8 zeigt. Hier ist bereits ein Vergleich mit einer Photoscanning-Aufnahme zu sehen, welche den elektrischen Defekt rechts im Bild deutlich zeigt.

#### » IV. PHOTOSCANNING-VERFAHREN

Im Photoscanning-Verfahren wird das physikalische Phänomen der Induktion genutzt, um ein Abbild des Stromflusses innerhalb der Solarzelle wiederzugeben. Dabei werden definiert ausgerichtete Spulen systematisch über eine Probe geführt (Scannen), um die lokal durch Laser angeregten Ströme in der Solarzelle zu detektieren. Wie in Abbildung 10 dargestellt, werden die generierten Ströme (weiße Pfeile) im Material von Magnetfeldern (grüne Pfeile) ringförmig um diese Ströme begleitet, die dann in der Messspule eine Spannung induzieren und detektiert werden können. Über den „Umweg“ Magnetfeldes können die elektrischen Eigenschaften der Solarzelle bestimmt werden. Bei einer defektfreien Zelle bewegen sich die Ströme in Richtung der Leiterbahnen. Wenn ein Defekt den Stromfluss stört, ändert sich die Richtung des Stromflusses, und es kann zwischen fehlerhaftem und fehlerfreiem Material unterschieden werden.

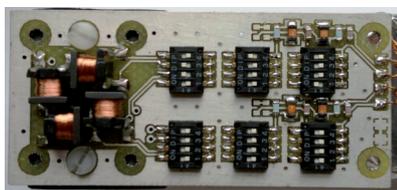
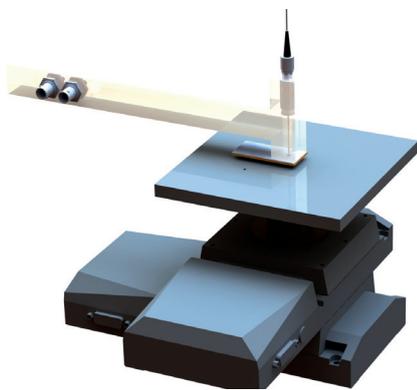


Abb. 9) Darstellung des Messtisches mit Messarm, Spulenkopf und Laser (links), neu entwickelter Messkopf (PTB) (unten)

Da beim Photoscanning-Verfahren mithilfe des Laserspots nur sehr lokal angeregt wird, sind die erzeugten Stromstärken bzw. die resultierenden Magnetfeldstärken auch nur sehr gering. Um äußere Störeinflüsse, wie beispielsweise elektromagnetische Streufelder elektrischer Geräte, aber auch Einflüsse des Erdmagnetfeldes, möglichst gering

zu halten, wird die sogenannte Lock-In-Technik angewandt. Sie ermöglicht die Trennung des Messsignals von störenden Umgebungssignalen.

Dabei wird der anregende Laserstrahl mit einer bestimmten Frequenz gepulst, die sich dann sowohl im erzeugten Stromfluss als auch im detektierten Messsignal wiederfinden lässt. Zum Herausfiltern dieses Signals wird ein Bandpassfilter benutzt. Dadurch werden nur die messrelevanten Signale ausgewertet und die Störsignale weitgehend ausgeblendet. Zusätzlich muss das Signal verstärkt werden (Ragusch 2005; Schmieder 2011).

Abbildung 11 zeigt die Darstellung der Photoscanning-Messung einer weitgehend defektfreien Zelle.

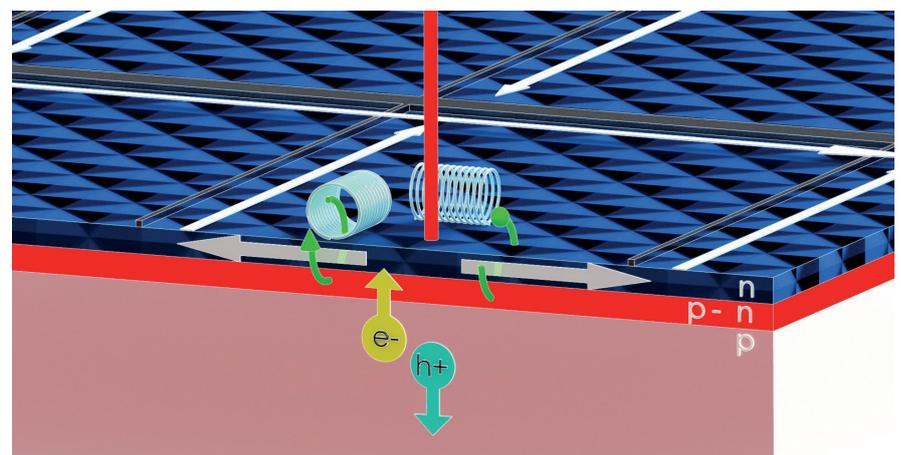


Abb. 10) Aufbau einer Solarzelle mit Hinweis auf Ladungsträgerbewegung ( $e^-$ =Elektron und  $h^+$ =Loch), Magnetfeldrichtung und Spulenposition

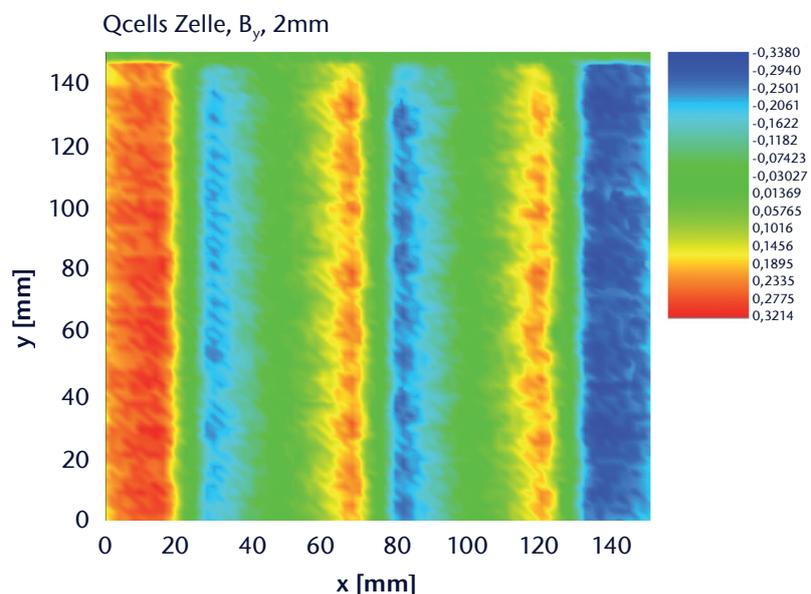


Abb. 11) Photoscanning-Aufnahme einer defektfreien Solarzelle

Die unterschiedlichen Typen von Solarzellen stellen beim Photoscanning-Verfahren eine Herausforderung dar. Siliziumzellen liefern im Vergleich zu anderen Zellarten, wie z. B. Kupfer-Indium-Selenid-Dünnschichtzellen (CIS-Zellen), ein Signal mit hoher Intensität. Es wurden neue Messköpfe für unterschiedliche Zelltypen entwickelt. Insbesondere wurde der Durchmesser der Spulen vergrößert. Dadurch verbessert sich zwar die Signaldetektion, aber die räumliche Auflösung der Messung verschlechtert sich. Deshalb ist der Einsatz größerer Spulen eher für Zellen der Dünnschichttechnologie mit ihrem ohnehin geringeren Signalpegel notwendig.

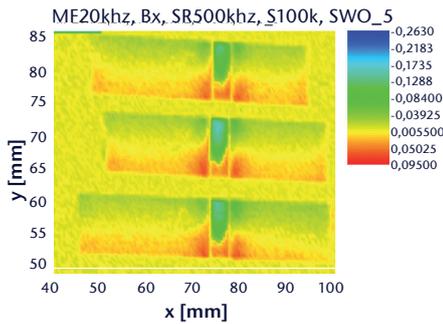


Abb. 12) Photoscanning-Aufnahme von CIS-Zellen

#### » V. DEFEKTE IN SOLARZELLEN

In einer Solarzelle kann es zu verschiedenen Fehlern kommen, die sich unterschiedlich auf den Wirkungsgrad der Zelle auswirken. Grobe Fehler sind Brüche und Leiterbahnunterbrechungen, weite Teile der Solarzelle werden unbrauchbar. Es gibt jedoch auch kleine Brüche, sogenannte Mikrorisse, die mit bloßem Auge nicht zu erkennen sind. Auch diese Zellen müssen ausgesondert werden.

Ebenfalls negativen Einfluss auf die Leistung einer Solarzelle hat ein sogenannter Shunt. Das ist ein Kurzschluss zwischen p- und n-Gebiet der Solarzelle. Die Elektronen bewegen sich nicht wie gewünscht über die Leiterbahnen, sondern nehmen den kürzeren Weg über die Stelle des Shunts, um zu rekombinieren. Dieser Teil der Zelle leistet keinen Beitrag zur Gesamtenergiebilanz einer Solarzelle.

#### » VI. KONZEPTEINERSTANDARDPROBE

Da die Defekte in der Praxis mit unterschiedlicher lokaler Ausdehnung und Form auftreten und das Photoscanning-Verfahren durch die variable Nachweiselektronik kein absolutes Verfahren ist, ist es notwendig, eine standardisierte Vergleichsprobe einzuführen. Zum einen kann die Reproduzierbarkeit der Messung über lange Zeiträume kontrolliert werden, zum anderen ermöglichen vorhandene definierte Fehler eine Aussage über zugehörige Signalauswirkungen und laterales Auflösungsvermögen. Deshalb wurden verschiedene Fehler, z. B. Flächen- oder Linienfehler, mit variierenden Ausdehnungen in diese Standardprobe eingebracht.

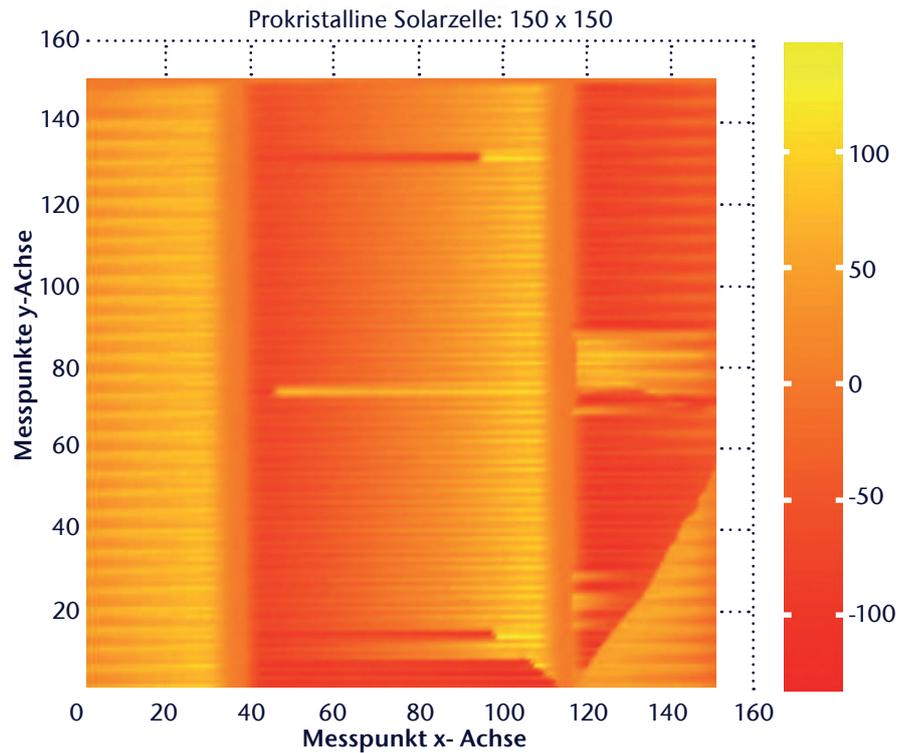


Abb. 13) Photoscanning-Aufnahme einer polykristallinen Solarzelle mit Leiterbahnunterbrechungen und Brüchen

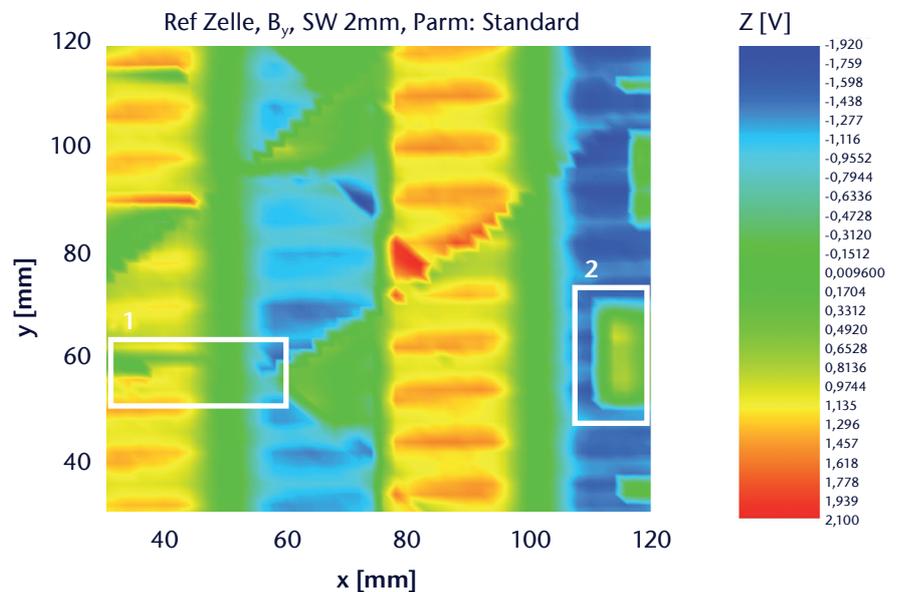


Abb. 14) Vollständige Photoscanning-Aufnahme der Standardprobe

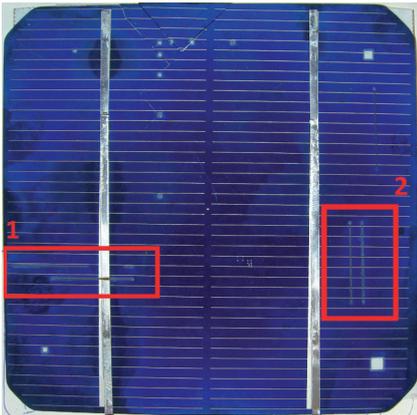


Abb. 15) Photographie der Standardprobe mit ausgewählten Fehlern

## » VI. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Photoscanning-Verfahren ermöglicht die Detektion verschiedener Defekte in Solarzellen, z. B. Brüche oder Leiterbahnunterbrechungen. Dies wurde an siliziumbasierten Solarzellen nachgewiesen. Mit einem verbesserten Messkopf konnten auch Dünnschichtzellen vermessen werden. Ein Vergleich des Photoscanning-Verfahrens mit anderen Messverfahren zeigt, dass es zumindest gleichen Informationsgehalt aufweist. Die aufgenommenen Signale der Magnetfeldstärke lassen zusätzlich Informationen über die elektrischen Eigenschaften der Solarzelle erkennen, aus denen künftig der Zellwirkungsgrad und die Quanteneffizienz bestimmbar sein sollten. Derzeit ist für die Untersuchung einer Solarzelle (Abrasterung) mehr Zeit notwendig als im Produktionsprozess für Qualitätskontrolle zur Verfügung steht. Um diesen Nachteil zu beseitigen, wird ein Messaufbau angestrebt, der mit mehreren Messköpfen gleichzeitig arbeitet und dadurch den Rasterweg und die Messzeit vermindert.

Ref Zelle,  $B_y$ , SW 1mm, waagerechter Linienfehler

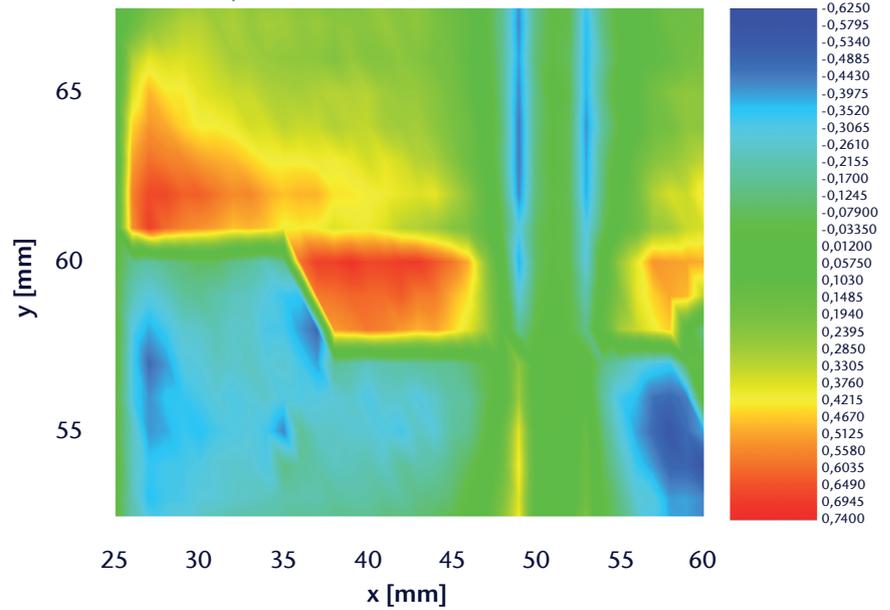


Abb. 16) Messung eines Ausschnitts (1) der Standardprobe mit waagerechem Linienfehler

Ref Zelle,  $B_y$ , SW 2mm, senkrechter Linienfehler

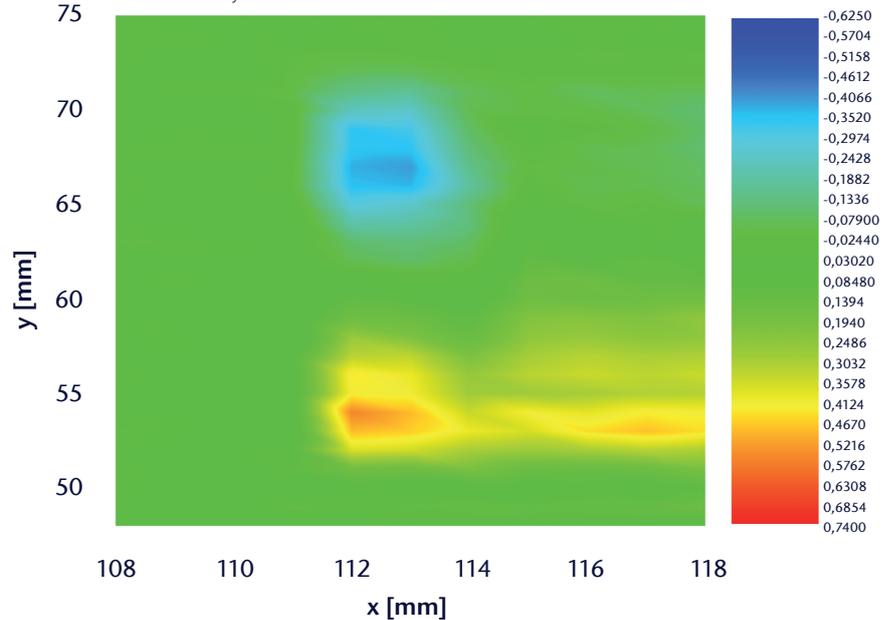


Abb. 17) Messung eines Ausschnitts (2) der Standardprobe mit senkrechtem Linienfehler

## LITERATURVERZEICHNIS

Ragusch, D., Beyer, J., Drung, D., Jergovic, M., Rolle, S., Schurig, T. (2005): Photoscanning-Methode zur nichtinvasiven Charakterisierung fabrikationsbedingter Defekte in Solarzellen, Technische Hochschule Wildau.

Schmieder, B. (2011): Einsatzmöglichkeiten des Photoscanning-Verfahrens zur Qualitätskontrolle von Photozellen, Bachelorarbeit, Technische Hochschule Wildau.

Kiliani, D. (2009): Aufbau eines Lumineszenz-Messplatzes zur Charakterisierung von Solarzellen, Diplomarbeit, Universität Konstanz.

Prietzl, K. (2010): Elektrolumineszenz-Untersuchungen an Kupfer-Indium-Sulfid Dünnschichtmodulen, Diplomarbeit, Technische Hochschule Wildau.

Käs, M. (2003): Thermographiemessung an Solarzellen, Diplomarbeit, Universität Konstanz.

Eigenbrod, H., Fulga, S. (2009): Wärmeflussthermographie zur Rissdetektion an Solarzellen, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung.

## AUTOREN

**B. Schmieder**  
TH Wildau [FH]  
benjamin.schmieder@gmx.net

**T. Döhler**  
TH Wildau [FH]  
tdoehler@th-wildau.de

**S. Rolle**  
TH Wildau [FH]  
rolle@th-wildau.de

**F. Ruede**  
Physikalisch Technische Bundesanstalt  
Abbestraße 1, 10785 Berlin  
frank.ruede@ptb.de

**T. Schurig**  
Physikalisch Technische Bundesanstalt  
Abbestraße 1, 10785 Berlin  
thomas.schurig@ptb.de

**H. Ketelsen**  
Sentech Instruments GmbH  
Schwarzschildstraße 2, 12489 Berlin  
helge.ketelsen@sentech.de

**B. Gruska**  
Sentech Instruments GmbH  
Schwarzschildstraße 2, 12489 Berlin  
bernd.gruska@sentech.de