



Risse in Solarzellen

**Untersuchung der Rissentstehung und
des Rissfortschritts in eingebetteten Solarzellen**

Risse in Solarzellen stellen in der alltäglichen Praxis ein häufig auftretendes Problem dar. Diese sind rein mit optischen Mitteln meist nicht erkennbar, stellen jedoch Schwachstellen für die Zuverlässigkeit und die Lebensdauer der Photovoltaikmodule dar. Dr. Matthias Ebert, Sascha Dietrich, Martin Sander und Matthias Pander vom Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik untersuchen systematisch Risse in eingebetteten Solarzellen und optimieren das Layout der Module.

Photovoltaikmodule erfahren sowohl während ihrer Herstellung als auch im späteren Einsatz eine Reihe von Belastungen, die zu Beanspruchungen in den einzelnen Komponenten und Materialien führen. Die Beanspruchungen können von den verwendeten Materialien bis zu einer bestimmten Höhe ertragen werden, bevor es zu bleibenden Schäden und ggf. Ausfällen kommt. Um Schäden und Ausfälle von einzelnen Photovoltaikmodulen oder ganzen Photovoltaikanlagen zu vermeiden, ist eine möglichst beanspruchungsgerechte Auslegung des mechanischen Aufbaus notwendig, was eine gute Kenntnis über die auftretenden Beanspruchungen und das mechanische Verhalten der Photovoltaikmodule voraussetzt.

Bisher wird die Zuverlässigkeit von Photovoltaikmodulen hauptsächlich durch Tests an kompletten Modulen geprüft. Dabei werden diese Module üblicherweise extremen Umweltbedingungen ausgesetzt, um eine lange Betriebsdauer zu simulieren. Die Ergebnisse dieser Tests liefern integrale Aussagen zum Verhalten der Module, jedoch meist keine Erkenntnisse zu den im Einzelnen ablaufenden physikalischen Vorgängen. Durch mechanische oder thermische Belastung kommt es zu einer mechanischen Beanspruchung der unterschiedlichen Materialien des Moduls, welche zu Schäden am Modul oder an den Einzelkomponenten führen kann.

Beispielsweise kommt es durch die Verbindung von verschiedenen Materialien (Glas, polymerbasierte Verkapselungsfolie, Silizium, usw.) mit unterschiedlichem Wärmeausdehnungskoeffizienten im Modul bei Temperaturänderungen zu mechanischen Beanspruchungen in Form von hohen Spannungen, die zu Rissen in den Solarzellen führen können. Es hat sich gezeigt, dass vor allem die Kombination von mechanischer Belastung und anschließender Temperaturwechselbelastung zu einer starken Schädigung der Zellen mit signifikantem Leistungsverlust des Moduls führt [1].

Mechanische Belastungen können in Form von Wind- oder Schneelasten auftreten und deformieren das Modul und die darin

eingebetteten Solarzellen. Das elastische Verkapselungsmaterial soll die spröden Solarzellen vor diesen mechanischen Belastungen schützen, kann das allerdings nur im Rahmen seiner mechanischen Eigenschaften gewährleisten.

Rissuntersuchung mithilfe von Elektrolumineszenz

Untersuchungen haben gezeigt, dass bereits fabrikneue Module Risse in Zellen aufweisen, die in den meisten Fällen optisch nicht sichtbar sind, jedoch durch eine Elektrolumineszenz-Aufnahme identifiziert werden können (Abb. 1, oben). Dabei wird das Modul mit einer Spannung betrieben, wodurch die Solarzellen im Infrarotbereich leuchten. Diese Strahlung ist für das menschliche Auge nicht sichtbar, kann jedoch mit einer Silizium-Kamera erfasst werden. Risse erscheinen dabei als dunkle

Linien und können auf diese Weise einfach identifiziert werden.

Werden die Module einer thermischen Wechselbelastung ausgesetzt, wie sie im Einsatz während der Tag-Nacht- bzw. Sommer-Winter-Zyklen auftritt, kommt es aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnung der einzelnen Materialien zu thermomechanisch induzierten Spannungen. Dadurch können weitere Risse entstehen oder vorhandene Risse weiter wachsen. Dies haben auch die bisherigen Erfahrungen mit Modulen unter Temperaturwechselbelastung gezeigt. Wie in Abb. 1 zu sehen ist, ist in demselben Modul nach 20 Temperaturwechseln zwischen -60°C und $+85^{\circ}\text{C}$ eine nicht unerheblich Zahl neuer Risse in den Zellen entstanden [2]. Bemerkenswert dabei ist, dass die meisten Risse nicht zu isolierten, also elektrisch „toten“ Zellbereichen führen, da die Metallisierung meist ungeschädigt ist und den Stromfluss wei-

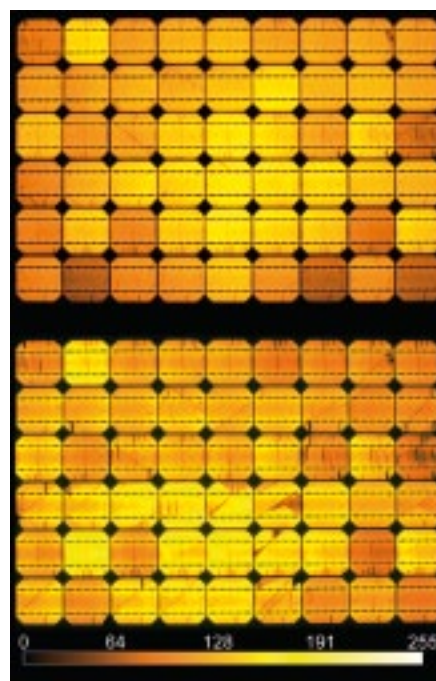


Abb. 1 Elektrolumineszenz-Aufnahme eines monokristallinen Photovoltaikmoduls im Auslieferungszustand (oben) und nach 20 Temperaturwechselzyklen zwischen -60°C und 85°C (unten). Man erkennt eine Reihe von neu entstandenen Rissen nach der thermischen Wechselbelastung.

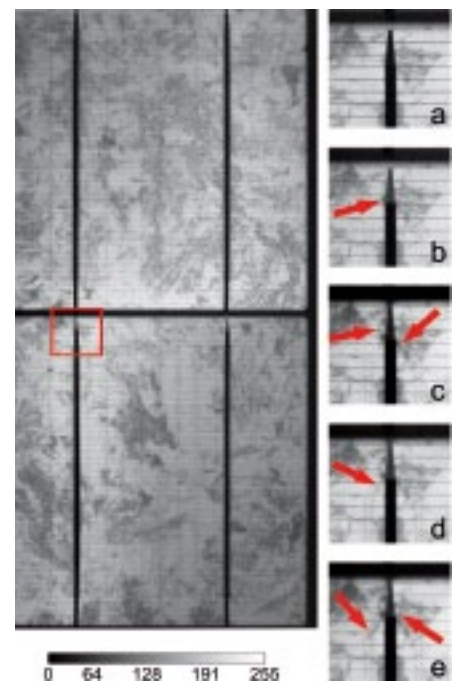


Abb. 2 Links: EL-Aufnahme eines D2-Prüfkörpers nach 200 Zyklen Temperaturwechselbelastung; rechts: Detail eines Risses mit Ursprung am Busbar über alle Untersuchungszeitpunkte: (a) nach dem Lötten, (b) nach dem Laminieren, (c) nach 50, (d) nach 100, (e) nach 200 Temperaturwechseln.



Matthias Ebert

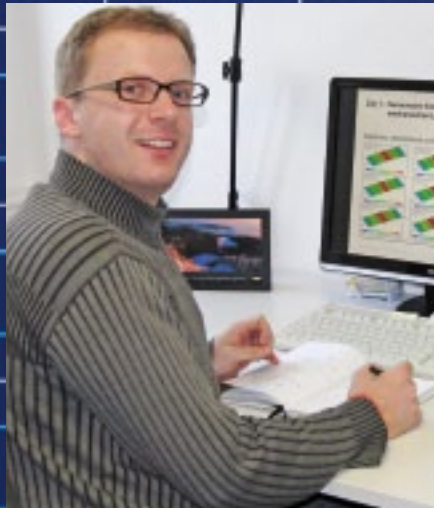
studierte Bauingenieurwesen an der Bauhaus-Universität Weimar, wo er sich während seiner Promotion mit der Veränderung der dynamischen Eigenschaften geschädigter Stahlbetontragwerken am Institut für Strukturmechanik beschäftigte. 2003 wechselte er an das Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik in Halle (Saale). Seit 2009 leitet er am Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik die Gruppe Solarmodule.

terhin gewährleistet. Damit macht sich die Entstehung von Rissen in den meisten Fällen nicht in einer signifikanten Leistungsverminderung des Gesamtmoduls bemerkbar. Das Modul funktioniert damit weiterhin und liefert Strom. Jedoch können die vorhandenen Risse eine Ursache für weitere Schäden im Betrieb sein.

Da besonders Risse in eingebetteten Solarzellen ein häufig auftretendes Problem darstellen, sollten die Rissentstehung und der Rissfortschritt systematisch in spezifischen Belastungsszenarien untersucht werden, um die stattfindenden Fehlermechanismen zu verstehen und Schädigungsmodelle ableiten zu können. Mit den gefundenen Modellen kann dann durch Simulation die Belastung virtuell nachgebildet werden. So können Langzeitbelastungen innerhalb kurzer Zeit auf virtuelle Prototypen aufgebracht werden.

Minimodule als Untersuchungsobjekte

Die Untersuchungen wurden an speziellen Minimodulen durchgeführt, bei denen verschiedene Arten des Aufbaus realisiert wurden. Es wurden sowohl Minimodule in Glas-Glas- als auch in Glas-Rückseitenfolie-Bauweise mit einer oder zwei Zellen hergestellt und anschließend einer defi-



Sascha Dietrich

studierte Maschinenbau an der HTWK Leipzig und University of Paisley/Schottland. In seiner Masterarbeit am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik beschäftigte er sich mit Zuverlässigkeitsuntersuchungen an Siliziumstrukturen. Seit 2008 arbeitet er am Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik im Bereich mechanische FEM-Simulationen von Photovoltaikmodulen und Komponenten und ist seit 2010 Teamleiter für den Bereich Modulzuverlässigkeit.

nierten Belastung unterzogen. Zur Untersuchung des Einflusses von mechanischer Belastung wie Wind- oder Schneelasten wurde eine Biegeprüfung der Minimodule durchgeführt. Für die Untersuchung der thermischen Belastung wurden die Minimodule einem Temperaturwechseltest unterzogen.

Die Zellen wurden nach den einzelnen Produktionsschritten (Löten, Laminieren) und nach jeweils einer bestimmten Anzahl von Temperaturwechselzyklen mithilfe der

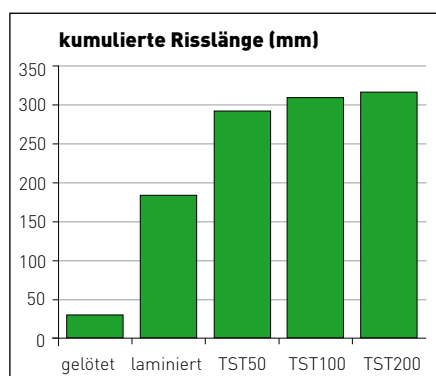
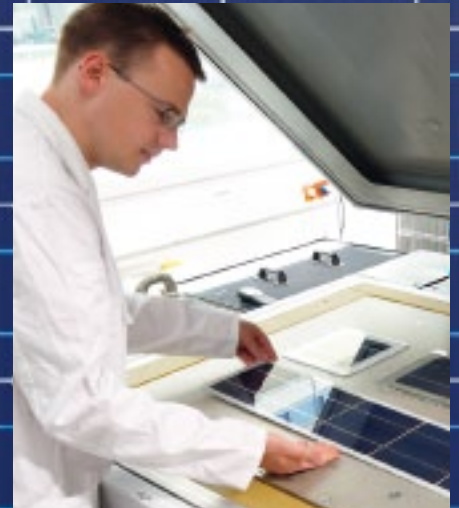


Abb. 3 Kumulierte Risslänge aller Prüfkörper zu den einzelnen Untersuchungszeitpunkten. Man erkennt im Verlauf des Versuchs eine Zunahme der Risslänge, die sich aus dem Wachstum bestehender Risse und aus dem Auftreten neuer Risse zusammensetzt.



Martin Sander

schloss im Oktober 2008 sein Maschinenbaustudium an der TU Ilmenau ab und promovierte seitdem am Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik im Team Modulzuverlässigkeit und beschäftigt sich hierbei mit der Charakterisierung von Photovoltaikmodulen mit mechanischen, optischen und elektrischen Analysemethoden.

Elektrolumineszenz untersucht. Durch den direkten Vergleich zwischen den einzelnen Schritten konnte das Risswachstum sehr gut beobachtet werden. Abb. 2 zeigt die Elektrolumineszenzaufnahme eines aus zwei Solarzellen bestehenden Minimoduls am Ende des Prüfprogramms und daneben als vergrößertes Detail einen Riss am Lotbandanfang bzw. -ende über alle Belastungsschritte. Man erkennt, dass der Riss beim Laminieren entsteht und während der Temperaturwechselbelastung weiter wächst.

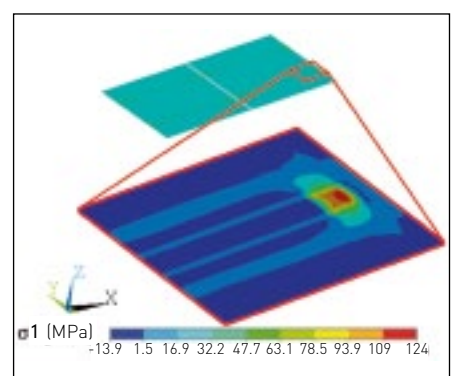


Abb. 4 Darstellung der Spannungsverteilung [1. Hauptspannung] in der Solarzelle am Ende des Busbars nach dem Laminieren als Ergebnis einer Finite-Elemente Simulation. Die dargestellte Spannungsverteilung wird durch die unterschiedlich starke Ausdehnung zwischen Silizium und Solarzellenverbinder beim Abkühlen von Laminierertemperatur auf Raumtemperatur verursacht.



Matthias Pander

schloss im Januar 2010 sein Maschinenbaustudium an der HTWK Leipzig ab und arbeitet seitdem als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik im Bereich FEM-Simulationen von Solarzellen und Photovoltaikmodulen im Team Modulzuverlässigkeit.

Zur statistischen Auswertung wurden die Rissanzahl und die Risslänge aller Prüfkörper addiert und in einem Diagramm aufgetragen (Abb. 3). Dadurch kann das Risswachstum mit einer gewissen statistischen Sicherheit quantitativ verfolgt werden. Es hat sich gezeigt, dass vor allem das Laminiere und die ersten Zyklen der Temperaturwechselbelastung zu einem starken Risswachstum geführt haben.

Ursachenforschung mithilfe von FEM-Simulation

Zur Klärung der Ursache wurde eine Finite-Elemente-Simulation der Solarzelle beim Abkühlen von Laminiertemperatur auf Raumtemperatur durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass es durch die unterschiedliche

starke Ausdehnung der Solarzelle (Silizium) und des Solarzellenverbinders (Kupfer) zu hohen mechanischen Spannungen am Ende des Busbars kommt (Abb. 4). Anhand der Ergebnisse der Simulation geht der Konstrukteur davon aus, dass ein Versagen an der Stelle der höchsten Spannung zuerst auftritt, was auch mit den Beobachtungen aus dem Experiment übereinstimmt. Die Höhe der Spannung, die zu einem Riss führt, kann durch Festigkeitsversuche am reinen Silizium ermittelt werden. Dieser Wert kann mit den berechneten Spannungen verglichen werden, um abzuschätzen, ob die Solarzelle die Beanspruchung unbeschadet übersteht. Um Risse zu verhindern, kann man dann das Modul layout oder den Herstellungsprozess verändern. Dafür bietet die Finite-Elemente-Simulation den großen Vorteil, dass für erste Ergebnisse keine Prüfkörper hergestellt werden müssen, sondern nur ein virtueller Prototyp geschaffen wird.

Literatur:

- [1] Köntges, M., Kunze, I., Kajari-Schröder, S., Breitenmoser, X. and Bjørneklett, B.: „Quantifying the Risk of Power Loss in PV Modules due to Micro Cracks“, Proceedings of the 25th EU-PVSEC, Valencia, 3745, 2010.
- [2] Sander, M., Henke, B., Schweizer, S., Ebert, M., Bagdahn, J.: „Characterization of PV Modules by Combination of Mechanical and Electrical Analysis Methods“, Proceedings of the 25th EU-PVSEC, Valencia, 3993, 2010.

● martin.sander@csp.fraunhofer.de

Förderung und Danksagung

Die Autoren danken dem Team Optische Charakterisierung/Photonenmanagement für die Unterstützung bei den Elektrolumineszenz-Messungen. Die Untersuchungen wurden unterstützt durch das BMBF-Projekt „xu-Module“ im Spitzencluster „Solarvalley Mitteldeutschland“ – das InnoProfile-Projekt „SiThinSolar“ –, ein internes Programm der Fraunhofer-Gesellschaft (Attract 692 034) sowie durch die finanzielle Unterstützung des BMBF im Rahmen des Zentrums für Innovationskompetenz SiLino® (Projekt-Nr. 03Z2HN11). Dieser Förderung sei hier ausdrücklich gedankt.

„Fazit“

Risse in Solarzellen in Photovoltaikmodulen stellen ein häufig auftretendes Problem in der Praxis dar und können zu einem signifikanten Leistungsverlust des Moduls und damit zu einer Verringerung der Lebensdauer führen. Besonders die Kombination von mechanischer und thermischer Belastung sorgt für die Entstehung von Rissen und deren Wachstum. Voraussagen lässt sich dieses Verhalten mithilfe computergestützter Simulationen, sodass die Rissgefahr durch eine entsprechende Designoptimierung verringert werden kann.



REFUSOL macht sich bezahlt!

Von 4 kW bis 1,3 MW.
Spitzenenerträge durch
hervorragende
Wirkungsgrade
von bis zu **98,2%**.

www.refusol.com

Solartechnology
Made in Germany