

# Photoscanning-Methode zur nichtinvasiven Charakterisierung fabrikationsbedingter Defekte in Solarzellen

Denny Ragusch, Jörn Beyer, Dietmar Drung, Michael Jergović, Siegfried Rolle, Thomas Schurig

## Zusammenfassung

Im folgenden Beitrag wird ein Verfahren zur nichtinvasiven Charakterisierung fabrikationsbedingter Defekte in Solarzellen, wie beispielsweise unterbrochene Fingerkontakte oder Risse im Solarmaterial, vorgestellt.

Es werden Weiterentwicklungsansätze aufgezeigt, die zum Ziel haben, das Verfahren auf die einfache und schnelle Erkennbarkeit von Rissen zu optimieren, und es werden erste Untersuchungsergebnisse präsentiert.

## 1. Problematik

In der Solarzellenentwicklung und Produktion werden zur Charakterisierung und zur Kontrolle der einzelnen Prozessschritte sowie zur Endkontrolle verschiedene Verfahren, wie Thermografie, OBIC (Optical Beam Induced Current) und akusto-mechanische Prüfungen, eingesetzt. Die Verfahren sind teilweise jedoch nicht rückwirkungsfrei, zu langsam oder zu unspezifisch, so dass ein Bedarf an verbesserten prozessbegleitenden Charakterisierungsmethoden, insbesondere zur Erkennung von Rissen, besteht. Das 2001 [1] vorgestellte Messsystem zur berührungslosen Detektion von Fotostromverteilungen und Defekten in Solarzellen, basierend auf der SQUID-Photoscanning-Methode (Superconducting Quantum Interference Device – hochempfindlicher gekühlter Magnetfelddetektor) [2], liefert einen viel versprechenden Ansatz zur Lösung der Problemstellung.

## 2. Das Photoscanning-Messprinzip

Das Photoscanning-Verfahren ist ein bildgebendes Verfahren, das u. a. zur zerstörungsfreien Untersuchung von Solarmaterial und Solarzellen verwendet werden kann. Das grundlegende Prinzip dieser Methode, wie in der Abbildung 1 gezeigt, besteht in der optischen Anregung von Fotoströmen in den zu untersuchenden Proben und der Detektion des magnetischen Feldes, das von diesen Strömen verursacht wird. Die Verteilung des Magnetfeldes der Fotoströme über der Probenoberfläche hinsichtlich Feldstärke und Orientierung lässt Rückschlüsse auf Material- und Bauelementeigenschaften zu [3].

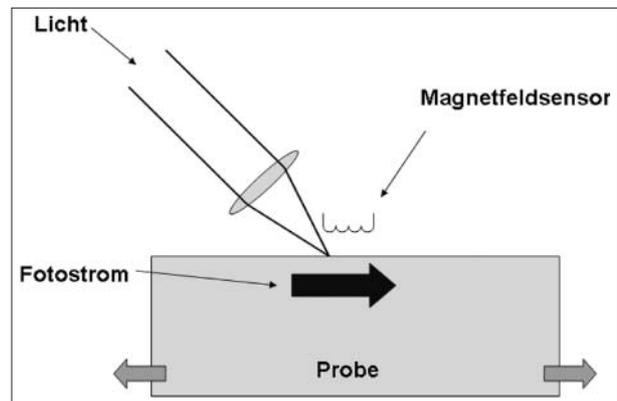


Abb. 1: Messprinzip der Photoscanning-Methode

## 3. Die technische Realisierung

Die Frontseite der zu untersuchenden prozessierten Solarzelle wird mittels eines fokussierten Lichtstrahls einer geeigneten und amplitudenmodulierten Lichtquelle abgetastet. Hierzu wird derzeit ein fasergekoppelter Diodenlaser mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 633 \text{ nm}$  und einer maximalen Leistung von  $P = 5 \text{ mW}$  verwendet. Da das von den Fotoströmen verursachte magnetische Feld bei einer Solarzelle relativ groß ist (bis zu einige  $100 \text{ pT}$ ), kann als Magnetfelddetektor an Stelle des SQUIDs eine Induktionsspule, die keine Kühlung benötigt, verwendet werden. Die Ausgangsspannung der Spule wird frequenzselektiv und phasenempfindlich für jeden angefahrenen Punkt auf der Probenoberfläche gemessen. Die Messdaten können auf verschiedene Weise, z. B. als Topogramme oder Linienscans, dargestellt und zur Charakterisierung der Probe verwendet werden.

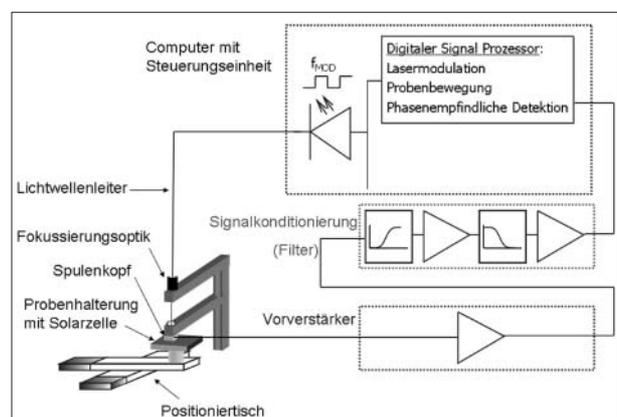


Abb. 2: Schematischer Aufbau eines Photoscanning-Messplatzes zur Solarzellen-Untersuchung

## 4. Die detektierbaren Defekte

Mit einem Messaufbau, wie in Abbildung 2 dargestellt, lassen sich eine Reihe von fabrikationsbedingten Defekten detektieren. Typischerweise sind dies Defekte in der Kontaktierung (z. B. Kurzschlüsse, unterbrochene Kontakte), Durchkontaktierungen des pn-Übergangs sowie Risse im Solarmaterial. Beispielhaft ist ein Magnetfeldtopogramm eines Risses in Abbildung 3 gezeigt. Für die praktische Anwendung, z. B. bei Herstellern von Solarzellen, soll das Verfahren auf die einfache und schnelle Erkennbarkeit von speziellen Defekten, wie Risse, optimiert werden.

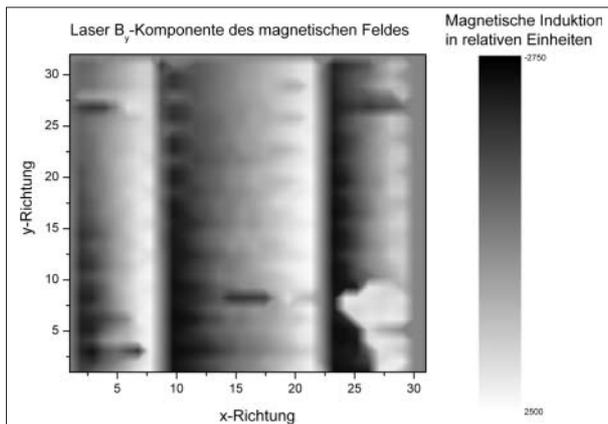


Abb. 3: Fotomagnetisches Bild einer defekten Solarzelle (Riss, unten rechts im Bild); dargestellt ist die  $B_y$ -Komponente des magnetischen Feldes, verursacht durch Stromkomponenten in  $x$ -Richtung. Die Generation der Fotoströme erfolgte mittels eines fasergekoppelten Diodenlasers (633 nm, 5 mW) bei einer Messfrequenz von 20 kHz. Gemessen wurde mit einer Ortsauflösung von 1 Messpunkt pro 5 mm sowohl in  $x$ - als auch in  $y$ -Richtung.

## 5. Weiterentwicklungsansätze

Da, wie Abbildung 3 zeigt, für die Erkennung von Rissen keine hohe Ortsauflösung notwendig ist, kann durch die Verwendung von alternativen Lichtquellen ohne abbildende Optik, wie Leuchtdioden (LED), das Gesamtsystem stark vereinfacht werden. Die Reduzierung der Ortsauflösung führt auch durch Verringerung der Messschritte zu einer Verkürzung der benötigten Messdauer. Weiterhin kann die Messdauer mit einer verbesserten mehrkanaligen Sensorik stark verkürzt werden [4]. Erste Untersuchungen in dieser Richtung wurden bereits durchgeführt und sollen kurz erläutert werden.

## 6. Vereinfachte optische Anregung

Die in Abbildung 3 gezeigte Messung wurde mit einer LED (663 nm, ultrahell), die direkt über der Probe angeordnet war, wiederholt. Das erhaltene Magnetfeldtopogramm ist in Abbildung 4 dargestellt. Es entfallen somit für den Messaufbau die Lasereinheit, die Lichtleitkabel und die Fokussierungsoptik. Der optische Aufbau des Messmoduls ist dadurch auch im industriellen Umfeld einfach zu realisieren.

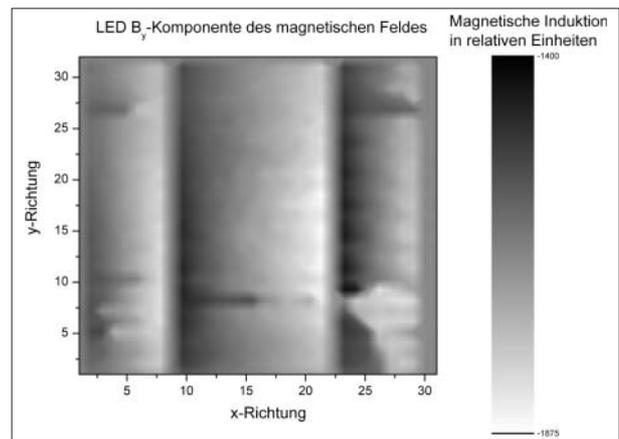


Abb. 4: Fotomagnetisches Bild einer defekten Solarzelle (Riss, unten rechts im Bild); dargestellt ist die  $B_y$ -Komponente des magnetischen Feldes, verursacht durch Stromkomponenten in  $x$ -Richtung. Die Generation der Fotoströme erfolgte mittels einer ultrahellen roten LED (633 nm, 2 mW) bei einer Messfrequenz von 20 kHz. Gemessen wurde mit einer Ortsauflösung von 1 Messpunkt pro 5 mm sowohl in  $x$ - als auch in  $y$ -Richtung.

## 7. Bestimmung der nötigen Ortsauflösung

Für die schnelle Defekterkennung von Solarzellen ist es sinnvoll, die Ortsauflösung soweit wie möglich zu reduzieren, ohne jedoch das sichere Erkennen der Defektstrukturen zu gefährden. Hierzu wurden Untersuchungen an einer repräsentativen Auswahl von defekten Solarzellen durchgeführt. Bei verschiedenen Ortsauflösungen (veränderten Messpunkteabständen) wurden die Magnetfeldtopogramme sowie die einzelnen Linienscans analysiert. In Abbildung 5 sind die Magnetfeldtopogramme sowie die dazugehörigen Linienscans einer defekten Solarzelle bei verschiedenen Ortsauflösungen gezeigt. Die Analyse der Messergebnisse führt zu folgender Schlussfolgerung: Für eine Sichtprüfung der Magnetfeldtopogramme ist eine Ortsauflösung von 4 mm x 4 mm notwendig. Für eine Sichtprüfung der einzelnen Linienscans ist eine Ortsauflösung von 5 mm x 5 mm notwendig [5].

## 8. Ausblick

Verschiedene Konzepte für die auf das Messproblem anzupassende Sensorik werden erarbeitet. Diese Konzepte werden dann mit den hier beschriebenen Untersuchungsergebnissen kombiniert und eingehend untersucht. Das Photoscanning-Verfahren wird zurzeit ausschließlich auf mono- sowie polykristallinen Si-Solarzellen angewendet. Die mögliche Verwendung des Verfahrens für weitere Solarzellentypen soll daher geprüft werden.

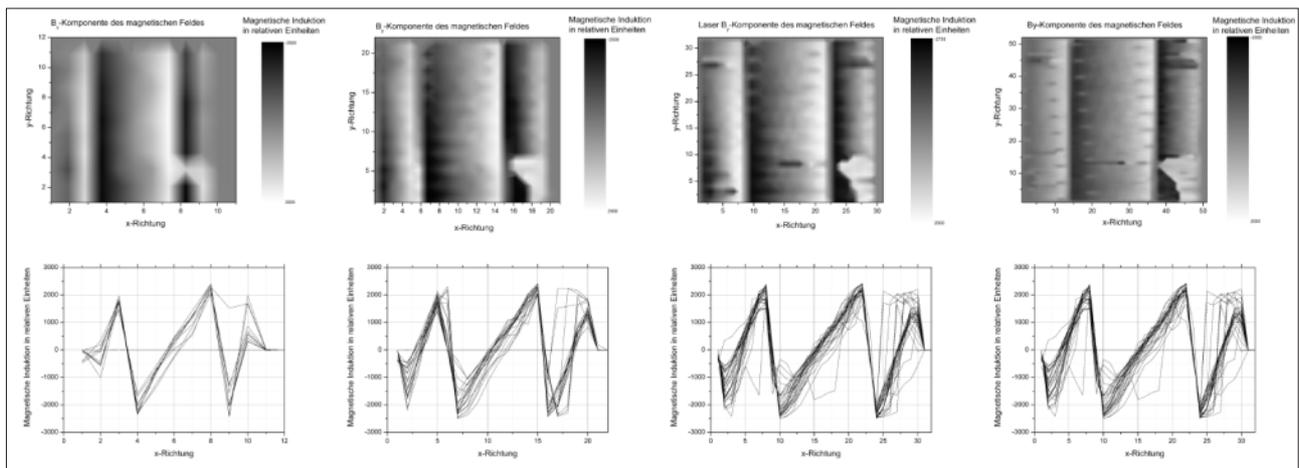


Abb. 5: Magnetfeldtopogramme und die dazugehörigen Linienscans einer defekten Solarzelle (Riss, unten rechts) bei verschiedenen Ortsauflösungen (Messpunkteabständen); die Solarzellengröße beträgt 15 cm x 15 cm; dargestellt ist die  $B_y$ -Komponente des magnetischen Feldes, verursacht durch die Stromkomponenten in  $x$ -Richtung. Die Generation der Fotoströme erfolgte mittels eines fasergekoppelten Diodenlasers (633 nm, 5 mW) bei einer Messfrequenz von 20 kHz.

## Literatur

- [1] D. Ragusch, I. Novikov, D. Drung, K.-P. Franke, Th. Schurig: Photoscanning Messsystem zur berührungslosen Bestimmung fabrikationsbedingter Defekte in Solarzellen, Poster, DPG Frühjahrstagung, Regensburg 2002
- [2] J. Beyer, D. Drung, Th. Schurig: SQUID-photoscanning: An imagine technique for NDE of semiconductor wafers and devices based on photomagnetic detection, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.11, no.1, pp. 1162-1167, March 2001
- [3] D. Ragusch: Magneto-optische Charakterisierung von Solarzellen, Diplomarbeit, Technische Fachhochschule Wildau, Wildau 2003
- [4] J. Beyer, D. Drung, Th. Schurig, M. Jergovic, D. Ragusch, S. Rolle: Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung von elektrischen und mechanischen Defekten in Solarzellen und Solarzellen-Halbfabrikaten, Patentanmeldung DE 10 2005 002 651.6 vom 19.01.2005
- [5] D. Ragusch, J. Beyer, E. Cikos, D. Drung, S. Rolle und Th. Schurig: Nicht-invasive Charakterisierung fabrikationsbedingter Defekte in Solarzellen, Poster, DPG-Frühjahrstagung, Berlin 2005

## Autoren

**M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) Denny Ragusch**  
 Technische Fachhochschule Wildau  
 Labor für Solarenergietechnik  
 Tel. +49 3375 508-145  
 dragusch@igw.tfh-wildau.de

**Dr. rer. nat. Jörn Beyer**  
 Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
 Arbeitsgruppe Kryosensoren  
 Abbestraße 2-12, 10587 Berlin  
 Tel. +49 30 3481-0  
 Joern.Beyer@ptb.de

**Dr.-Ing. Dietmar Drung**  
 Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
 Arbeitsgruppe Kryosensoren  
 Abbestraße 2-12, 10587 Berlin  
 Tel. +49 30 3481-0  
 Dietmar.Drung@ptb.de

**Dipl.-Ing. Michael Jergović**  
 Technische Fachhochschule Wildau  
 Labor für Solarenergietechnik  
 Tel. +49 3375 508-145  
 yergo@pt.tfh-wildau.de

**Prof. Dr. rer. nat. Siegfried Rolle**  
 Technische Fachhochschule Wildau  
 Labor für Solarenergietechnik  
 Tel. +49 3375 508-126  
 rolle@pt.tfh-wildau.de

**Dr. sc. nat. Thomas Schurig**  
 Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
 Arbeitsgruppe Kryosensoren  
 Abbestraße 2-12, 10587 Berlin  
 Tel. +49 30 3481-0  
 Thomas.Schurig@ptb.de