

Abschlussbericht
zum BMBF-geförderten Projekt

**Mikrorisse - Ursachen und Folgen für die Langzeitstabilität von
PV-Modulen (MIKRO)**

Kurzbezeichnung: **MIKRO**

Förderkennzeichen: **03SF0419A**

Projektdurchführung:

Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/Emmerthal (ISFH)

Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal

Projektleiter: Dr. Felix Haase

Autoren: Dr. Felix Haase, Dr. Marc Köntges

Projektlaufzeit: 15.02.2012 - 31.03.2016

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Inhaltsverzeichnis

1. KURZDARSTELLUNG	3
1.1 AUFGABENSTELLUNG.....	3
1.2 VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE	5
1.3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS	5
1.4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND, AN DEN ANGEKNÜPFT WURDE	10
1.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN	11
2. EINGEHENDE DARSTELLUNG	11
2.1 ERZIELTE ERGEBNISSE	11
2.1.1 AP1: Experimentelle Rissfortschrittsanalyse	11
2.1.1.1 Risshäufigkeit	14
2.1.1.2 Rissmuster	18
2.1.1.3 Rissbreiten	24
2.1.2 AP2: Modellierung rissabhängiger elektrischer Eigenschaften	27
2.1.2.1 AP2.1: Versuchs- und Probenaufbau	27
2.1.2.2 AP2.2: Korrelation Rissbreite/Risswiderstand	29
2.1.3 AP3: Modellierung des Rissfortschritts.....	35
2.1.4 AP4: Eigenspannungen in verlöteten Solarzellen	35
2.1.5. AP5: Rissfortschritt bei künstlicher Alterung	38
2.1.6. AP6: Simulation von Belastungsszenarien / Designvorschläge	39
2.1.7. AP7: Ausrichtung von Workshops	40
2.1.8. AP8: Herstellung von PV Modulen für AP1 und AP5	41
2.1.9. AP9: Mikrorissanalyse	41
2.2 DARSTELLUNG DER WICHTIGSTEN POSITIONEN DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES.....	41
2.3 DARSTELLUNG DER NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT	42
2.4 DARSTELLUNG DES VORAUSSICHTLICHEN NUTZENS, INSBESONDERE DER VERWERTBARKEIT DES ERGEBNISSES IM SINNE DES FORTGESCHRIEBENEN VERWETUNGSPLANS.....	42
2.5 WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG DES VORHABENS DEM ZUWENDUNGSEMPFÄNGER BEKANNT GEWORDENER FORTSCHRITT AUF DIESEM GEBIET BEI ANDEREN STELLEN	43
2.6 ERFOLGTE ODER GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN DES ERGEBNISSES.....	45

1. KURZDARSTELLUNG

1.1 AUFGABENSTELLUNG

Mikrorisse in waferbasierten Siliziumsolarzellen sind eine entscheidende Limitierung der Lebensdauer des Photovoltaik(PV)-Moduls. Ein tieferes Verständnis der Entstehung der Mikrorisse sowie der Folgen für die elektrische Leitfähigkeit im Laufe der Lebenszeit eröffnet ein großes Potential, den Energieertrag von PV-Modulen zu erhöhen: schon eine Verlängerung der garantierten Lebensdauer um fünf Jahre auf 30 Jahre entspräche einer Erhöhung des Energieertrags um bis zu 20 %.

Mikrorisse können während der gesamten Lebenszeit entstehen: in der Modulherstellung findet man nach dem Löten häufig mechanische Vorschädigungen [1], die sich in der Folge zu Mikrorissen ausweiten können, zum Beispiel beim Transport [2] oder bei Wind- und Schneelasten im Einsatz. Aber auch augenscheinlich unbeschädigte Solarzellen können bei zu hoher mechanischer Belastung brechen. Dies wird umso relevanter, da die Solarzellen immer dünner werden und damit früher brechen [3].

Mikrorisse sind mit der Elektrolumineszenz (EL)-Methode zuverlässig detektierbar, nicht nur an einzelnen Solarzellen, sondern auch im eingekapselten Modul [4,5]. Die Folgen dieser Mikrorisse für die Leistungsstabilität und damit Laufzeit von PV-Modulen begann man vor dem MIKRO Projekt erst langsam zu verstehen. Es hat sich herausgestellt, dass Mikrorisse in neuen Modulen zwar eine Leistungsdegradation hervorrufen, diese aber häufig gering ist. Dahingegen hat die Präsenz von Mikrorissen in einem Modul große Auswirkungen auf die Leistungsdegradation nach künstlicher Alterung, weshalb es notwendig ist, Mikrorisse entweder weitestgehend zu vermeiden, oder ihre Folgen zu minimieren [6]. Zuverlässigkeitsanalysen (Reliability analyses) wurden zwar an verschiedenen Instituten durchgeführt, allerdings bewegten sich diese vornehmlich auf dem Niveau von Vergleichsmessungen, eine detaillierte Analyse der Mikrorissentstehung und ihrer Folgen wurde nicht durchgeführt.

Das Ziel des interdisziplinär angelegten Projektes ist daher im ersten Schritt die Analyse der Entstehung von Mikrorissen in PV-Modulen. Daraus sollte ein grundsätzliches Verständnis der Bedingungen erarbeitet werden, die zu Mikrorissen führen. Darauf aufbauend sollten Strategien zur Vermeidung von Mikrorissen entwickelt werden. Parallel sollten Untersuchungen zu den Folgen der Mikrorisse in Bezug auf Leistungsstabilität und Zuverlässigkeit erfolgen, die die notwendige Basis für die Entwicklung neuer Modulkonzepte und Einkapselungsmaterialien schaffen und zukünftige PV-Module unempfindlicher auf Mikrorisse machen.

Das beinhaltet:

1. Experimentelle Untersuchung der Mikrorissentstehung unter definierter mechanischer Belastung mit Hilfe der EL. Ziel ist die Ableitung von Grenzwerten für die mechanische Belastbarkeit des PV-Moduls in Abhängigkeit von Vorschädigungen.
2. Numerische Simulation von Mikrorissentstehung und -fortpflanzung sowie Zuverlässigkeitsanalyse für praxisrelevante Riss-Szenarien. Ziel ist die Vorhersage der Versagenswahrscheinlichkeiten in Bezug auf die elektrische Kontaktierung der Zellbruchstücke.
3. Einrichten eines virtuellen Versuchsstandes als Ergänzung zu den experimentellen Untersuchungen. Ziel ist die Weiterentwicklung von effizienten und wirtschaftlich optimierten Bauweisen sowie die Vorauswahl geeigneter Parameter für experimentelle Untersuchungen.
4. Numerische Modellbildung der Eigenspannungszustände infolge von Temperaturbeanspruchung durch Löten sowie Vorhersage der Versagenswahrscheinlichkeit. Ziel ist es, das Bruchrisiko von Zellen ohne sichtbare Vorschädigungen vorherzusagen.
5. Entwicklung einer experimentellen Methode zur Eigenspannungsbestimmung an verstringten Solarzellen der durch Löten entstehenden Eigenspannungen im Silizium. Damit ist es möglich, Verbindungsprozesse zerstörungsfrei in Hinblick auf das Bruchrisiko zu bewerten.
6. Die experimentelle Untersuchung der Leistungsentwicklung von PV-Modulen mit Mikrorissen unter künstlicher Alterung. Ziel ist es, die Mechanismen der Alterung von Mikrorissen zu identifizieren.

Das Ziel des Projekts ist, PV-Module in Bezug auf ihr Ausfallrisiko zuverlässiger bewerten zu können sowie Belastungsobergrenzen bestimmen zu können, die als Grundlage für Neu- und Weiterentwicklungen verwendet werden können. Die Grenzen der Material- und Gewichtseinsparungen zukünftiger Modulkonzepte sollten so weiter ausgereizt werden, was zu reduzierten Modulherstellungskosten sowie einer größeren Langlebigkeit der Module führen sollte. Durch die geplanten Untersuchungen im Rahmen einer Zuverlässigkeitsanalyse sowie die Einrichtung eines virtuellen Versuchsstandes sollen die experimentellen Untersuchungen sinnvoll ergänzt werden, was zu weiteren Einsparungen bei den Entwicklungskosten führen sollte.

Um den Fachkräftenachwuchs zu stärken, sollten die neuesten Ergebnisse zur Bewertung von Mikrorissen und Vorschädigungen, die in EL-Aufnahmen von PV-Modulen erkennbar sind, sowie aktuelle Ergebnisse aus diesem Projekt in Workshops der Industrie sowie dem wissenschaftlichen Nachwuchs zugänglich gemacht werden.

1.2 VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE

Das MIKRO-Projekt erfüllte nach Einschätzung der Zuwendungsempfänger die in der Förderbekanntmachung des BMU und BMBF vom 21. Juli 2010 zur Innovationsallianz Photovoltaik. Bezüge zu der Bekanntmachung bestanden in folgenden Punkten: Die Rissausbildung und -ausbreitung ist eine grundlegende materialwissenschaftliche Fragestellung, die für die Leistungsstabilität von PV-Modulen entscheidend ist (siehe 2.2a der Bekanntmachung). Es werden neue experimentelle Methoden verwendet, insbesondere moderne mathematische Simulationsverfahren wie die Multiskalensimulation (2.2a). Die geplanten Investitionen in Eigenspannungsmesstechnik stärkt die Infrastruktur am ISFH (2.2b).

Dieses Projekt sollte keine Einzelförderung und kein Verbundvorhaben allein zwischen wissenschaftlichen Partnern sein (3.). Vielmehr sollte es ein kooperatives Forschungsprojekt zwischen dem grundlagenorientierten Universitätslehrstuhl ISD der Leibniz Universität Hannover, dem anwendungsorientierten Forschungsinstitut ISFH und der grundlageninteressierten Firma Schott Solar AG sein. (2.2b). Leider beendete die Firma Schott Solar AG ihre Beteiligung an dem Projekt schon früh, da Schott Solar AG aus der Siliziumphotovoltaik komplett ausstieg.

Die wirtschaftliche Verwertbarkeit der Erkenntnisse dieses Projektes sollte in einer deutlichen Verlängerung der Lebensdauer von PV-Modulen und einer damit einhergehenden Reduktion der PV-Stromkosten bestehen. Die Ergebnisse sollten außerdem die Voraussetzungen für weitere Materialeinsparungen schaffen (2.1).

Das ISFH verfolgte in dem Gesamtprojekt vorrangig oben beschriebene Teilziele:

1. Experimentelle Untersuchung der Mikrorissentstehung unter mechanischer Belastung mit Hilfe der EL. Ziel war die Ableitung von Grenzwerten für die mechanische Belastbarkeit des PV-Moduls in Abhängigkeit von Vorschädigungen.
2. Numerische Modellierung der lastabhängigen Leistungsminderung von PV-Modulen aufgrund von Zell-Rissen.
3. Entwicklung einer experimentellen Methode zur Eigenspannungsbestimmung an verstringten Solarzellen der durch Löten entstehenden Eigenspannungen im Silizium. Damit sollte es möglich sein, Verbindungsprozesse zerstörungsfrei in Hinblick auf das Bruchrisiko zu bewerten.
4. Die experimentelle Untersuchung der Leistungsentwicklung von PV-Modulen mit Mikrorissen unter künstlicher Alterung. Ziel ist es, die Mechanismen der Alterung von Mikrorissen zu identifizieren. Das ist die Voraussetzung, um Kriterien für alternative Materialien für z.B. die Einkapselung zu formulieren, die Mikrorisse weniger kritisch macht.

1.3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS

Die Partner haben unterschiedliche Schwerpunkte in diesem vom ISFH geleiteten Projekt. Abb. 1 veranschaulicht die ursprünglich geplante Arbeitsaufteilung. Die Firma Schott Solar AG sollte die Rissanalysen in Ihrem Haus für verschiedene Zelllötverfahren durchführen. Die bereits vorhandene Rissanalysemethode sollte im Rahmen des Projektes bei Schott Solar verbessert werden. Mit Hilfe dieser zerstörungsfreien Rissanalyse wäre es Schott möglich Solarzellen mit unterschiedlichen

Rissanfangsszenarien für PV-Module zusammen zu stellen und daraus wiederum PV-Module mit unterschiedlichen Produktionsparametern herzustellen. Außerdem sollten bei Schott Solar FEM Simulationen zur Eigenspannungsverteilung im Bereich der Zellverbinder durchgeführt werden. Die Eigenspannungsverteilung und die Materialparameter von Schott Solar sollten dem ISD als Grundlage für die Modellbildung des Rissfortschritts dienen. Das ISFH sollte an von Schott Solar mit verschiedenen Zellotverfahren bzw. unterschiedlichen Rissanfangsszenarien hergestellten PV-Modulen experimentell die Risswahrscheinlichkeit und Rissrichtung im PV-Modul ermitteln. Die Risswahrscheinlichkeit und Rissrichtung sollte dem ISD wiederum zur Kalibrierung und Prüfung Ihrer Rissfortschrittsmodelle dienen. Mit Hilfe der Rissfortschrittsmodelle des ISD sollte am ISFH ein Modell zur Leistungsminderung des Solarmoduls durch Mikrorisse aufgebaut werden.

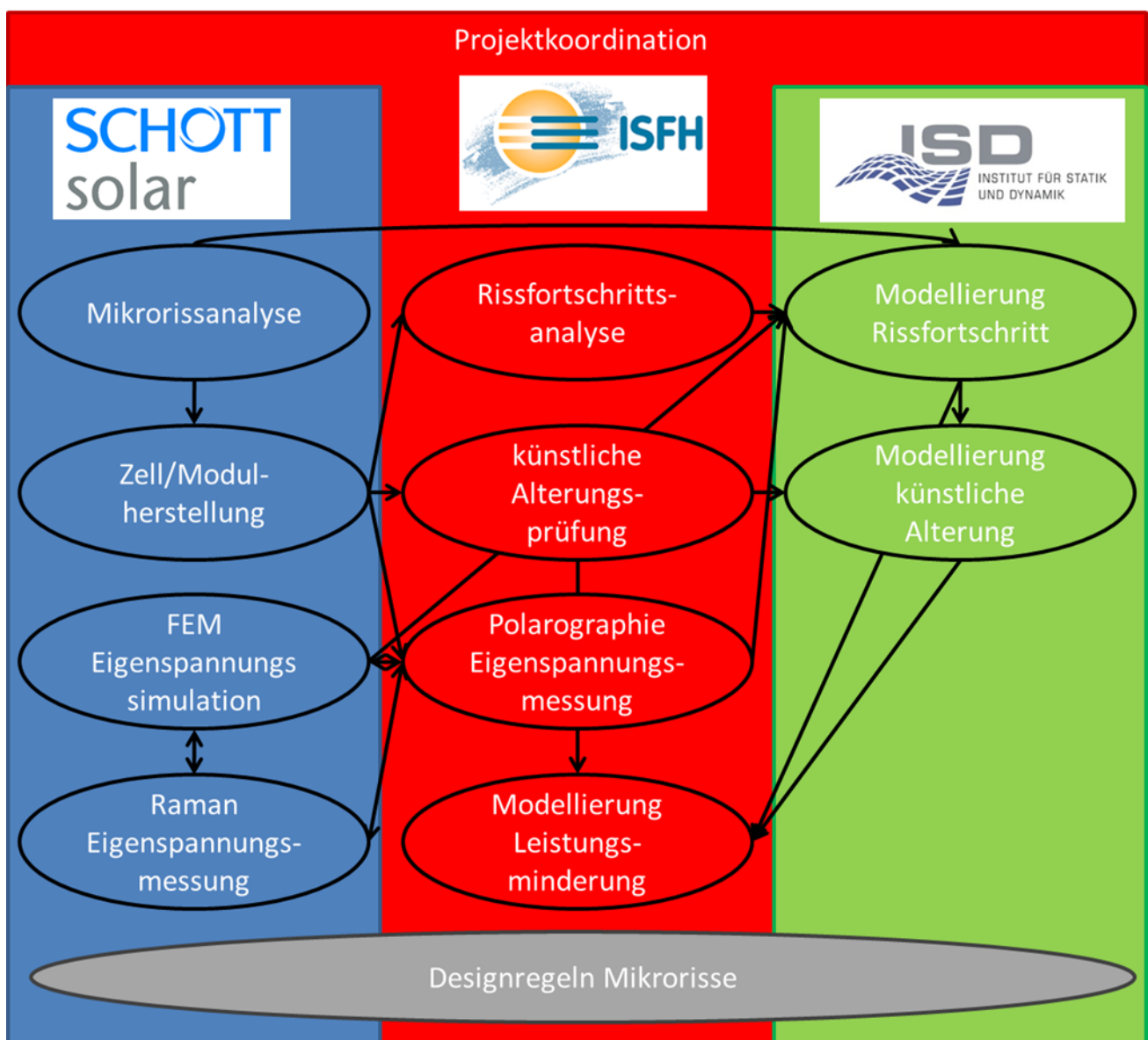


Abbildung 1: Schema der ursprünglichen Projektzusammenarbeit zwischen Schott Solar AG, ISD und ISFH.

Am ISFH sollte ein Messgerät aufgebaut werden, dass es erlauben sollte mittels der Spannungsdoppelbrechung Eigenspannungen im Silizium von Solarzellen zu messen. Diese Messmethode ist zerstörungsfrei. Bei Schott Solar sollten ebenfalls Eigenspannungsmessungen

mittels Ramanspektroskopie durchgeführt werden. Die beiden Methoden würden sich insofern ergänzen, da Ramanspektroskopie eine etablierte Methode ist und quantitative Aussagen liefert, aber spezielle Probenpräparation erfordert, die die Eigenspannung evtl. beeinflusst. Die Polarographie sollte es hingegen zukünftig ermöglichen die Eigenspannung direkt an verlöteten Solarzellen zerstörungsfrei zu messen. Am ISFH sollten Alterungsprüfungen an PV-Modulen mit Produktionsparametervariationen bzw. unterschiedlichen Rissanfangsszenarien durchgeführt werden, um die potentiellen Leistungsminderungen aufgrund von Mikrorissen einschätzen zu können. Das ISD sollte versuchen den Rissfortschritt entsprechend der Alterungsprüfungen zu simulieren und mit den Ergebnissen vom ISFH abzugleichen. Gemeinsam sollte eine Designrichtlinie zur Vermeidung von Leistungsverlusten durch Mikrorisse im PV-Modul erarbeitet werden.

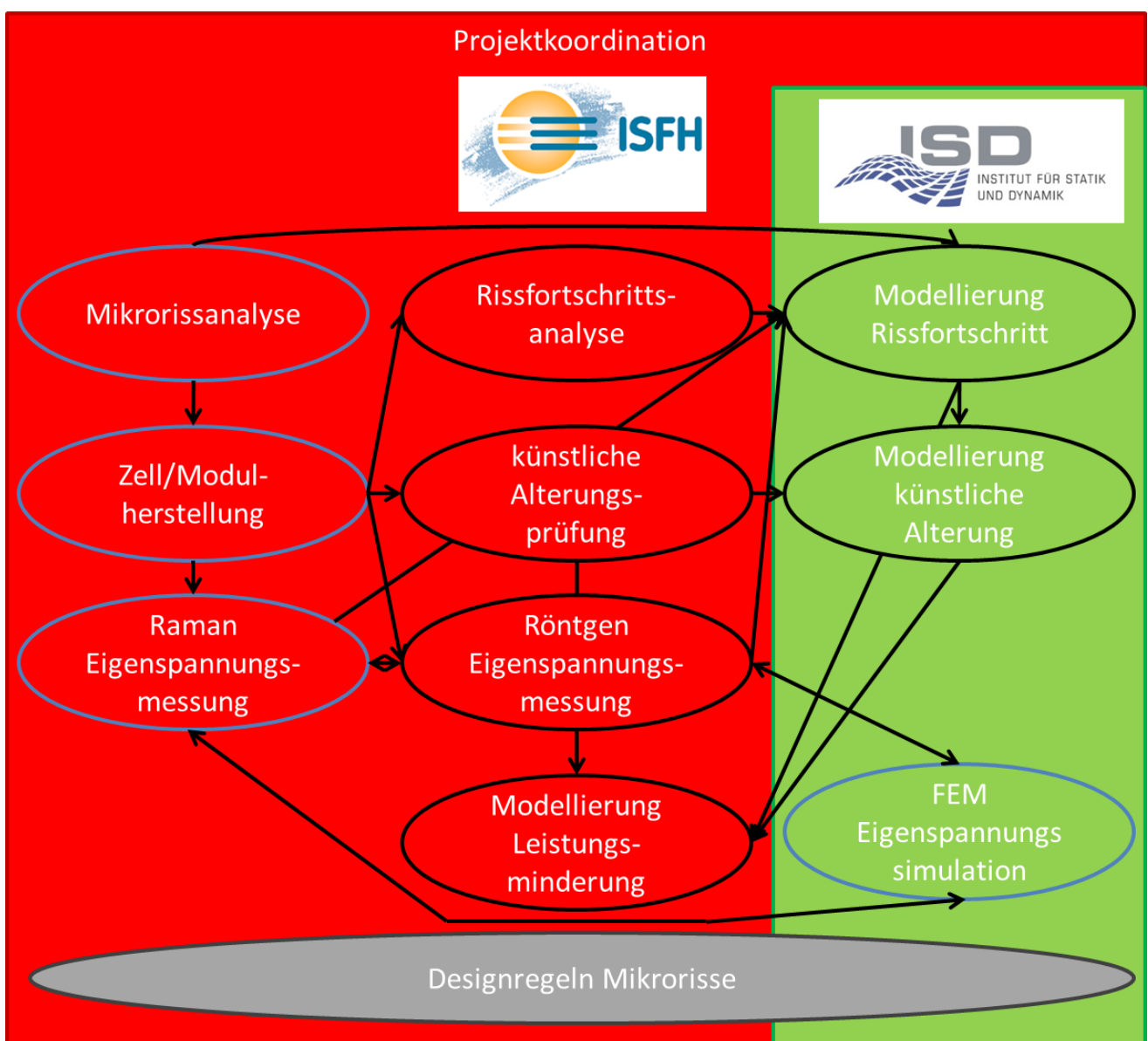


Abbildung 2: Schema der Projektzusammenarbeit zwischen ISD und ISFH nach allen Änderungen.

Wegen des Ausstiegs des Verbundpartners Schott Solar AG aus dem Mikro Projekt, legten sowohl das ISFH als auch das ISD einen Aufstockungsantrag vor, welcher auch genehmigt wurde, um die ursprünglichen Projektziele erreichen zu können. Die zu diesem Zweck unbedingt erforderlichen

Arbeiten, die laut bewilligtem Antrag von der Firma Schott Solar AG durchgeführt werden sollten, wurden zum ISFH und ISD transferiert. In Abb. 2 ist die neue Aufteilung dargestellt.

Im AP 3 übernimmt das ISD die Validierung der Rissfortschrittssimulationen von Schott Solar AG. In AP 4 übernimmt das ISD die Simulationen der Eigenspannungen in Solarzellen durch die Lötprozesse und die Untersuchung der Folgen der Eigenspannungen für das mechanische Verhalten. Die bis dahin erreichten Projektergebnisse haben gezeigt, dass das komplizierte Schädigungsverhalten einer Solarzelle spezielle, geeignete Modellierungsmethoden erfordert. Diese neuartigen numerischen Analysemethoden sollten in einer verlängerten Projektlaufzeit vom ISD in AP 3 fertig entwickelt werden. Diese Arbeiten sind für eine zuverlässige Schadensvorhersage unabdingbar und tragen somit in großem Maße zu der Erreichung der ursprünglichen Projektziele bei.

Die Hauptaufgabe von Schott Solar AG war die Herstellung der Photovoltaikmodule. Da diese sich von Beginn des Projekts erstreckte, musste das ISFH die Herstellung der PV-Module in einem neuen AP 8 übernehmen, wie in einem Umwidmungsantrag direkt nach Ausstieg von Schott Solar AG bewilligt. Dafür musste ein passender Laminator und die Materialien für den Modulbau beschafft werden. Aufgrund dieser Aufgabe musste der Projektablauf in Absprache mit dem Projektträger so umorganisiert werden, dass sich die ursprünglich vom ISFH geplanten Arbeitspakete um bis zu 10,5 Monate verschieben. Wegen dieser Verschiebung und der zusätzlichen Aufgabe am Beginn des Projekts war eine Verlängerung um 10,5 Monate notwendig, um die ursprünglichen Projektziele zu erreichen. Diese Verlängerung wurde bewilligt. Des Weiteren übernahm das ISFH von Schott Solar AG, die Rissanalyse mit EL in den AP 1 und 5 und die Eigenspannungsmessung mit Ramanspektroskopie in AP 4. Im Juli 2015 war bereits abzusehen, dass die Messung der mechanischen Eigenspannung im Silizium (MS5 in AP4) nicht bis zum Ende der aufgestockten Projektlaufzeit durchgeführt werden könnte. Da diese Messung jedoch ein zentrales Ziel im Projekt waren, stellten das ISFH und das ISD, welche die Ergebnisse der Messung als Abgleich für ihre Simulationsergebnisse benötigten, jeweils einen Antrag auf kostenneutrale Verlängerung bis zum 31.03.2016, welche auch genehmigt wurde.

Der Informationsaustausch wurde planmäßig durch drei Projekttreffen pro Jahr gewährleistet. Zusätzlich fanden planmäßig zwei weitere Projekttreffen auf den geplanten Workshops statt.

Die geplanten Workshops sollten gemeinsam vom ISD und dem ISFH organisiert werden. Ein vom ISD federführend geplanter Workshop findet an der Universität Hannover und einer vom ISFH federführend geplanter Workshop findet am ISFH statt. Diese wurden auch so durchgeführt.

Abb. 3 zeigt die Arbeitspakete im Balkenplan mit allen Projektänderungen.

Nr.	Kurzbezeichnung	1. Q. 2012	2. Q. 2012	3. Q. 2012	4. Q. 2012	1. Q. 2013	2. Q. 2013	3. Q. 2013	4. Q. 2013	1. Q. 2014	2. Q. 2014	3. Q. 2014	4. Q. 2014	1. Q. 2015	2. Q. 2015	3. Q. 2015	4. Q. 2015	1. Q. 2016	
	Halbjahrestreffen	X																	
	Jahresbericht		X																
	Kickoff			X															
	Projektkoordination					X													
AP0	AP0 Projektorganisation																		
AP1	AP1 Experimentelle Risikostreifeanalyse																		
	1.1 Aufbau des 4-Linien Biegeversuchs																		
	1.2 4-Linien Biegeversuche an rahmenlosen Modulen																		
	1.3 Vergleich verschiedener Fügeverfahren																		
AP2	AP2 Modellierung rissabhängiger elektrischer Eigenschaften																		
	2.1 Versuche Aufbau																		
	2.2 Korrelation Risikostreife/Risikowiderstand																		
AP3	AP3 Modellierung des Rissfortschritts																		
	3.1 Überführung Materialmodelle																		
	3.2 Modellvalidierung																		
AP4	AP4 Eigenspannungen in verflochtenen Solarzellen																		
	4.1 Eigenspannungsmessungen an teilmetallisierten Zellen																		
	4.2 Eigenspannungsmessungen in Reflexion																		
AP5	AP5 Rissfortschritt bei künstlicher Alterung																		
	5.1 Alterung von Mikrokrissen im PV-Modul																		
AP6	AP6 Simulation von Belastungsszenarien / Designvorschläge																		
	6.1 Belastungsszenarien elektrisch simulieren																		
	6.2 Designvorschläge Mikrocrackmanagement																		
AP7	AP7 Ausrichtung von Workshops																		
	7.1 Workshop 1+2, Schulungsunterlagen herstellen																		
AP8	AP8 Herstellung von PV Modulen für AP 1																		
	8.1 Herstellung der Module für AP 1																		
	8.2 Herstellung der Module für AP 5																		
AP9	AP9 Mikrorissanalyse																		
	9.1 Charakterisierung der Mikrorisse																		

█ Eigene Arbeitspakete
█ Eigene Arbeitspakete aus Aufstockungsantrag und Verlängerung
█ Von Schott Solar AG übernommen
█ Geplante Erreichung des Meilensteins
█ Tatsächliche Erreichung des Meilensteins

U Im Umwidmungsantrag bewilligt
A Im Zwischenbericht erwähnter geänderter Arbeitsplan aufgrund des Ausstiegs von Schott Solar AG

Abbildung 3: Balkenplan zum Ablauf des MIKRO-Projektes inklusive Aufstockungsantrag und kostenneutraler Verlängerung.

1.4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND, AN DEN ANGEKNÜPFT WURDE

In einer Arbeit von [7] wurde empirisch die Abhängigkeit des Mikrorissfortschritts von der Verwendeten Verbindungstechnik für die Solarzellen untersucht. In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass Abhängig von Verbindungsprozess der Rissfortschritt wesentlich beeinflusst werden kann. In dieser Arbeit wurde eine Kombination von mechanischen Belastungen und Temperaturzyklenprüfung, wie es auch in diesem Projekt geplant war, zur Qualitätsanalyse herangezogen. Eine quantitative Auswertung wurde nicht durchgeführt. Im Rahmen des vom BMU geförderten Projektes ReST (0329819B) wurde ein Modell zur Simulation der mechanischen Eigenspannung von Solarzellen aufgrund des Feuerprozesses der Metallpaste und der Lötverbindung erstellt. Der Fokus des Projektes lag auf der „Klärung von Bruchursachen bei in der Produktion gebrochenen Solarzellen“. Abgesehen von dem gekürzten Projektbericht waren uns keine Veröffentlichungen aus diesem Projekt bekannt. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes μ -Module (FKZ03SF0337A) wurden Modelle zur Simulation der Eigenspannungszustände von Solarzellen und Solarmodulen erstellt und das Rissbild mit der Elektrolumineszenzmethode an künstlich belasteten PV-Modulen untersucht und mit der Eigenspannungssimulation verglichen. Im Rahmen dieses Projektes gab es Veröffentlichungen die die Eigenspannung von Solarzellen und Zellverbindern im thermomechanisch belasteten PV-Modul beschrieben [8,9]. Ein Rissfortschrittsmodell war unseres Wissens für PV-Module bisher nicht erstellt worden.

Zur quantitativen Analyse von Eigenspannungen gibt es eine Reihe von etablierten Verfahren (Röntgenbeugung, Neutronenstreuung, Streuung von Gamma-Strahlung, Ramanspektroskopie und Spannungsdoppelbrechung). Für die Charakterisierung der Eigenspannungen in einkristallinem oder multikristallinem Silizium kommen aufgrund des einkristallinen Charakters der Solarzellen nur Raman Spektroskopie und Spannungsdoppelbrechung in Frage. Dieses Verfahren wurde bereits erfolgreich eingesetzt um Eigenspannungen in Körnern von multikristallinem Silizium im Bereich von 20-30 MPa zu messen [10]. Ebenso wurde eine Eigenspannungsanalysen mit Doppelspannungsbrechung an Wafern im Durchlichtverfahren mit einer Auflösung von ca. 1,5 MPa durchgeführt [11]. Beide Verfahren benötigen eine speziell präparierte Probe, um Eigenspannungen messen zu können. In der Arbeit von He konnte gezeigt werden, dass die Eigenspannung mit dem Photolumineszenzsignal des Wafers korreliert. Eine Abhängigkeit des Photolumineszenzsignals von der Eigenspannung ist zum einen durch mechanische Spannungen auftretende Versetzungslinien im Kristall und durch die Spannungsabhängige Veränderung der Bandlücke von Silizium im Bereich von $-4,5 \times 10^{-6}$ eV $\text{kp}^{-1}\text{cm}^2$ in (111) bis $-7,5 \times 10^{-6}$ eV $\text{kp}^{-1}\text{cm}^2$ in (100)-Richtung zu erwarten [12].

Im MIKRO-Projekt war zunächst geplant, die schnelle kamerabasierte Methode der Spannungsdoppelbrechung zu nutzen. Vormessungen haben jedoch gezeigt, dass die Reflektion der Messstrahlung an der Solarzellenrückseite zu gering ist, um ein rauschfreies Signal zu erhalten. Deswegen wurde im Projekt versucht die mechanische Eigenspannung im Silizium mittels Ramanspektroskopie zu messen.

1.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN

Die Kompetenzen der Antragsteller ergänzen sich für dieses Projekt. Experimentelle Analysen und numerische Modellbildung bilden gemeinsam das Fundament für einen erfolgreichen Abschluss.

Das Institut für Solarenergieforschung (ISFH), An-Institut der Leibniz Universität Hannover und gemeinnützige GmbH, entwickelt seit 1987 innovative Komponenten für die photovoltaische und solarthermische Nutzung der Sonnenenergie. Die Arbeitsgruppe Module der Abteilung Photovoltaik hat langjährige Erfahrungen in der Prüfung und Charakterisierung von PV-Modulen. Das ISFH hat die interdisziplinäre Forschergruppe koordiniert und die experimentellen Untersuchungen dieses Projektes durchgeführt.

Das Institut für Statik und Dynamik (ISD) der Leibniz Universität Hannover wurde 2005 als Zusammenschluss des Instituts für Statik und des Curt-Risch Instituts für Dynamik, Schall- und Messtechnik gegründet. Das ISD gliedert sich in die Abteilungen Schwingungen und Verbunde. Auf beiden Gebieten liegen umfangreiche Erfahrungen im Bereich der numerischen Modellbildung, Simulation, Validierung und Kalibrierung mit Messdaten sowie der Prognose vor. Das ISD hat im Rahmen dieses Projekts die Arbeiten auf dem Gebiet der Numerik durchgeführt.

Die Schott Solar AG verfügt über 52 Jahre Erfahrung in der Solartechnik. Das Unternehmen entwickelt, fertigt und vermarktet hocheffiziente Receiver, eine der Schlüsselkomponenten für Solarkraftwerke mit Parabolrinnen-Technologie, sowie innovative und qualitativ hochwertige Photovoltaikprodukte. Mit kristallinen Solarwafern, Solarzellen, Solarmodulen und a-Si-Dünnschichtmodulen deckte SCHOTT Solar Kernbestandteile der Wertschöpfungskette photovoltaischer Stromerzeugung ab. Die Schott Solar AG hat sich im Juni 2012 komplett aus der kristallinen Photovoltaik zurückgezogen und somit auch aus dem MIKRO-Projekt.

Wir arbeiteten im Projekt noch mit anderen Unternehmen zusammen, welche unsere Forschungsergebnisse in ihre Entwicklung einfließen lassen konnten. Wir testeten Verbinder von Bruker-Spaleck GmbH und Umicore, EVA Einkapselungsmaterial von EVASA. Des Weiteren haben wir uns mit den deutschen Firmen SOLON und Aleo Solar auf den Workshops ausgetauscht und der deutsche Modulhersteller Algatec Solar AG, der Anlagenhersteller für Photovoltaik Schmid Technology GmbH, der Verbinderbändchenhersteller Schlenk Metallfolien GmbH & Co. KG, das Ingenieur- und Sachverständigenbüro InsidePV und das Ingenieurbüro Fleiß haben ihr starkes Interesse an den Ergebnissen des Projekts ausgedrückt. Die jeweiligen Interessensbekundungen lagen dem Aufstockungsantrag des ISFH bei.

2. EINGEHENDE DARSTELLUNG

Im Folgenden werden die im MIKRO-Projekt erzielten Ergebnisse ausführlich dargestellt sowie der voraussichtliche Nutzen und die Ergebnisverwertung des Projektes dargelegt.

2.1 ERZIELTE ERGEBNISSE

2.1.1 AP1: Experimentelle Rissfortschrittsanalyse

In AP1.1 wurde zur Untersuchung des Rissfortschritts unter definierten Belastungsbedingungen ein Vier-Linien-Biegeversuch mit Kraftaktuatoren für die definierte Belastung von rahmenlosen PV

Modulen aufgebaut. Abb. 4 zeigt den Vier-Linienbiegeaufbau mit den Charakterisierungsmethoden. Während der Belastung wird mit der Elektrolumineszenz (EL) - Methode das Modul auf Zellrisse analysiert. In einem Vier-Linien-Biegeversuch ist die mechanische Belastung zwischen den zwei zentralen Linien maximal homogen, so dass in einem einzigen Versuch mehrere Zellen der gleichen Last ausgesetzt und damit vergleichbar sind. So konnte eine zuverlässigere statistische Auswertung der Ergebnisse in Bezug auf kritische Lasten erfolgen. Die Position der Solarzellen und somit die Zellrissebreite und der Zellabstand wird mit der digitalen Bildkorrelation (digital image correlation DIC) gemessen. Die Biegerollen haben einen Abstand von 1138 mm zwischen den Mittelachsen und werden auf das Frontglas des Moduls gesetzt. Dahingegen haben die Lastrollen einen Abstand von 1500 mm zwischen den Mittelachsen und werden auf die Rückseite des Moduls gesetzt. Alle Rollen haben einen Durchmesser von 89 mm. Abwechselnd nehmen wir EL Bilder auf und belasten das Modul. Während der Belastung messen wir die Kraft mit einer Kraftdose (Zwick GmbH/BX1-EZ005.A1K-001) und die Verschiebung der Biegerollen. Wir messen die Position der Solarzellen mit der digitalen Bildkorrelation. Die zwei Kameras der DIC benutzen das Muster auf den Solarzellen, um ein 3-dimensionales Bild und die Position jeder einzelnen Solarzelle im Modul mit einer Unsicherheit von 8 μm zu bestimmen.

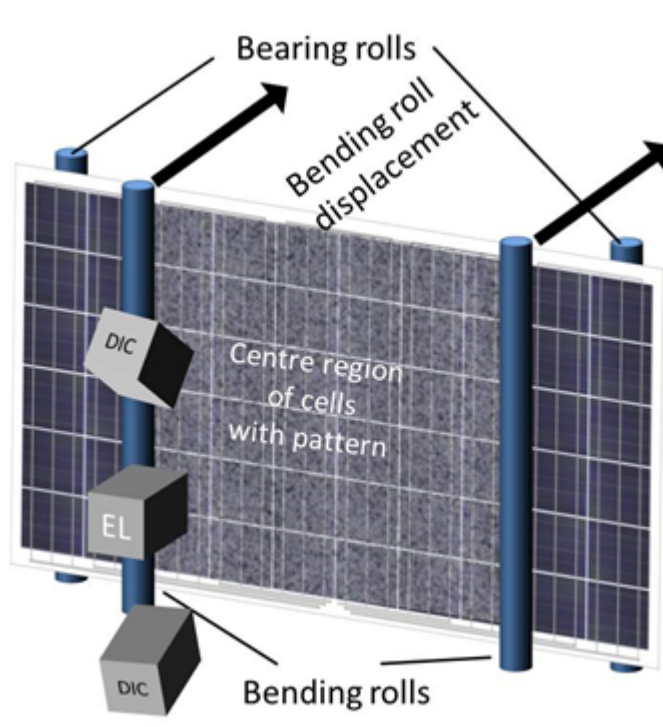


Abbildung 4: Schematische Zeichnung des 4-Linien Biegeaufbaus. Das Modul wird zwischen die Biege- und Lastrollen platziert. Die Elektrolumineszenz (EL) Kamera wird zur Detektion von Zellrissen benutzt. Die Zellrisse und Zellabstände werden mit der digitalen Bildkorrelation (DIC) gemessen.

Das Ziel des AP1.2 ist die Bestimmung der Bruchspannung der Solarzellen. Tabelle 1 listet alle 10 für die Bruchspannungsanalyse hergestellten PV Module auf. Die 10 Module bestehen aus kommerziellen multikristallinen vollquadratischen 3-Busbar Solarzellen je $15.6 \times 15.6 \text{ cm}^2$ groß. Die Unterschiede der Module sind alle in Tabelle 1 genannt. Die Modulbezeichnung setzt sich aus den unterschiedlichen Spezifikationen der Module zusammen. Das erste Zeichen steht für die Orientierung der Zellbusbare zu den Biegerollen, \perp für senkrechte und \parallel für parallele und $\parallel\perp$ für \parallel

in einer Hälfte des Moduls und \perp in der anderen Hälfte des Moduls. BS steht für ein backsheet (Rückseitenfolie) und $\overline{\text{BS}}$ steht für keine Rückseitenfolie im Modul. Es gibt 3 gleiche Module \parallel BS, die a, b und c genannt werden. Modul \parallel BS-300 hat eine EVA Dicke von 300 μm statt 460 μm und Modul \parallel BS-pd hat pre-damaged (vorgeschiedigte) Zellen, welche später beschrieben wird. Abb. 5 zeigt exemplarisch den schematischen Querschnitt einer Solarzelle in Modul \parallel BS. Mit Hilfe dieser Eigenschaftskombinationen in den PV Modulen soll festgestellt werden, welche Eigenschaften die Zellrisssbildung in bestimmter Weise beeinflussen.

Tabelle 1: Unterschiede der einzelnen im 4-Linienbiegeversuch getesteten Module

Modulbezeichnung	\perp BS	\parallel BSa	$\parallel\perp$ BS	$\perp\overline{\text{BS}}$	\parallel BS-300	\parallel BSb	\parallel BSc	\parallel BS-pd	$\parallel\perp\overline{\text{BS}}$	$\parallel\overline{\text{BS}}$
Modulnr.	1	2	3	6	13	14	18	19	20	21
Busbar- zu Biegerollenorientierung	senkrecht	parallel	gemischt	senkrecht	parallel	parallel	parallel	parallel	gemischt	parallel
Zellverbindung	senkrecht	parallel	kein	senkrecht	parallel	parallel	parallel	parallel	kein	parallel
EVA Dicke je [μm]	460	460	460	460	300	460	460	460	460	460
Rückseitenfolie	ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja	nein	nein
Rissbreite mit DIC	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja	ja	ja	ja
Zellen mit Vorschädigung	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja	nein	nein

In allen Modulen außer $\parallel\perp$ BS und $\parallel\perp\overline{\text{BS}}$ werden die Solarzellen mit einem Stringer (Module Stringer Simplex/Mikron Berlin GmbH) mittels Kontaktlöten verbunden. Wir benutzen Kupfer Verbinderbändchen mit einer Breite von 1.5 mm und einer Dicke von 150 μm . In den Modulen \perp bestehen die Zellstrings aus 10 Solarzellen und sechs Zellstrings werden in Serie verschaltet wie in Standardmodulen. In den Modulen \parallel bestehen die Zellstrings aus sechs Solarzellen und 10 Zellstrings werden in Serie verschaltet, um den Auswirkung der Orientierung der Verbinderbändchen auf Zellrisse zu untersuchen. In den Modulen $\parallel\perp$ werden die Solarzellen nicht verbunden, um den Einfluss der Präsenz der Verbinderbändchen zu analysieren. Im Gegensatz zu Standardmodulen werden hier keine Bypass Dioden installiert. Der Zellabstand beträgt 4 mm in jede Richtung. Die Größe des gehärteten Sicherheitsglases ist 1680 x 1030 mm² mit einer Dicke von 3.2 mm. Wir benutzen zwei Schichten EVA, wobei jede Schicht 460 μm dick ist. Modul \parallel BS-300 hat zwei 300 μm dicke EVA Schichten. Module BS besitzen eine 302 μm dicke transparente Rückseitenfolie. Die Rückseitenfolie besteht aus einem Schichtstapel aus primer / adhesive / PET / adhesive / PET / UV Schutzschicht. Module $\overline{\text{BS}}$ -haben keine Rückseitenfolie.

Alle Module haben keine Vorschädigungen außer Modul \parallel BS-pd. Abb. 5 zeigt exemplarische Edge Light Bilder [13] von Zellen aus Modul \parallel BS-pd. Diese Technik benutzt ein Laserlicht,

welches senkrecht auf die Waferkante gerichtet wird. Das Licht wird in die Zelle eingekoppelt und an Rissen wieder aus der Zelle gestreut. Eine Kamera macht Bilder von der Oberseite der Solarzelle, wo das gestreute Licht detektiert und der Riss lokalisiert wird. Abb. 5a) und b) zeigen schmale Kantenrisse a) senkrecht und b) parallel zu den Verbinderbändchen und Biegerollen. Die Zellen in diesem Modul heißen a) \parallel BS-pd-perp, b) \parallel BS-pd-par und c) \parallel BS-pd-cross. Im Vergleich von Modul \parallel BS-pd mit Modul \parallel BSa, b und c untersuchen wir den Einfluss dieser Risse auf die Bruchkraft. Ein für EL transparentes Punktmuster wird bei Modulen \parallel BSc, \parallel BS und \perp BS auf die Vorderseite der Zellen gesprüht. Die Punktgröße des Musters ist zwischen einigen μm und einigen mm und die durchschnittliche Dichte ist ungefähr 50 %. Das EL transparente Muster ermöglicht die Messung der Zellpositionen mit DIC und das Rissmuster mit EL ohne gegenseitige Beeinflussung auf der gleichen Probe. Wir errechnen die Rissbreite und den Zellabstand aus den Zellpositionen.

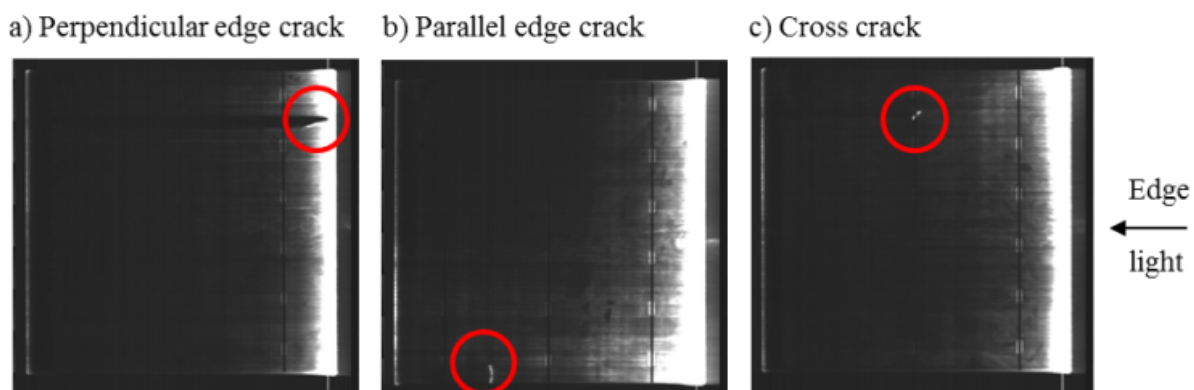


Abbildung 5: Exemplarische Edge Light Bilder der Zellen in Modul \parallel BS-pd. a) und b) zeigen mit einem roten Kreis markierte Kantenrisse a) senkrecht und b) parallel zu den Busbars, Verbinderbändchen und Biegerollen. c) zeigt einen rot markierten Kreuzriss am mittleren Busbar. Das Edge Light scheint von der rechten Seite in die Zelle und wird an den Rissen wieder herausgestreut.

Die Module werden in Schritten von $d_{br} = 5 \text{ mm}$ bis zu einer Biegerollenverschiebung von mindestens 68 mm gebogen. Nach jedem Biegeschritt wird ein EL Bild aufgenommen, um neue Risse zu detektieren und zwei DIC Bilder werden aufgenommen für die Berechnung der 3-dimensionalen Form der Zellen. Damit wird die Entwicklung der Rissbreiten und Zellabstände mit steigender Durchbiegung berechnet. Die Module \parallel BSc, \parallel BS, \parallel BS-pd, und \perp BS werden sogar bis 120 mm Durchbiegung ohne Entlastung verbogen. Nach 100 Durchbiegungen bis zu 68 mm werden die anderen Module ebenfalls bis 120 mm verbogen. Eine Durchbiegung von 15 mm entspricht der mechanischen Last, welche bei Mittelzellen bei der IEC 61215 5400 Pa Lastprüfung für gerahmte Module auftreten [14]. Da nur wenige Zellen bei dieser Last brechen, ist die Statistik für ein Modul ziemlich gering. Um die Statistik zu erhöhen, müsste man eine große Anzahl von Modulen testen, was innerhalb des Projekts nach dem Ausstieg von Schott nicht mehr möglich war. Deswegen entschieden wir uns für die Alternative, die Durchbiegung zu erhöhen.

2.1.1.1 Risshäufigkeit

Zwischen den inneren Biegerollen werden 36 Zellen homogen belastet. Wir definieren eine Zelle als gerissen, wenn mindestens ein Riss durch die ganze Zelle von einer bis zu anderen Zellkante geht. Die Risshäufigkeit ist definiert als Verhältnis der gebrochenen Zellen zu der Gesamtzahl der Zellen. Abb. 6 zeigt die Risshäufigkeit über die Biegerollenverschiebung aller Module. In Modul \parallel BS-pd unterscheiden wir zwischen unterschiedlichen Vorschädigungen. Es gibt kleine

Kantenrisse parallel zu den Biegerollen (Gruppe \parallel BS-pd-par) und senkrecht zu den Biegerollen (Gruppe \parallel BS-pd-perp) und Kreuzrisse am Mittelbusbar (Gruppe \parallel BS-pd-cross). Kleine Kantenrisse parallel zu den Biegerollen und Kreuzrisse zeigen eine weit größere Risshäufigkeit als Kantenrisse senkrecht zu den Biegerollen, welche ähnlich häufig wie unbeschädigte Zellen brechen. Die Module mit Verbinderbändchen zeigen bei großer Durchbiegung eine weit höhere Risshäufigkeit als die Module mit Verbinderbändchen senkrecht zu den Biegerollen oder Module ohne Verbinderbändchen.

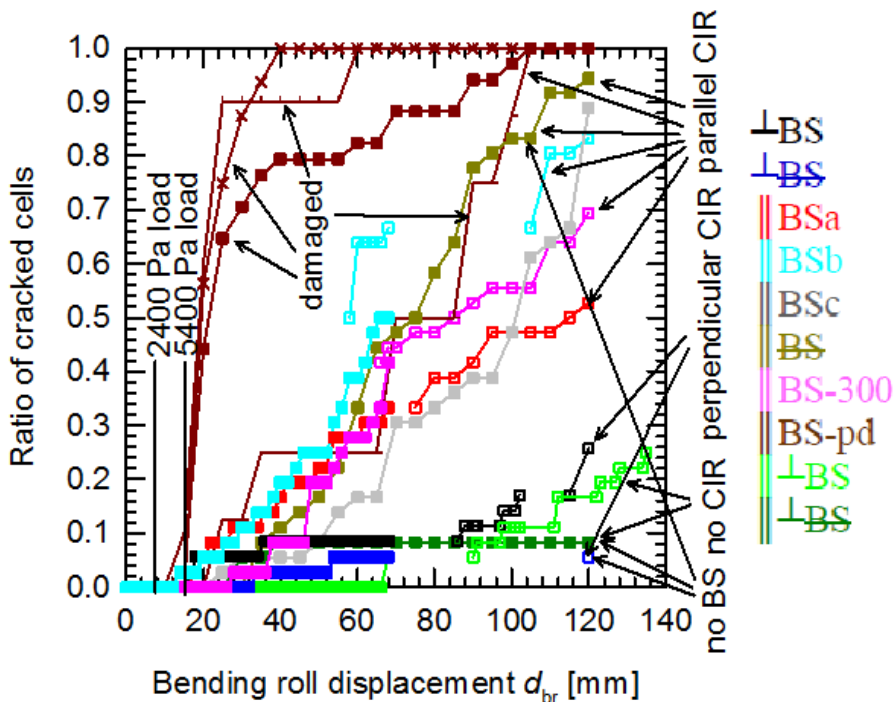


Abbildung 6: Häufigkeit gerissener Zellen der 10 Testmodule in Abhängigkeit der Durchbiegung. Die verschieden vorgeschädigten Zellgruppen von Modul \parallel BS-pd werden separat gezeigt. Der erste Belastungszyklus ist mit vollen Symbolen gekennzeichnet und die folgenden mit leeren Symbolen. Die Durchbiegung, bei denen die Zellen so unter Spannung stehen, wie beim IEC 61215 2400 Pa und 5400 Pa Test sind zusätzlich markiert.

Um die Risshäufigkeit der verschiedenen Moduldesigns besser vergleichen zu können, fitten wir die Risshäufigkeit für jedes Modul mit einer Weibull Verteilung [15]. Die Weibull Verteilung wird verwendet, da sie das Rissverhalten von spröden Materialien wie Silizium beschreiben kann. Die kumulative Risshäufigkeit F ist gegeben durch

$$F(d_{br}, \alpha, d_{br-fr}) = 1 - e^{-\left(\frac{d_{br}}{d_{br-fr}}\right)^\alpha}, \quad (1)$$

wobei d_{br-fr} die kritische Durchbiegung ist, bei der die Bruchkraft erreicht wird und α ist der Weibull Modul. Die Strecke d_{br-fr} ist die Biegerollenverschiebung, bei der 66 % der Zellen brechen. Abb. 7 zeigt die Durchbiegung, bei der die Zellen reißen (a) und den Weibull Modul (b) von allen Modulen. Die Kennzahlen der Module \perp BS und \parallel BS werden wegen der geringen Anzahl an gebrochenen Zellen nicht angezeigt (siehe Abb. 6).

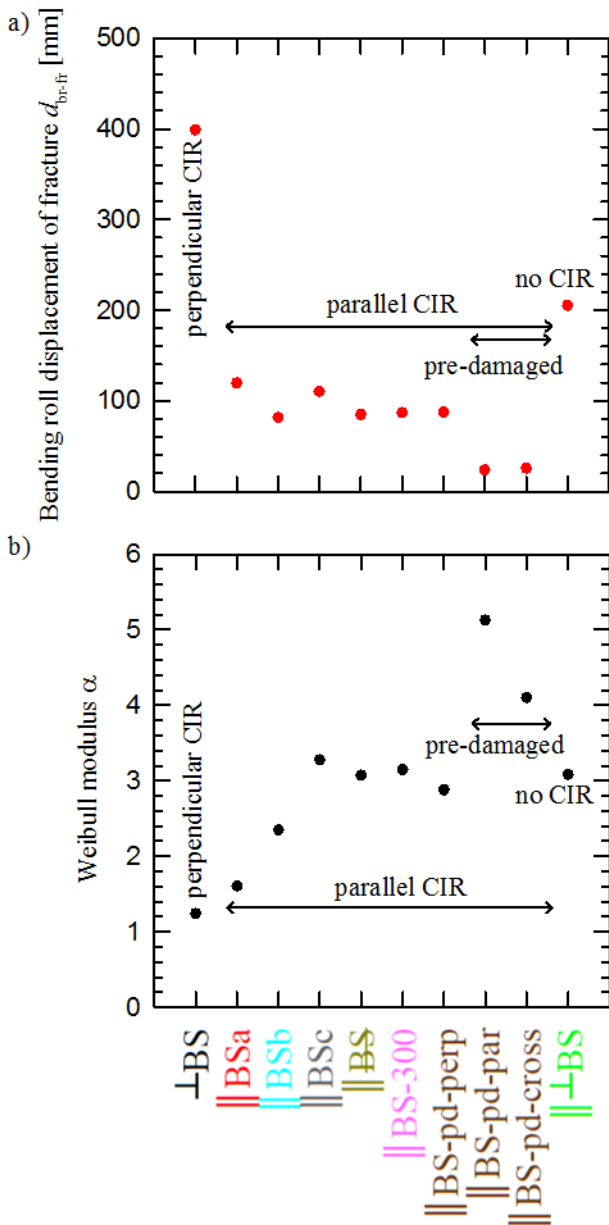


Abbildung 7: Weibull-Parameter der Zellrisse der Module. a) zeigt die kritische Durchbiegung d_{br-fr} , bei der die Bruchkraft erreicht ist und b) zeigt den Weibull Modul α .

Die Module mit Verbinderbändchen parallel zu den Biegerollen zeigen Zellrisse bei einer Durchbiegung zwischen 81 mm und 120 mm. Modul \parallel BS-pd-perp mit Kantenrissen senkrecht zu den Biegerollen hat eine kritische Durchbiegung von $d_{br-fr} = 87$ mm, was ähnlich wie bei schadensfreien Modulen \parallel BSa, b und c ist. Auch Modul \parallel BS-300 mit einer EVA Dicke von 300 μ m

anstatt von 460 μm und Modul $\parallel\text{BS}$ ohne Rückseitenfolie zeigen ähnliche Durchbiegungen, bei der ein Riss entsteht.

Im Kontrast dazu ist die kritische Durchbiegung d_{br-fr} nur 24 mm für Zellrisse parallel zu den Biegerollen und 26 mm für Kreuzrisse. Das heißt, dass die Kantenrisse nur schädlich sind, wenn die Rissrichtung senkrecht zur Spannung ist, welche den Riss öffnet. Die kritische Durchbiegung wird von diesem Risstyp um den Faktor vier reduziert. Da die Spannung im Silizium unter den Verbinderbändchen wegen der Eigenspannung nach dem Löten und Laminieren [16], [17] und der Versteifung der Struktur [18] erhöht ist, verringern Kreuzrisse an dieser Position die kritische Durchbiegung um einen Faktor vier.

Modul $\perp\text{BS}$ mit senkrechten Verbinderbändchen und Modul $\parallel\perp\text{BS}$ ohne Verbinderbändchen haben höhere kritische Durchbiegungen. Die Eigenspannungen, welche bei der Lamination entstehen [16], [17] sind senkrecht zu den Verbinderbändchen. Deswegen erhöhen sie die Spannung in den Zellen bei Modulen mit Verbinderbändchen parallel zu den Biegerollen aber nicht bei Zellen mit Verbinderbändchen senkrecht zu den Biegerollen. Somit ist die kritische Durchbiegung für senkrechte Verbinderbändchen 399 mm, was ungefähr viermal höher ist als für die parallelen Verbinderbändchen. Die kritische Durchbiegung für Modul $\parallel\perp\text{BS}$ ohne Verbinderbändchen ist 205 mm, was ungefähr zweimal höher ist als für parallele Verbinderbändchen.

Der Weibull Modul α beschreibt wie eng eine Verteilung ist. Eine hohe Zahl beschreibt eine enge Verteilung und eine niedrige Zahl eine breite Verteilung. Alle Zahlen sind zwischen 1,2 und 5,1, zeigen aber keine klare Abhängigkeit bezüglich der Charakteristika der Module.

Abb. 8 zeigt die aus der Weibull Verteilung berechnete Wahrscheinlichkeit eines Zellrisses in einem Modul, dass eine Zelle von 36 bei einer Durchbiegung von $d_{br} = 15$ mm reißt, was der IEC 61215 5400 Pa Prüfung entspricht, welche Schneelasten simulieren soll. Wie es von den Ergebnissen der kritischen Durchbiegung erwartet wird, ist die Wahrscheinlichkeit von 10 % hier am höchsten für die vorgeschädigten Module $\parallel\text{BS-pd-par}$ und $\parallel\text{BS pd-cross}$. Die anderen Module mit parallelen Verbinderbändchen haben bis zu 4 % Risswahrscheinlichkeit, wohingegen das Modul $\parallel\perp\text{BS}$ ohne Verbinderbändchen eine Wahrscheinlichkeit von nur 0,03 % zeigt.

Schlussfolgernd haben Verbinderbändchen senkrecht zur Moduldurchbiegung und vorgeschädigte Zellen den größten Einfluss auf Zellrisse. Deswegen sollten die Module so konstruiert werden, dass die Durchbiegung senkrecht zu den Verbinderbändchen nicht zu hoch werden kann und Zellen mit kritischen Vorschädigungen wie Kreuzrisse am Busbar oder Kantenrisse sollten in der Modulproduktion aussortiert werden, um Zellrisse in Modulen und somit einen möglichen Leistungsverlust zu verhindern.

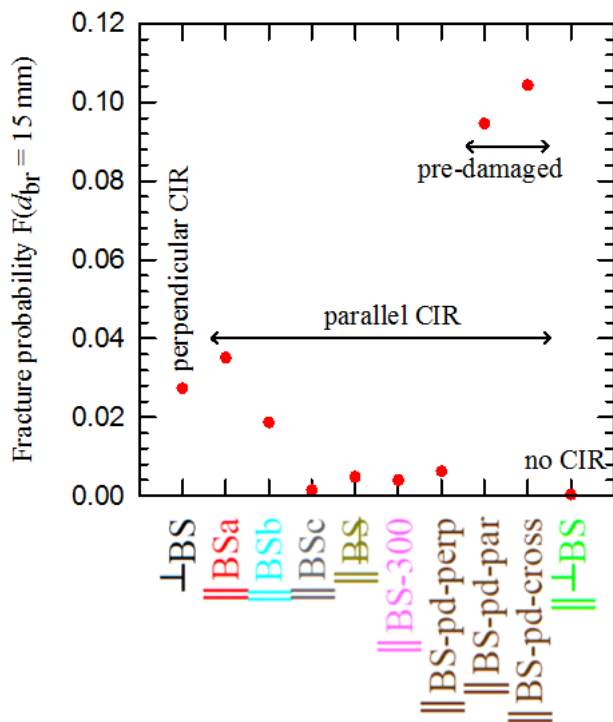


Abbildung 8: Risswahrscheinlichkeit bei einer Durchbiegung von 15 mm, wo die Zellen ähnlich wie im IEC 61215 5400 Pa Test unter Spannung stehen.

2.1.1.2 Rissmuster

Des Weiteren analysierten wir das Rissmuster der Module ||BSc, ||BS, ⊥BS und ⊥BS, indem wir die Risse in den EL-Bildern digitalisierten. Abb. 9 zeigt beispielhaft die manuelle Digitalisierung der Risse einer Zelle in 18 mal 18 Quadrate. Wenn ein Riss ein Quadrat kreuzt, wird das Quadrat als geschädigt betrachtet und als 1/36 gezählt, da 36 Zellen ausgewertet werden in einem Modul, wohingegen andere Quadrate als 0 gezählt werden. Letztendlich wird die Summe aller Zellen für jede Position gebildet. Eine Null bedeutet, dass keine der 36 Zellen hier einen Riss hat und eine 1 bedeutet, dass alle 36 Zellen einen Riss an dieser Position haben.

Abb. 10 a) bis c) zeigen die experimentell bestimmten kumulativen Rissmuster für das Modul ||BSc bei einer Verschiebung der Biegerollen um 40 mm, 80 mm und 120 mm. Abb. 10 d) zeigt das simulierte Rissmuster von Modul ||BSc. Die Zelle ist auch in 18 mal 18 Quadrate aufgeteilt. Wenn ein Quadrat geschädigt ist, was heißt, dass mindestens ein FEM-element in der Simulation inelastisch gestreckt wird, wird es als 1 gezählt, da wir nur eine Zelle simulieren, wohingegen die anderen als Null gezählt werden. Abb. 11 a) bis c) zeigen die experimentell bestimmten kumulativen Rissmuster für das Modul ||BS bei einer Verschiebung der Biegerollen um 40 mm, 80 mm und 120 mm.

Die Module ||BSc und ||BS mit Verbinderbändchen zeigen eine zunehmende Risshäufigkeit zur Mitte der Zelle. Die FEM Simulationen zeigen eine zunehmende Spannung zur Mitte der Zelle während der Durchbiegung. Die Spannung wird vom Modulglas auf die Zellen übertragen. Am Zellrand wird die Spannung weniger effektiv auf die Zelle übertragen, da das EVA sich einfacher verformt als in der Zellmitte. Deswegen brechen die Zellen häufiger zur Zellmitte hin.

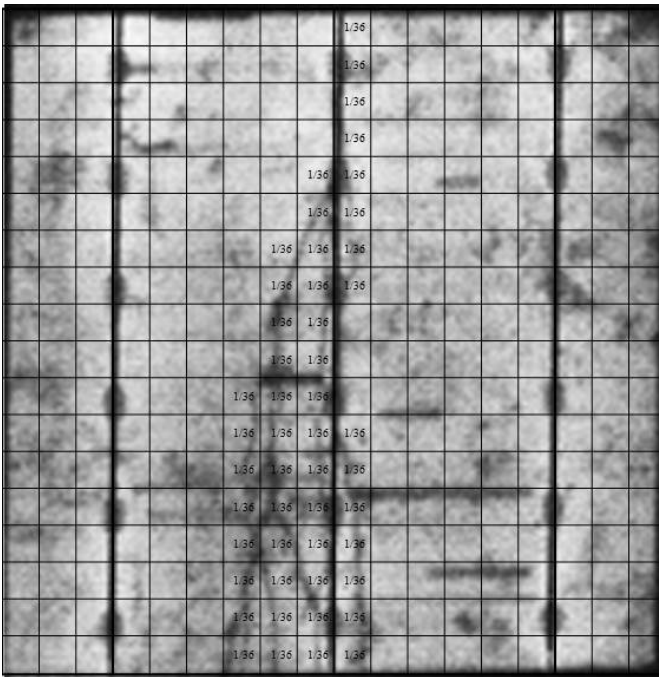


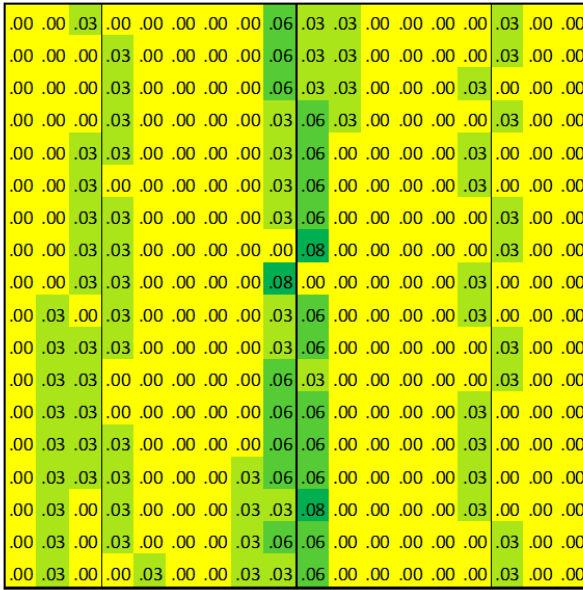
Abbildung 9: Experimentelle Auswertung der Risse. Das EL-Bild wird in 18 mal 18 Quadrate unterteilt. Ein Quadrat, das einen Riss enthält wird als 1/36 gezählt, da 36 Zellen im Modul ausgewertet werden. Die anderen Quadrate sind gleich 0.

Module \parallel BSc und \parallel BS haben auch eine erhöhte Risshäufigkeit um die Verbinderbändchen herum, welche bei Modul \parallel BS ohne Rückseitenfolie deutlich stärker ausgeprägt ist. Die erhöhte Risshäufigkeit um die Verbinderbändchen hat verschiedene Ursachen. Eine Ursache ist die Versteifung durch das Verbinderbändchen in diesem Bereich, welche auch in der FEM Simulationen beobachtet wurde. Eine weitere Ursache ist die Verbiegung der Zellen um das Verbinderbändchen durch den Schrumpf des EVAs während des Abkühlens nach der Lamination [17]. Die Rückseitenfolie im Modul \parallel BSc ist unter Zugspannung und homogenisiert die Spannungsspitzen, die im Modul \parallel BS vorhanden sind aufgrund der fehlenden Rückseitenfolie.

Das simulierte Rissmuster im Modul \parallel BS in Abb. 10 d) zeigt eine erhöhte Risswahrscheinlichkeit zur Zellmitte und an den Verbinderbändchen. Das simulierte und experimentell bestimmte Rissmuster ist qualitativ ähnlich, aber die absoluten Werte unterscheiden sich. In den Experimenten mitteln wir die Werte über viele Zellen, welche alle leicht unterschiedliche Bruchkräfte haben aufgrund von kleinen mechanischen Defekte. Die Simulation berücksichtigt nur eine Zelle mit einer Bruchkraft. Somit weichen die absoluten Werte leicht ab wohingegen das simulierte Rissmuster die experimentellen Ergebnisse qualitativ reproduziert.

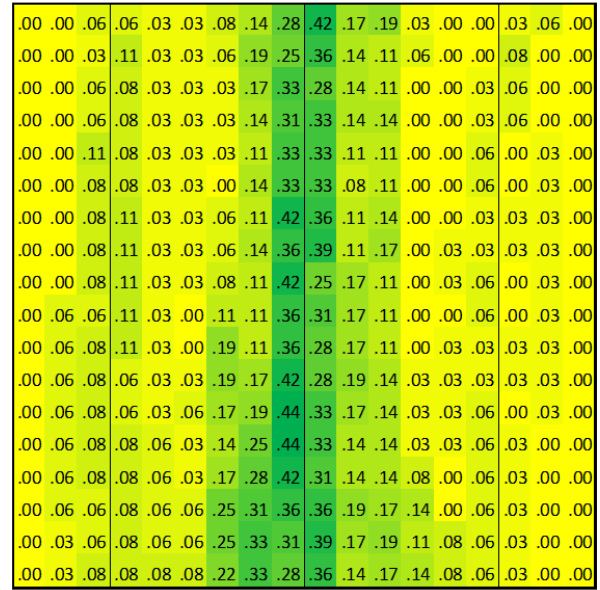
Abb. 12 und 13 zeigen des experimentell bestimmte kumulative Rissmuster der Module \parallel \perp BS and \parallel \perp BS bei einer Verschiebung der Biegerollen um 40 mm, 80 mm und 120 mm. Die Module \parallel \perp BS und \parallel \perp BS zeigen nur ein paar Zellrisse und somit kein klares Rissmuster.

a) Laminate $\parallel BS$ ($d_{br} = 40$ mm) experiment



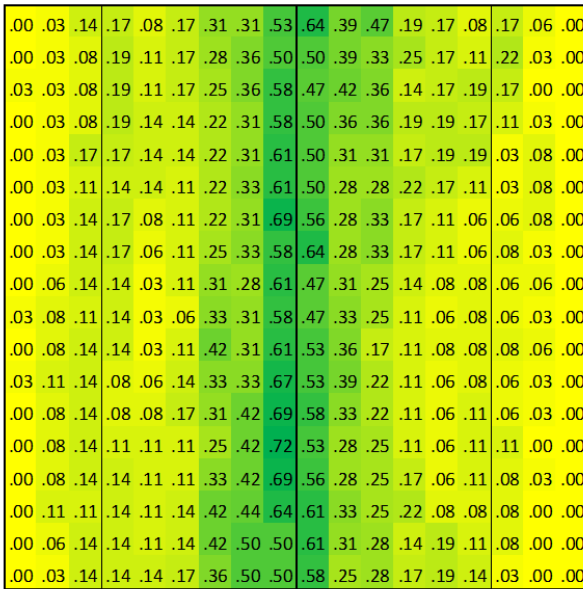
Av.: .00 .01 .02 .02 .00 .00 .00 .01 .04 .05 .01 .00 .00 .00 .01 .01 .00 .00

b) Laminate $\parallel BS$ ($d_{br} = 80$ mm) experiment



.00 .02 .07 .09 .04 .03 .12 .19 .36 .33 .15 .14 .04 .02 .04 .03 .02 .00

c) Laminate $\parallel BS$ ($d_{br} = 120$ mm) experiment



Av.: .00 .06 .13 .15 .09 .13 .30 .36 .61 .54 .33 .29 .16 .12 .11 .09 .03 .00

Abbildung 11: Experimentell bestimmte kumulative Risshäufigkeit von Modul $\parallel BS$ bei einer Verschiebung der Biegerollen von (a) $d_{br} = 40$ mm, (b) $d_{br} = 80$ mm, (c) $d_{br} = 120$ mm. Die Risshäufigkeit ist Farbkodiert von niedrig (gelb) bis hoch (grün). Die Linien unter den großen Quadraten gibt die durchschnittliche Risshäufigkeit über die Spalte, die parallel zur Biegerolle ist.

2.1.1.3 Rissbreiten

Die Rissbreiten und Zellabstände senkrecht zu den Biegerollen werden aus den DIC-Bildern berechnet, wie in [19] gezeigt. Es werden zwei Bilder eines selben Rissmusters auf einer Zelle aus verschiedenen Perspektiven gemacht. Aus diesen Bildern werden die Koordinaten der Zelloberfläche berechnet. Um die Unsicherheit der Messung zu verringern, werden die Werte innerhalb der 18 mal 18 Quadrate auf der Zelle gemittelt. Die Entfernungen der einzelnen Quadrate zueinander werden dann aus den Differenzen der gemittelten Koordinaten berechnet. Die Simulationen am ISD zeigen, dass die Streckung im rissfreien Silizium von einem Quadrat zum nächsten unterhalb der Messunsicherheit von 8 μm liegt. Somit kann die Dehnung im Silizium in der Auswertung vernachlässigt werden.

Da die Strahlen, die vom Muster auf der Zelloberfläche zurückreflektiert werden, durch das EVA, das Modulglas und die Luft gehen, bevor sie die Kameras erreichen, werden sie an den Grenzflächen gebrochen. Deswegen messen wir die Abstände d_m , die von den realen Abständen d_r abweichen. Abb. 14 zeigt wie wir dies berücksichtigt haben, indem wir Referenzmessungen in Bereichen ohne Riss in Abb. 14a neben den analysierten Bereichen in Abb. 14b machten. Wir interessieren uns hier nicht für die absoluten Distanzen, sondern nur in deren Änderung. Wir berechneten die in grün markierten realen Änderungen mit den Änderungen der in rot markierten gemessenen Distanzen in Abb. 14. Die Brechung der Strahlen und der Einfallswinkel α sind dieselben für Abb. 14a und Abb. 14b. Deswegen sind auch die Unterschiede zwischen den realen Distanzen zu den gemessenen Distanzen d_{cor} auch dieselben. Da sich die realen Distanzen in den Regionen ohne Riss d_{nc-r} während der Durchbiegung nicht ändern, können wir die Messungen mit Riss d_{ce-m} mit den Messungen von d_{nc-m} korrigieren, um die reale Rissbreite d_{cw} zu bestimmen:

$$d_{cw} = d_{cw-m} - d_{nc-m} = (d_{cw-r} + d_{cor}) - (d_{nc-r} + d_{cor}) = d_{cw-r} - d_{nc-r}. \quad (2)$$

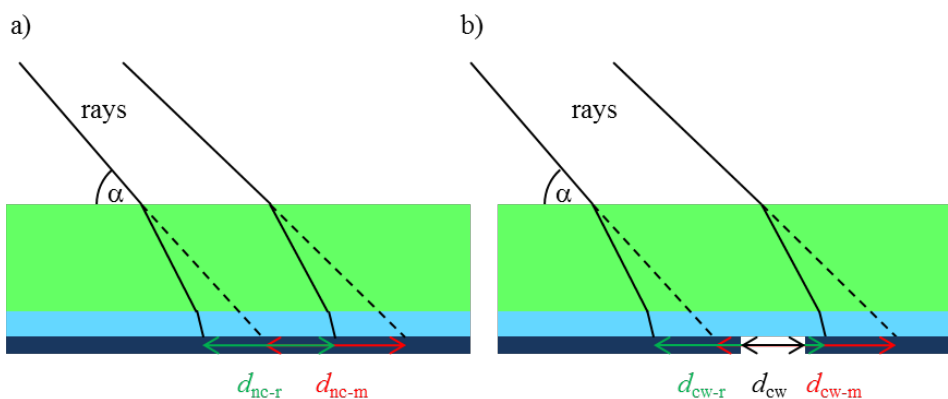


Abbildung 14: Korrektur für die Rissbreiten- und Zellabstandsmessungen. Schematische Strahlengänge während der digitalen Bildkorrelation a) ohne einen Riss und b) mit einem Riss. Die grünen Pfeile deuten die realen Distanzen an wohingegen die roten Pfeile die gemessenen Distanzen andeuten. Der Unterschied von rot zu grün ist derselbe für a) und b), da der Einfallswinkel α derselbe ist.

Abb15. zeigt die experimentell bestimmten Rissbreiten und Zellabstände in Abhängigkeit der Durchbiegung. Wir zeigen die Daten von drei benachbarten Zellen senkrecht zu den Biegerollen von Modul || BSc. In der mittleren Zelle detektierten wir in der EL einen Riss parallel zu den Verbinderbändchen ungefähr 5 mm rechts des linken Verbinderbändchens bei einer Verschiebung der Biegerollen um $d_{br} = 55$ mm. Die anderen zwei Zellen brechen nicht bis zu einer Verschiebung

der Biegerollen um $d_{br} = 95$ mm. Abb. 15 zeigt, dass bis zu $d_{br} = 50$ mm die Rissbreite d_{cw} bei 0 μm bleibt bei einer Messunsicherheit von 8 μm . Bei $d_{br} = 55$ mm, vergrößert sich die Rissbreite abrupt auf 30 μm und steigt danach proportional zur Durchbiegung d_{br} bis $d_{br} = 95$ mm an, was durch die durchgezogene schwarze Linie in Abb. 15 angedeutet ist. Die Änderungen in den zwei Zellabständen steigen proportional zu d_{br} mit der jeweils gleichen Steigung bis $d_{br} = 50$ mm an. Bei $d_{br} = 55$ mm verringert sich der linke Zellabstand d_{gw1} abrupt und steigt von da an bis $d_{br} = 95$ mm wieder proportional mit d_{br} an. Der rechte Zellabstand d_{gw2} zeigt ein ähnliches Verhalten, wobei der abrupte Abfall und die Steigung danach kleiner sind. Die Summe S der Rissbreite und Zellabstandsänderungen steigt proportional mit d_{br} von $d_{br} = 0$ mm bis $d_{br} = 95$ mm an. Die Summe S der Rissbreite und Zellabstandsänderungen ist identisch mit der Summe der zwei Zellabstände der drei unbeschädigten Zellen. Abb. 15 zeigt auch die vom ISD simulierte Rissbreite des Moduls \parallel BSc in Abhängigkeit der Durchbiegung. Die Rissbreite wird hier berechnet aus der Summe der inelastischen Dehnung der beschädigten Elemente der Zelle.

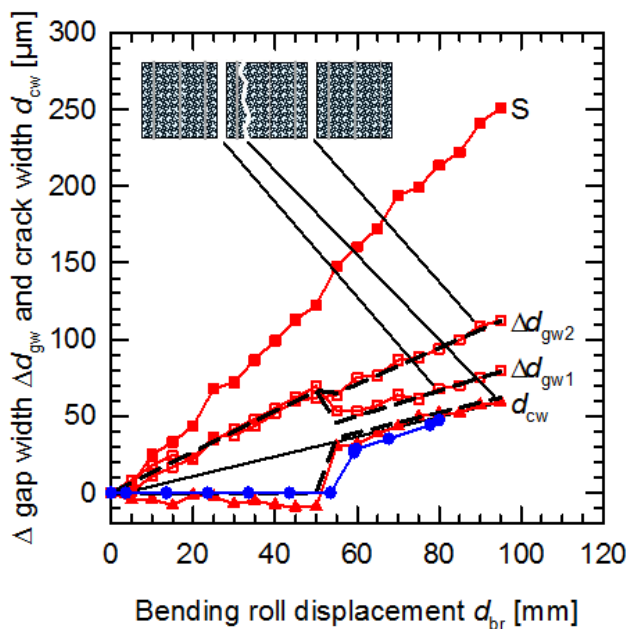


Abbildung 15: Gemessene Änderung der Zellabstände (offene Quadrate), der Rissbreite (Dreiecke) und der Summe dieser (gefüllte Quadrate) von Modul \parallel BSc. Die gestrichelte schwarze Linie zeigt die mit dem Modell berechneten Werte. Die blauen Kreise zeigen die simulierte Rissbreite.

Um die Bewegung der Zellen und Zellteile zu erklären, schlagen wir ein Modell vor, welches annimmt, dass die Massenschwerpunkte der Zellen sich nicht relativ zum Modulglas bewegen und die Zellen sich nicht signifikant dehnen, da sich das EVA wegen des niedrigeren Langzeit E-Moduls als das von Glas und Silizium verformt. Somit nehmen die Rissbreite und die Zellabstände proportional zur Verschiebung der Biegerollen zu. Die Zellabstände ändern sich wie folgt

$$\Delta d_{gw1,2}(d_{br}) = S(d_{br}) \times d_{c1,3} / \left(\sum_{n=1}^3 d_{cn} \right) \quad (3)$$

und die Rissbreite ändert sich wie

$$d_{cw}(d_{br}) = S(d_{br}) \times d_{c2} / \left(\sum_{n=1}^3 d_{cn} \right), \quad (4)$$

wobei d_{c1} und d_{c3} die Distanzen der Massenschwerpunkte über die Zellabstände sind und d_{c2} die Distanz der Massenschwerpunkte über den Riss. Wir evaluieren das Modell, indem wir die gemessene Summe S über die beiden Zellabstände und die Rissbreite in Gleichung 3 und 4 einsetzen. Wir erhalten so die berechnete Rissbreite und Zellabstände, welche in Figure 20 mit einer gestrichelten schwarzen Linie gekennzeichnet sind. Die Annahmen der Bewegungen sind somit durch die Übereinstimmung der Berechnungen und der Messungen innerhalb von $12 \mu\text{m}$ bestätigt, was nur leicht über der Messunsicherheit von $8 \mu\text{m}$ liegt.

Während der Durchbiegung der Module driften die Zellen proportional zur Verschiebung der Biegerollen voneinander weg. Nach dem Zellbruch geht die Spannung zurück und die Zellteile driften abrupt voneinander weg und gleichzeitig schließen sich die Zellabstände um den gleichen Betrag in der Summe. Der Zellabstand, welcher dem Riss näher ist, wird mehr beeinflusst, da der kleine Zellteil sich weiter bewegt als der große Zellteil.

Wir untersuchen den Einfluss der Rückseitenfolie auf die absoluten Werte der Riss- und Zellabstandsöffnung unter Benutzung des Modells der Zellbewegung, indem wir die Module $\parallel\text{BSc}$ und $\parallel\text{BS}$ vergleichen und den Einfluss der Verbinderbändchen indem wir die Module $\parallel\perp\text{BS}$ und $\parallel\text{BS}$ vergleichen. Wir leiten die Gleichungen 3 und 4 nach Δd_{br} ab und teilen sie durch die Abstände der Massenschwerpunkte und bekommen somit Gleichung 5 und 6:

$$\Delta d_{gw1,2} / (\Delta d_{br} \times d_{c1,3}) = \Delta S / \Delta d_{br} / \left(\sum_{n=1}^3 d_{cn} \right) \quad (5)$$

und

$$\Delta d_{cw} / (\Delta d_{br} \times d_{c2}) = \Delta S / \Delta d_{br} / \left(\sum_{n=1}^3 d_{cn} \right). \quad (6)$$

Die rechte Seite der Gleichungen 5 und 6 enthalten keine Risspezifischen Werte und sind somit konstant innerhalb eines Moduls und charakterisieren drei Modulspezifische Korrelation zwischen Durchbiegung und Riss- und Zellabstandsöffnung. Wir setzen Gleichung 5 in Gleichung 6 und benennen den Modulspezifischen Rissbreiten- und Zellabstandsöffnungsfaktor f_0 :

$$f_0 = \Delta d_{cw} / (\Delta d_{br} \times d_{c2}) = \Delta d_{gw1,2} / (\Delta d_{br} \times d_{c1,3}). \quad (7)$$

So benutzen wir alle gemessenen Rissbreiten und Zellabstände mit den dazugehörigen Distanzen der Massenschwerpunkte eines Moduls, um den Modulspezifischen Rissbreiten- und Zellabstandsöffnungsfaktor f_0 für alle drei Module $\parallel\text{BSc}$, $\parallel\text{BS}$ and $\parallel\perp\text{BS}$ zu berechnen. Abb. 16 zeigt die resultierenden Öffnungsfaktoren, die auf 9 bis 16 Messungen pro Modul beruhen.

Modul $\parallel\text{BSc}$ zeigt ungefähr 30 % niedrigere f_0 Werte zwischen der 25 und 75 Perzentilen als die Module $\parallel\text{BS}$ und $\parallel\perp\text{BS}$. Da Modul $\parallel\text{BSc}$ im Gegensatz zu den anderen zwei Modulen eine Rückseitenfolie hat, wirkt diese Rückseitenfolie gegen das Auseinanderdriften der Zellen und Zellteile während der Durchbiegung. Modul $\parallel\text{BS}$ hat einen nur leicht höheren f_0 Wert als Modul $\parallel\perp\text{BS}$, womit das Verbinderbändchen in Modul $\parallel\text{BS}$ nur einen kleinen Einfluss auf die Rissbreiten und Zellabstände während der Durchbiegung hat. Schlussfolgernd sollte man eine steife Rückseitenfolie wählen, da diese gegen das Auseinanderdriften der Zellteile wirkt und somit, wie in AP2 gezeigt, der Widerstands über den Zellriss nicht ansteigt und die Modulleistung bewahrt wird.

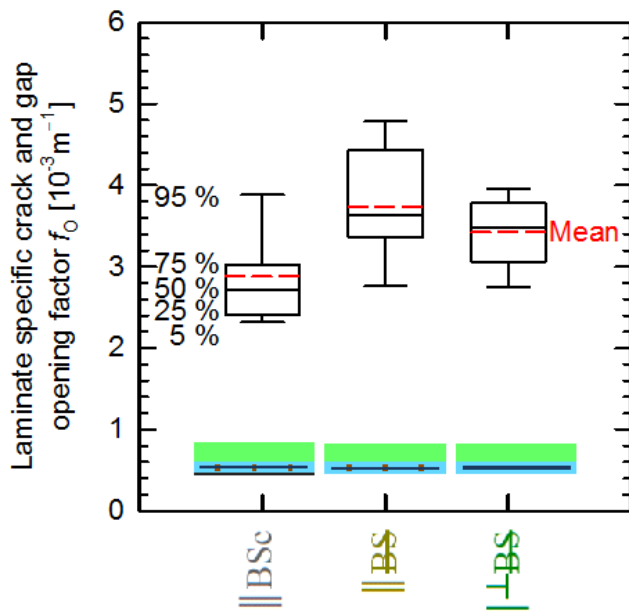


Abbildung 16: Modulspezifische Rissbreiten- und Zellabstandsöffnungsfaktor f_0 für die Module \parallel BSc, \parallel BS und \perp BS. Die Box-plots markieren die 5, 25, 50, 75 und 95 Perzentilen und den Mittelwert.

2.1.2 AP2: Modellierung rissabhängiger elektrischer Eigenschaften

Dieses Arbeitspaket hat zum Ziel, Mikrorisse in ihren Folgen für die elektrische Kontaktierung zu charakterisieren. Insbesondere soll untersucht werden, wie sich das Auseinanderdriften von Zellbruchstücken auf die elektrische Kontaktierung dieser Zellbruchstücke auswirkt. Die Widerstände zwischen Zellbruchstücken wurden an Minilaminaten während der mechanischen Belastung gemessen.

2.1.2.1 AP2.1: Versuchs- und Probenaufbau

Im Arbeitspaket 2.1 erstellten wir einen 3-Linienbiegeaufbau, in dem wir die Minilaminat unter Spannung setzten (Abb. 17). Der Aufbau besteht aus einer Kraftdose, die an einer z-Achse befestigt ist. Die z-Achse kann um ein paar μm präzise die Biegerolle verfahren und die Durchbiegung messen. Die Mittelpunkte der Biegerolle haben eine Distanz von 9 cm zu den Lastrollen und alle Rollen haben einen Durchmesser von 1 cm. Für die Widerstandsmessung über den Riss wurden zwei 4-Punkt Messgeräte aufgebaut. Das eine vermisst den Widerstand über die Vorderseitenmetallisierung, das andere über die Rückseitenmetallisierung. An die Verbinderbändchen der Minilaminat wurden Stecker gelötet, um die 4-Punkt Messgeräte zuverlässig mit Kabeln verbinden zu können.

Die Minilaminat haben eine Fläche von $2 \times 10 \text{ cm}^2$, ein 2.9 mm dickes gehärtetes Frontglas, eine 0,3 mm dicke Schicht aus EVA zwischen dem Glas und ein $2 \times 6,5 \text{ cm}^2$ großes Stück einer Standardsiebdrucksolarzelle, wie wir sie auch in AP1 verwendet haben. Die Solarzelle besteht aus einem 0,19 mm dickem multikristallinem Silizium und einer 0,05 mm dicken Schicht aus (Al) Paste. Auf der Vorderseite der Zelle befinden sich 2 cm lange Busbare und 9 Silberfinger. Auf der Rückseite der Zelle befinden sich Al-Paste und zwei Silber-Pads. Um die mechanische Stabilität des Siliziums zu reduzieren, haben wir mit einem Laser die Vorderseite der Solarzelle zwischen den Silberfingern perforiert (1.7 mm lang, 40 μm weit und $\sim 160 \mu\text{m}$ tief). Zusätzlich haben wir ein

2x2 mm² großes Stück Verbinderbändchen zwischen zwei Silberfingern nahe der Perforation platziert, um die Spannung in der Solarzelle zu erhöhen, wie es bei einer Standardsolarzelle mit Verbinderbändchen auf dem Busbar der Fall ist. Wir kontaktieren jeden Busbar und jedes Silber-Pad mit einem Verbinderbändchen per Kontaktlöten.

Um die Korrelation zur Rissbreite herzustellen, kann die Probe in einem Mini-3-Linienbiegeaufbau mit gleichen Abmessungen belastet werden. Der Querschnitt der Probe kann unter derselben Belastung mit einem Lichtmikroskop oder mit einem Rasterelektronenmikroskop untersucht werden. Über die Widerstandsmessung bei einer definierten Durchbiegung und der Rissbreitenmessung bei derselben Durchbiegung können die Größen Risswiderstand und Rissbreite miteinander korreliert werden

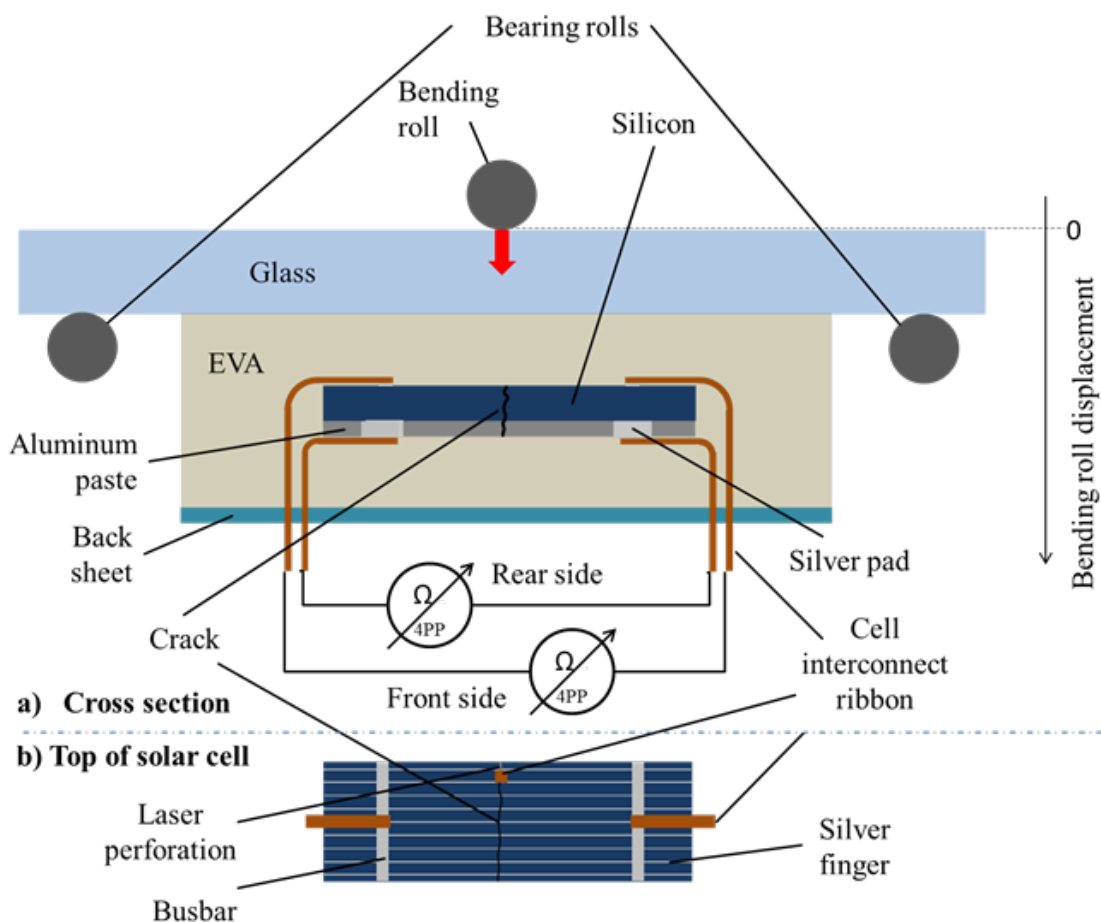


Abbildung 17: a) Querschnitt des 3-Linienbiegeaufbaus und b) Aufsicht auf die Solarzelle. Aufbau zur Messung des elektrischen Widerstands der Zellvorderseiten- und der Zellrückseitenmetallisierung in einem Minilaminat.

2.1.2.2 AP2.2: Korrelation Rissbreite/Risswiderstand

Im Arbeitspaket AP2.2 wurde untersucht, wie sich der Widerstand mit der Rissbreite und Anzahl verändert. Der Einfluss der Durchbiegung auf den Risswiderstand ist in Abb. 18 gezeigt. Der Gesamtwiderstand, der über die Vorderseitenverbinderbändchen gemessen wird, ist in Abb. 18a und der Gesamtwiderstand, der über die Rückseitenverbinderbändchen gemessen wird, ist in Abb. 18b gezeigt. Es wird der erste Zyklus bis zur Entstehung eines Zellbruchs bei 670 μm Durchbiegung und der zweite Zyklus bis zu derselben maximalen Durchbiegung gezeigt. Die Gesamtwiderstände ändern sich kaum während der ersten Durchbiegung. Im zweiten Zyklus steigt der Widerstand über die Vorderseitenverbinderbändchen von 0,2 Ω in Stufen auf $10^4 \Omega$ an, während der Rückseitenwiderstand kontinuierlich von 0,05 Ω auf 0,07 Ω ansteigt. Nach der Entlastung gehen die Widerstände wieder auf den Ausgangswert zurück.

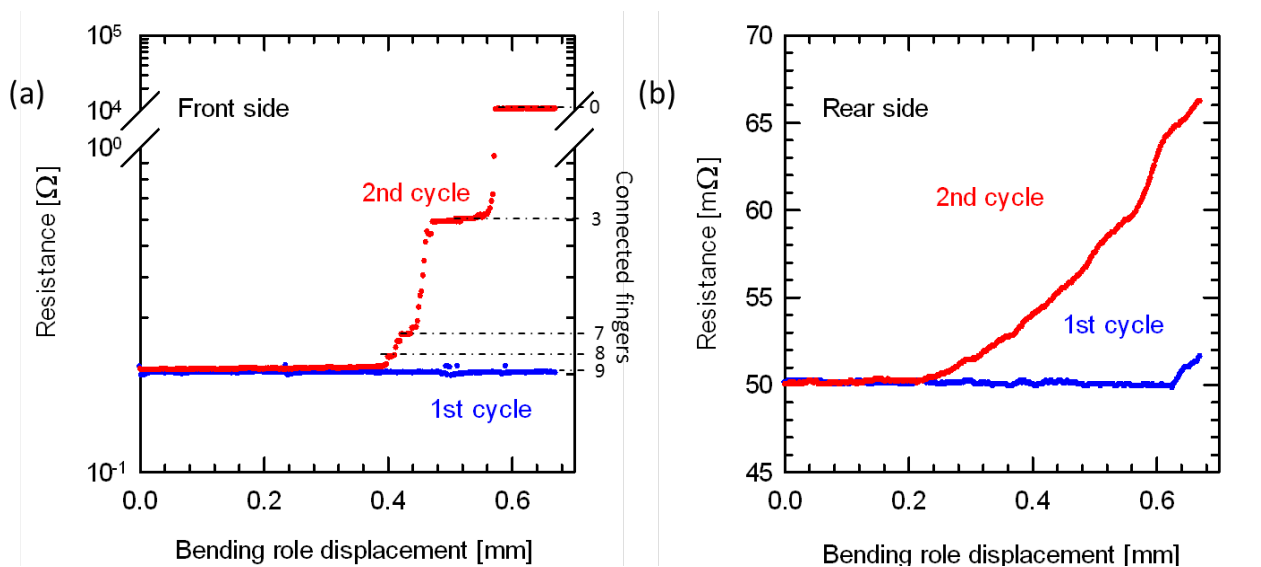


Abbildung 18: Einfluss des Risses auf den Widerstand über den Riss. (a) zeigt den Widerstand über die Vorderseitenverbinderbändchen und (b) zeigt den Widerstand über die Rückseitenverbinderbändchen während der Durchbiegung.

Der Rückseitenwiderstand steigt kontinuierlich an, da die Al Rückseitenmetallisierung sehr duktil ist. Die Rückseitenmetallisierung steigt nur um 28 % an, da die Metallschicht ganzflächig und dick ist. Im Ausgangszustand ist der Vorderseitenwiderstand höher als der Rückseitenwiderstand, da der Querschnitt der Vorderseitenmetallisierung 1700 mal kleiner ist als der Querschnitt der Rückseitenmetallisierung und die höhere Leitfähigkeit nicht ausreicht dies ganz auszugleichen. Der Vorderseitenwiderstand erhöht sich während der Durchbiegung um den Faktor 50000. Der stufenhafte Anstieg der Vorderseitenmetallisierung ist auf nacheinander erfolgende Fingerabriss zurückzuführen. In Abb. 18a sind die Anzahl der noch verbundenen Finger markiert. Die Markierungen sind errechnet aus einem Ersatzschaltbild von 9 parallelen Fingern. Zu Beginn sind die Finger alle intakt und am Schluss des Experiments sind alle Finger unterbrochen und der Widerstand ist $10^4 \Omega$. Dieser Widerstand setzt sich aus Beiträgen der Diode, der Rückseitenmetallisierung und des Kurzschlusswiderstandes zusammen. Daraus kann man schließen, dass der Widerstand über die Finger größer als $10^4 \Omega$ ist. Da die Risslänge 2 cm beträgt, ist der spezifische Risswiderstand $2 \times 10^4 \Omega \text{ cm}$ auf der Zellvorderseite. Ein 156 mm langer Riss quer durch eine Standardsiliziumsolarzelle hätte somit einen Risswiderstand von ca. 1300 Ω .

Ein Risswiderstand von mehr als 1300 Ω führt zu einem Leistungsverlust im Modul, der quasi 100 % des Leistungsverlustes eines vollständig isolierenden Risses entspricht.

Im Mini-3-Linienbiegeaufbau wird im 6. Belastungszyklus die Korrelation zwischen Rissbreite und Risswiderstand gemessen. Dies ist in Abb. 19 dargestellt. Bis zu einer Rissbreite von knapp 2 μm ist der Widerstand auf dem Ausgangsniveau. Bei höherer Rissbreite steigt der Widerstand bis auf über $10^4 \Omega$ auf der Vorderseite (6 μm Rissbreite) und auf 0.065 Ω auf der Rückseite (10 μm Rissbreite) an. In Simulationen wurde abgeschätzt, dass die Rissbreite größer als 3,4 μm wird bei einem Standardmodul beim IEC61215 5400 Pa Test. Somit sind unter diesen Lasten die Zellteile im 6. Belastungszyklus noch nicht komplett elektrisch isoliert. Dies kann sich aber mit weiteren Zyklen ändern, was wir im Folgenden untersucht haben.

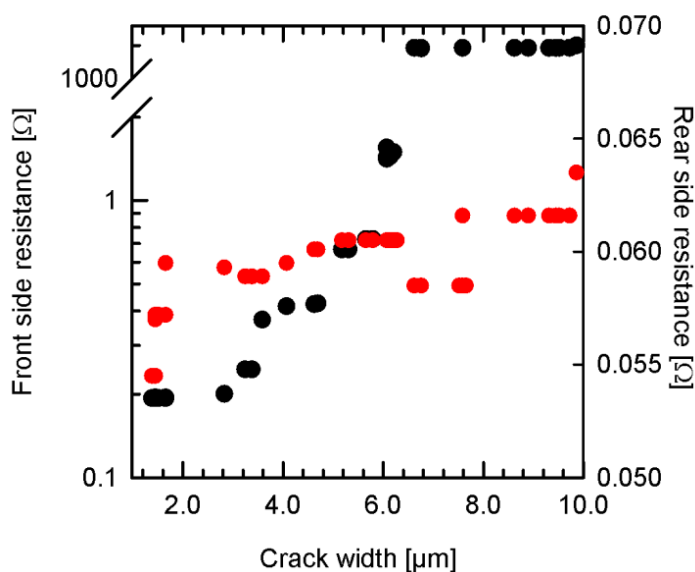


Abbildung 19: Korrelation von Vorderseiten- und Rückseitenwiderstand zur Rissbreite im Silizium.

Wir untersuchten den Einfluss der Rückseiteneinkapselung auf den Risswiderstand während der Belastungszyklen, indem wir ein Minilaminat mit und ein Minilaminat ohne Rückseitenverkapselung testeten. Das Minilaminat mit Rückseitenverkapselung hat zusätzlich noch ein 0,4 mm dickes EVA und eine 0,3 mm dicke Rückseitenfolie auf der Rückseite. Die Rückseitenfolie hat einen 5fach höheren thermischen Ausdehnungskoeffizient als Glas und einen Schrumpf von 1,5 % durch den Laminationsprozess. Während des Abkühlens im Laminationsprozess verfestigt sich das EVA bei 150 $^{\circ}\text{C}$ und verbindet somit die Rückseitenfolie mit der Solarzelle und dem Glas. Somit ist die Rückseitenfolie unter Spannung bei Raumtemperatur. Der Langzeit E-Modul der Rückseitenfolie ist 100mal größer als der von EVA, womit die Solarzelle unter Druckspannung steht. Während der mechanischen Belastungszyklen messen wir die Durchbiegung, den Widerstand über die Vorderseite ($R_f \pm 50 \text{ m}\Omega$) und die Rückseite ($R_r \pm 5 \text{ m}\Omega$) jeweils mit einer 4-Punkt-Messung.

Wir biegen die Minilaminat mit einer quasi-statischen Geschwindigkeit von 0,1 mm/min bis wir einen plötzlichen Kraftabfall messen, welcher aus dem Zellriss resultiert. Danach wird das Minilaminat entlastet. In den folgenden Zyklen steigern wir die Geschwindigkeit auf 62,5 mm/min und lassen das Minilaminat 1,5 s lang entlastet. Wir biegen die Minilaminat erneut bis zu einer Rissbreite von 10 μm .

Wir analysieren die Vorderseitenwiderstände beider Minilaminat, wie in Abb. 20 gezeigt. Im entlasteten Zustand bleibt der Widerstand konstant während aller Biegezyklen. Im belasteten Zustand steigt der Widerstand mit der Anzahl an Zyklen bis zur Grenze des Messbereichs von 400 Ω an. Die Minilaminat zeigen unterschiedliche Rückseitenwiderstände. Beim Minilaminat mit Rückseitenverkapselung in Abb. 20c steigt der unbelastete Rückseitenwiderstand stetig von 0,03 Ω bis 20 Ω bei Zyklus 700 an. Danach beginnen die Werte zu streuen. Der Maximalwert steigt bis zur Grenze des Messbereichs von 4000 Ω beim 30.000ten Zyklus, wohingegen der Minimalwert bis auf 0,1 Ω beim 2000ten Zyklus fällt. Die belasteten Werte sind ähnlich zu den belasteten Werten mit der Limitierung, dass sie nicht niedriger sind als die entlasteten Werte.

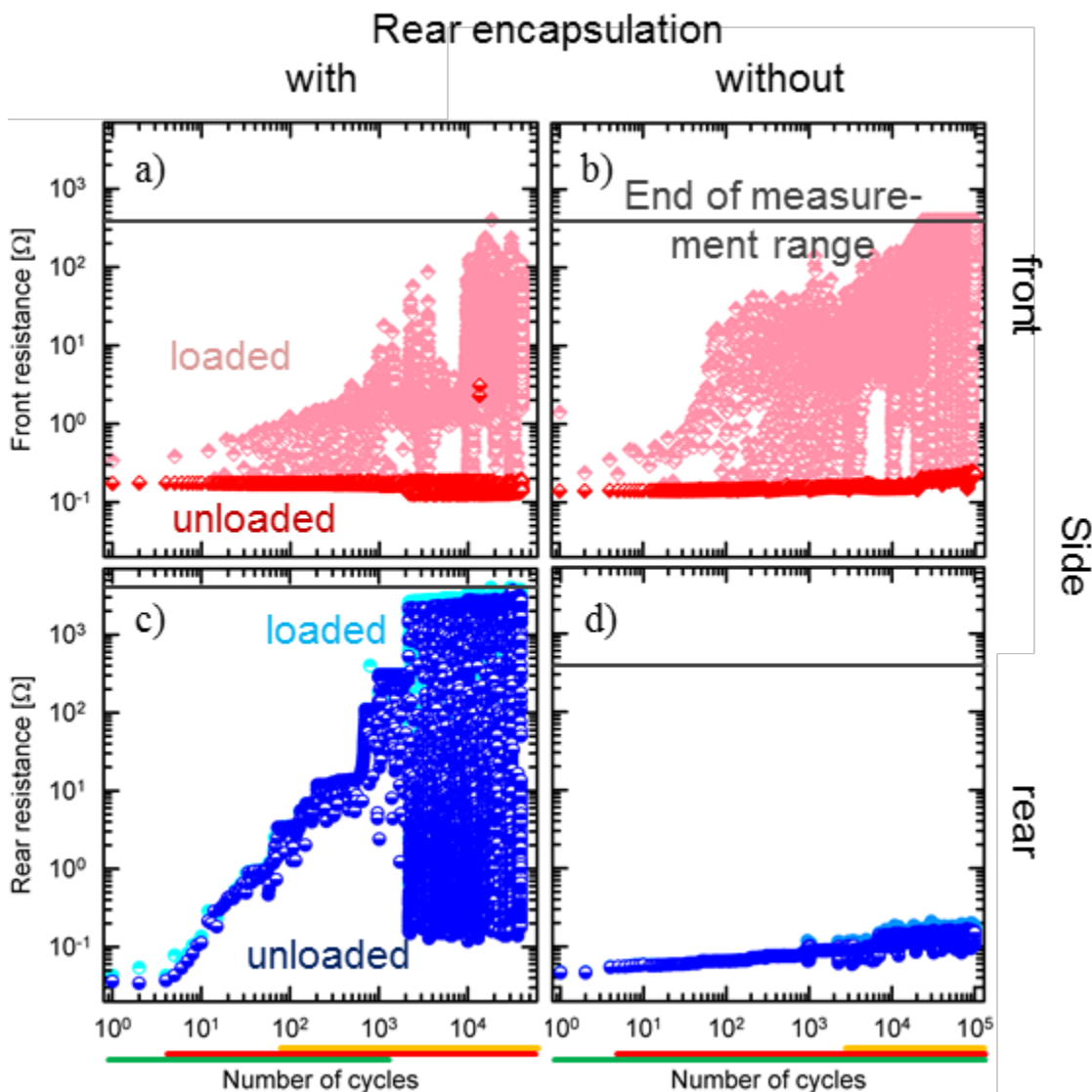


Abbildung 20: Vergleich der Widerstände der Vorderseite und der Rückseite des Minilaminats mit Rückseiteneinbettung und des Minilaminats ohne Rückseiteneinbettung entlasteten und belasteten Zustand als Funktion der Zyklen. Die farbigen Linien unter den Graphen zeigen, in welchem Ermüdungszustand (Abb. 22) sich die Minilaminat bei den jeweiligen Zyklen befinden.

Die Widerstandswerte des Minilaminats ohne Rückseitenverkapselung in Abb. 20 d sind stark unterschiedlich von den Widerstandswerten des Minilaminats mit Rückseitenverkapselung. Der entlastete Widerstand steigt von 0,045 Ω bis nur 0,1 Ω beim 20.000ten Zyklus an. Dann beginnen

die Werte zwischen $0,05 \Omega$ und $0,15 \Omega$ zu streuen. Die Widerstandswerte im belasteten Zustand sind auch sehr ähnlich zu den Werten im entlasteten Zustand und nur leicht höher im Streubereich.

Nach dem ersten Zyklus zeigen Mikroskopbilder (Abb. 21a), dass der Riss durch die ganze Siliziumschicht und die ganze Al-Paste geht. An manchen Punkten sind die Zellstücke noch durch Brücken aus Al-Paste verbunden (Abb. 21b).

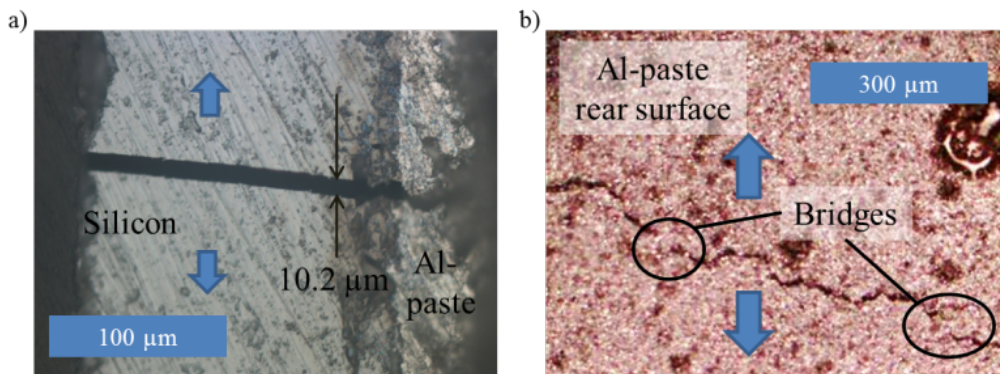


Abbildung 21: Lichtmikroskopbilder eines Minilaminats ohne Rückseiteneinbettung im belasteten Zustand. a) zeigt das Minilaminat von der Seite und b) von der Rückseite. Auf der Rückseite sind zwei Brücken der Al-Paste markiert. Die blauen Pfeile zeigen die Richtung der Rissöffnung.

Wir führen ein elektromechanisches Modell zur Erklärung des Verlaufs des Rückseitenwiderstands beider Minilaminats über den gesamten Zyklusverlauf ein. Unser Modell fokussiert sich auf die Erklärung der Rückseitenwiderstände im entlasteten Zustand, da dieser Zustand am häufigsten im Freifeld auftritt. Da die Widerstände der Vorderseite im entlasteten Zustand konstant über alle Zyklen sind, konzentriert sich das Modell auf die Rückseite. Das Modell geht davon aus, dass Al-Brücken, die im Lichtmikroskop entdeckt wurden, vgl. Abb. 21b, die Metallisierung beider Zellteile auch nach dem Sprödbruch des Siliziumwafers verbindet.

A. Ermüdungsmodell der Rückseiten Al-Paste

Um den Widerstandsverlauf der Rückseitenmetallisierung zu beschreiben brauchen wir vier verschiedene Zustände, welche in Abb. 22 skizziert sind:

- 1) Ermüdungszustand 0 liegt beim ungebrochenen Minilaminat vor dem ersten Zyklus vor. Hier ist die Al-Paste elektrisch und mechanisch unverändert zum Herstellungszustand. Wenn das Minilaminat bricht, wechselt der Ermüdungszustand zu I.
- 2) Im Ermüdungszustand I ist die Al-Paste bis auf die Al-Brücken, die mechanisch und elektrisch die beiden Zellstücke verbinden, gebrochen. Die blaue Linie zeigt schematisch den Strompfad. Der Widerstand ändert sich vom Ermüdungszustand 0 zu I nicht. Wir nehmen an, dass die Brücken den ganzen leitfähigen Querschnitt der Al-Paste enthalten. Dies ist ein Rückschluss aus Leitfähigkeitsmessungen der Al-Paste, die zeigen, dass nur $1/23$ der ganzen Paste aus Aluminium besteht. Während jedes Belastungszyklus werden die Brücken verformt, was zur Schwächung und letztendlich zum Riss der Brücken führt. Dies kennzeichnet den Übergang von Ermüdungszustand I zu II.

- 3) Im Ermüdungszustand II können die Brücken im entlasteten Zustand keinen elektrischen Kontakt wiederherstellen. Während der weiteren Zyklen unterliegen die Brücken im Ermüdungszustand II mechanischer Ermüdung. Nach einer bestimmten Biegezyklenanzahl können die Brücken vom belasteten Zustand zum Ermüdungszustand III im entlasteten Zustand wechseln.
- 4) Im Ermüdungszustand III können die Brücken im entlasteten und belasteten Zustand wieder elektrischen und mechanischen Kontakt herstellen. Nach dem ersten Wechsel einer Brücke vom Ermüdungszustand II zu III kann die Brücke zufällig zwischen den beiden Ermüdungszuständen II und III hin und her wechseln. Dies geschieht vom entlasteten Zustand III zum belasteten Zustand II.

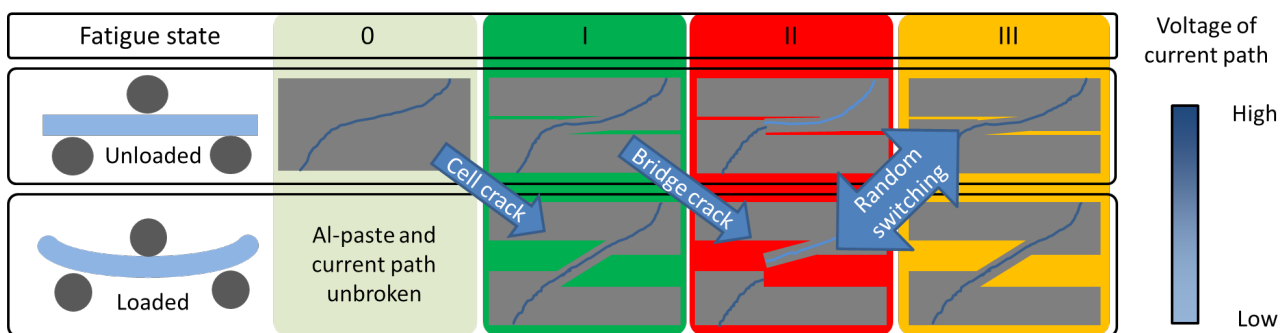


Abbildung 22: Lichtmikroskopbilder eines nicht Rückseiten verkapselten Minilaminats im belasteten Zustand. a) zeigt das Minilaminat von der Seite und b) von der Rückseite. Auf der Rückseite sind zwei Brücken der Al-Paste markiert. Die blauen Pfeile zeigen die Richtung der Rissöffnung.

B. Erklärung der gemessenen Rückseitenwiderständen mit dem Ermüdungsmodell

Mit einigen Al-Pasten Elementen in einer Parallelschaltung und den Ermüdungszuständen konnten wir den Verlauf des Rückseitenwiderstands beider Minilaminats beschreiben.

Beim Minilaminat ohne Rückseiteneinbettung in Abb. 20c ändern sich in den ersten drei Zyklen die Widerstände im be- und entlasteten Zustand nahezu nicht. Parallel gibt es nur Ermüdungszustand I (grüne Linie) Elemente. Danach steigen die Widerstände im entlasteten Zustand mit konstantem Abstand zu den Widerständen im belasteten Zustand bis zum 80. Zyklus an. Die Anzahl von zusätzlichen Elementen im Ermüdungszustand II (rote Linie) steigt an. Nach dem 80. Zyklus steigt der Unterschied im Widerstand zwischen dem ent- und belasteten Zustand innerhalb eines Zyklus an. Der Widerstand im entlasteten Zustand steigt oder fällt signifikant von Zyklus zu Zyklus. Deswegen muss es einen Wechsel zwischen dem Ermüdungszustand II und III (gelb) geben. Ab dem 2000. Zyklus erreichen die Widerstände im be- und entlasteten Zustand ein oberes Limit, welches in der Größenordnung des Kurzschlusswiderstands der Solarzelle ist. Da ist ein Hinweis, dass nur noch Elemente mit Ermüdungszustand I existieren mit einem Parallelwiderstand, der größer als der Kurzschlusswiderstand ist (Ende der grünen Linie). Des Weiteren erreicht der Widerstand im unbelasteten Zustand ein unteres Limit beim 2000. Zyklus, was andeutet, dass die maximale Anzahl an Elementen mit Ermüdungszustand III erreicht ist. Da das untere Limit des Widerstands in diesem Zustand höher als der Ausgangswiderstand, muss entweder die Anzahl der wiederverbundenen Elemente kleiner sein als die Gesamtzahl der

Elemente oder der einzelne Widerstand von wiederverbundenen Elementen im Ermüdungszustand III ist höher als der einzelne Widerstand im Ausgangszustand.

Im Minilaminat ohne Rückseitenverkapselung (Abb. 20d) treten die Ermüdungszustände zu anderen Zeitpunkten auf. Die Widerstände erreichen dort nicht den Kurzschlussstrom der Zelle bis zum letzten getesteten 100.000. Zyklus, was bedeutet, dass Elemente im Ermüdungszustand I (grüne Linie) immer präsent sind. Der Widerstand der Rückseite steigt ab dem 4. Zyklus an unabhängig vom be- und entlasteten Zustand. Die Anzahl an Elementen im Ermüdungszustand II (rote Linie) beginnt ab diesem Zyklus zu steigen. Elemente mit Ermüdungszustand III zeigen sich ab dem 2000. Zyklus, da hier ein Unterschied zwischen dem Widerstand im be- und entlasteten Fall innerhalb eines Zyklus zu erkennen ist (gelbe Linie).

Um die unterschiedlichen Widerstandsverläufe der Rückseite beider Minilaminare erklären zu können, analysierten wir die Rissbreite beider Minilaminare. Wir maßen die Rissbreite auf Lichtmikroskop-Bildern des Querschnitts der Minilaminare (Abb. 21a). Abb. 23a zeigt, dass die maximale Rissbreite des nicht Rückseiten verkapselten Minilaminats ($10,2 \pm 0,1$) μm ist und die des Rückseiten verkapselten Minilaminats ($8,4 \pm 0,1$) μm ist. Die Rissbreite des nicht eingekapselten Minilaminats verringert sich linear bis zu 5 μm mit sinkender Durchbiegung bis 60 μm . Danach schließt sich der Riss weniger stark, so dass die Rissbreite im entlasteten Zustand immer noch 3,6 μm beträgt. Die Rissbreite beim eingekapselten Minilaminat schließt sich linear auf 0,4 μm mit sinkender Durchbiegung bis 60 μm . Bei geringerer Durchbiegung bleibt die Rissbreite konstant. Die Änderung in der Rissbreite ist ca. 21 % größer beim Minilaminat mit Rückseiteneinbettung als ohne Rückseiteneinbettung. Dies führt auch zu einer höheren Verbiegung der Al-Brücken. Dies beschleunigt auch die Ermüdung und einen schnelleren Wechsel zu den jeweils nächsten Ermüdungszuständen im vorgestellten Modell.

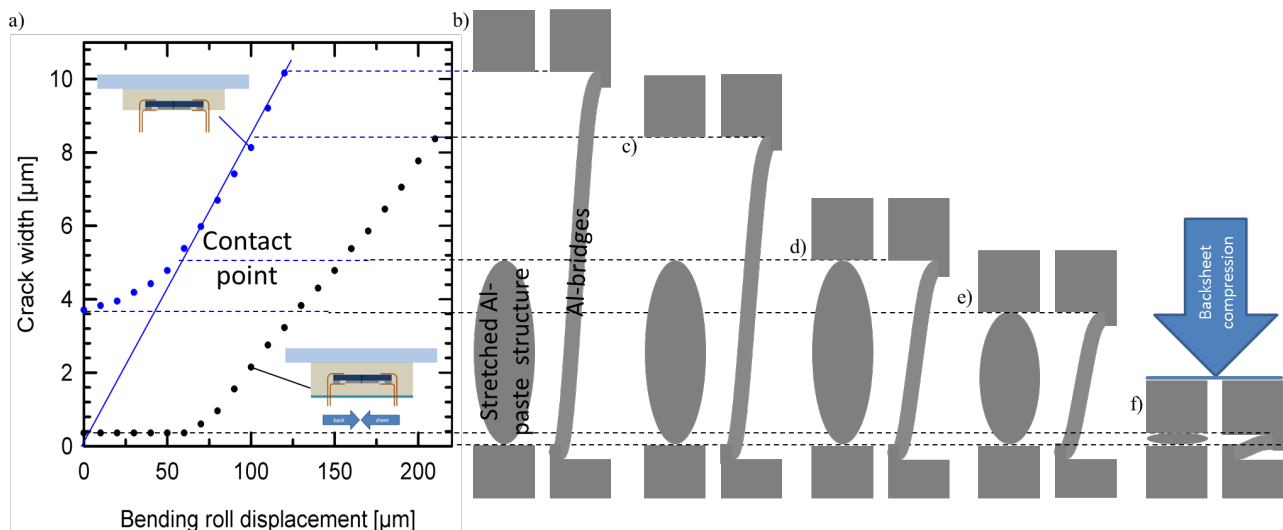


Abbildung 23: Lichtmikroskopbilder eines nicht Rückseiten verkapselten Minilaminats im belasteten Zustand. a) zeigt das Minilaminat von der Seite und b) von der Rückseite. Auf der Rückseite sind zwei Brücken der Al-Paste markiert. Die blauen Pfeile zeigen die Richtung der Rissöffnung.

Im Folgenden erklären wir den Ursprung der unterschiedlichen Rissbreiten beider Minilaminare. Die extrapolierte Rissbreite des Minilaminats ohne Rückseiteneinbettung im Bereich von 10,2 μm bis 5 μm (gerade blaue Linie) schneidet den Koordinatenursprung. Bei einem typischen Durchmesser der Al-Pasten-Partikel von 5 μm wird der Riss gehindert sich zu schließen, wie in

Abb. 23d gezeigt. Ein gestreckter Teil der Al-Paste (z.B. ein Al-Pasten-Partikel), welcher aus der Rissentstehung resultierte kann sich im Riss befinden. Während der Riss sich weiter schließt, wird eine immer größere Kraft benötigt, um den gestreckten Teil der Al-Paste zu komprimieren. Das nicht eingekapselte Minilaminat komprimiert diesen Teil um $1,4 \mu\text{m}$ wie in Abb. 23d bis e gezeigt.

Das eingekapselte Minilaminat komprimiert den gestreckten Teil der Al-Paste sehr viel mehr um $4,6 \mu\text{m}$, wenn man die gleiche Größe des gestreckten Teils der Al-Paste annimmt, wie in Abb. 23d bis f gezeigt. Dieses Verhalten und der fehlende Knick bei einer Rissbreite von $5 \mu\text{m}$ bei der Messung des eingekapselten Minilaminats (Abb. 23a) kann mit der viel größeren Kompression durch die unter Zug stehende Rückseitenfolie erklärt werden.

2.1.3 AP3: Modellierung des Rissfortschritts

In AP3.1 wurden die mechanischen Eigenschaften der zur Herstellung von PV-Modulen am ISFH verwendeten Materialien in Zusammenarbeit mit dem ISD für die Verwendung in der numerischen Simulation aufbereitet. Das noch unbekannte E-Modul der Al-Paste wurde am ISFH in Biegeversuchen bestimmt zu $3,9 \pm 2,7 \text{ GPa}$. Außerdem wurden die Kraft-Dehnungskurven der Verbinderbändchen zu verschiedenen Zeitpunkten der Verarbeitung gemessen, um sowohl das E-Modul als auch die Streckgrenzen zu bestimmen. Diese bisher fehlenden Werte im Materialmodell wurden an das ISD übergeben. Andere Materialparameter können aus der Literatur verwendet werden.

In AP3.2 konnten die im Arbeitspaket 1.2 durchgeführten 4-Linienbiegungen zur Validierung der bei den Simulationen des ISD verwendeten Modelle verwendet werden. Die in AP1.2 bestimmten Bruchspannungen der Zellen dienen der Kalibrierung der Bruchspannungen im Materialmodell des Siliziums beim ISD. Des Weiteren stimmen die Rissbreiten und Rissmuster, die in AP1.2 beim ISFH experimentell bestimmt und beim ISD simuliert wurden, gut überein. Die benötigte Kraft im Verhältnis zur Durchbiegung des Moduls wurde zur Validierung des Zusammenspiels der mechanischen Eigenschaften der einzelnen Schichten verwendet. Die experimentellen Ergebnisse wurden an das ISD übergeben.

Zur weiteren Validierung wurde die produktionsbedingte Durchbiegung der Solarzellen gemessen und an das ISD übergeben. Mit diesen Daten konnte vor allem die Streckgrenze der Al-Paste auf der Rückseite validiert werden. Während der Abkühlung nach dem Feuerschritt bei der Herstellung der Solarzelle findet ein Phasenübergang von Flüssig zu Fest der Al-Paste statt. Danach ist die Paste fest mit dem Silizium verbunden und die unterschiedlichen Temperatursausdehnungskoeffizienten führen während der weiteren Abkühlung zur Verspannung der Zelle. Die Spannung überschreitet dabei die Streckgrenze der Al-Paste und die Form der Solarzelle ändert sich nicht mehr. Diese Form wurde vom ISFH gemessen und ans ISD zur Validierung der Simulation des Herstellungsprozesses der Solarzelle übergeben.

2.1.4 AP4: Eigenspannungen in verlöteten Solarzellen

Die Messung von Eigenspannungen in den Solarzellen, die z.B. durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten von Verbinderbändchen und Siliziumsolarzellen entstehen, ist ein sehr wichtiger Schritt zur zerstörungsfreien Beurteilung von Bruchwahrscheinlichkeiten der Solarzellen. Hohe Eigenspannungen können zu früheren und häufigeren Rissen in den Zellen führen, auch

wenn keine initialen Vorschädigungen vorhanden sind. Diese Spannungen sollten laut Projektplan ursprünglich mit einem Polarimeter durchgeführt werden. Dieses hat sich in weiteren Vortests als ungeeignet für die Interpretation der Spannung in den Solarzellen herausgestellt. Anstelle des Polarimeters wurden ein Ramanspektrometer und ein Röntgendiffraktometer zur Spannungsmessung beschafft. Mit den alternativ beschafften Geräten war geplant, die Spannung im Silizium und in den Metallschichten zu messen.

In AP4.2 wurden mit dem Spannungen in den Verbinderbändchen von verstringten Siliziumsolarzellen mit Röntgendiffraktometrie gemessen. Dazu wurde die ω -Methode [20] verwendet. Abb. 24 zeigt die Messung der mechanischen Spannung auf einer Solarzelle mit einer typischen herstellungsbedingten Verbiegung. Die Spannung wird auf dem mittleren und einem äußeren Verbinderbändchen sowohl auf der Zellvorderseite als auch auf der Zellrückseite gemessen. Die Spannungen variieren von 10 MPa bis 87 MPa. Dabei sind die Spannungen auf der Vorderseite tendenziell etwas höher. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die Zelle während dem Verbindungsprozess flach gedrückt ist und danach wieder in den zellherstellungsbedingten gebogenen Zustand übergeht. Somit ist die Vorderseite gestreckt, was eine Erhöhung der Zugspannung verursacht. Auffällig ist das Spannungsmuster in Abhängigkeit der x-Position auf der Zelle aber unabhängig vom Busbar. Da das Muster sich bei allen Busbaren wiederholt, sind Inhomogenitäten in den Verbinderbändchen ausgeschlossen. Dieses Muster korreliert weder mit der Position der Lötöpfe noch mit der Position der Löt pads. Bei einer anderen Solarzelle wurde ebenfalls ein Muster innerhalb der Zelle gemessen, was sich aber vom Muster dieser Zelle unterscheidet. Dies deutet auf ein zellspezifische Inhomogenität in x-Richtung hin, wohingegen sie in y-Richtung konstant bleibt. Eventuell könnte es sich dabei auch um eine Temperaturinhomogenität des Zellförderbandes im Stringer handeln.

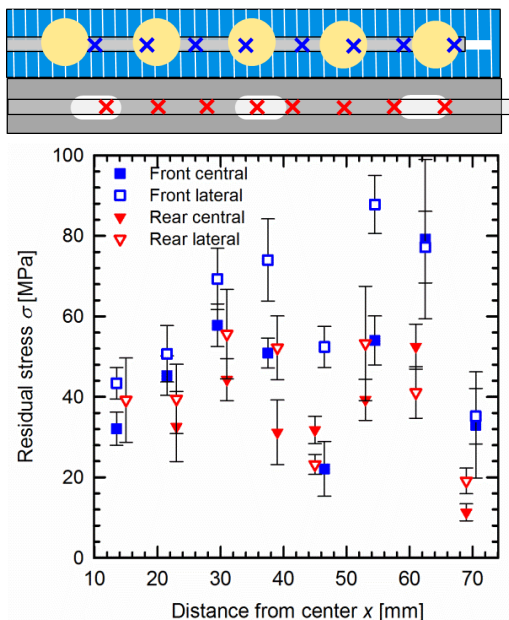


Abbildung 24: Eigenspannungsmessungen in den vorderen und hinteren Verbinderbändchen der Solarzelle in Abhängigkeit der Position. Der Ursprung der x-Achse ist das Zentrum der Solarzelle. Die Messpunkte sind im schematischen oberen Teil der Grafik als Kreuze gekennzeichnet. Die Position der Lötöpfe auf der Zellvorderseite sind als gelbe Kreise markiert und die Position der Löt pads auf der Zellrückseite sind als weiße Ovale dargestellt.

Da die Zellen im Modul durch die Lamination flach gedrückt werden, messen wir ebenfalls die Spannung in den Verbinderbändchen im flachgedrückten Zustand. Abb. 25 zeigt die Differenz der Spannungen im gebogenen und flachen Zustand. Die gemessenen Spannungen auf der Rückseite vergrößern sich, wohingegen die Spannungen auf der Vorderseite sich verkleinern. Dies ist so zu erwarten, da die Rückseite durch das Flachdrücken gestreckt und die Vorderseite gestaucht wird. Eine Berechnung der Spannungsänderung ergibt eine Differenz der Spannung im Verbinderbändchen von $22 \text{ MPa} \pm 4 \text{ MPa}$. Annahmen der Berechnung sind, dass die Länge des Siliziums sich nicht verändert und dass die Koppelung von Silizium und dem Verbinderbändchen perfekt sind. Mehr als 80 % der gemessenen Werte stimmen innerhalb der Messunsicherheit mit den berechneten Werten überein.

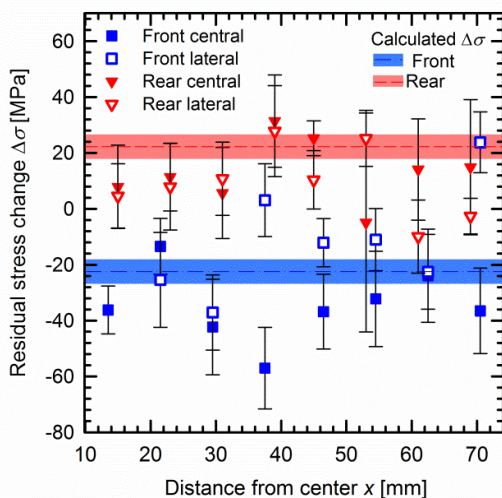


Abbildung 25: Differenz der Eigenspannungsmessungen zwischen flachem und gebogenem Zustand der Solarzelle. Die berechneten Differenzen der Eigenspannungsmessungen sind ebenfalls gekennzeichnet.

Zusätzlich zu den Spannungen im Verbinderbändchen sollten die Spannungen im Silizium der Solarzellen mit dem Ramanspektrometer gemessen werden. Es wurde ein Algorithmus für die Berechnung der Spannungen aus den Messungen entwickelt. Der Algorithmus wurde in ein Programm zur automatischen Auswertung der Spannung vieler Messpunkte implementiert. Für die Berechnung der Spannungen aus den Messungen ist es erst notwendig die Kristallorientierung der einzelnen Körner in der multikristallinen Solarzelle mit den gemessenen Intensitäten der Ramanpeaks zu bestimmen. Danach wird aus der spannungsabhängigen Frequenz des Ramanpeaks die Spannung berechnet. Einige optische Bauteile des Ramanspektrometers zeigen dabei polarisationsabhängige Eigenschaften, die die Auswertung des Algorithmus beeinflussen. Deswegen mussten für die Korrektur im Strahlengang einige Bauteile angeschafft werden, um die Polarisation zu korrigieren. Diese Bauteile wurden eingebaut und vermessen und der Algorithmus wurde darauf angepasst. Auch die Einstellungen der Blende und des konfokalen Lochs haben einen Einfluss auf die Polarisation und somit musste dieser Effekt genau gemessen werden und in der Auswertung berücksichtigt werden. Des Weiteren musste der bereits entwickelte Algorithmus für die Berechnung der mechanischen Spannungen im Silizium aus den Messungen angepasst werden, um eine zuverlässige Auswertung bei einer Temperaturschwankung von ca. $1 \text{ }^\circ\text{C}$ zu gewährleisten, die im Labor selbst nach einer neuen Klimatisierung des Raumes nicht weiter verringert werden konnte. Diese Temperaturschwankung führt zu Frequenzverschiebungen des Ramansignals und somit zu Fehlern in der berechneten mechanischen Spannung, die vor der

Anpassung des Algorithmus die erwarteten Spannungen um ein vielfaches übertrafen. Deswegen wurde der Algorithmus so abgeändert, dass er immer mit einer zeitnahen Referenzmessung vor und nach der eigentlichen Messung korrigiert wird. Eine Probemessung an einem gezielt verspannten Wafer hat die betragsmäßige Spannung im Silizium mit einer Abweichung von weniger als 5 % im Vergleich zum berechneten Wert bestätigt. Um Kristallsymmetrieeffekte beurteilen zu können wurde ein zweiter Wafer mit einer anderen Atomebenenausrichtung gezielt mechanisch gebogen. Auch hier stimmen die Beträge der Spannung sehr gut mit der Erwartung überein. Jedoch zeigt die Richtungsverteilung der Spannung bedingt durch Randeffekte des Wafers eine komplexe Spannungsrichtungsverteilung, die nicht mit der randeffektfreien Theorie der Spannungsrichtungsbestimmung übereinstimmt.

2.1.5. AP5: Rissfortschritt bei künstlicher Alterung

Am ISFH wurde in AP5.1 die Entwicklung von Rissen unter künstlicher Alterung untersucht. Ziel war es zu verstehen, wie sich gerissene Zellbruchstücke im Laufe der künstlichen Alterung elektrisch abtrennen. Dazu wurden in AP1.2 mit dem Modul-Biegeversuch Risse in Module eingebracht und bezüglich ihrer elektrischen Ankopplung an die Zelle untersucht. Im Anschluss wurden diese Module einer künstlichen Alterung unterzogen, in deren Verlauf wiederholt die Leistung gemessen wurde.

Untersuchungen in der Gruppe von Marco Paggi (Professor of Structural Mechanics at the IMT Institute for Advanced Studies Lucca, Italy) haben gezeigt, dass Feuchte-Frost Prüfungen, die die thermo-mechanische Belastung während der Alterung der Module simulieren, auf den Leistungsverlust durch Zellteilisolation nach mechanischer Belastung einen kaum messbaren Einfluss haben. Deswegen wurde der Versuchsablauf des Rissfortschritts unter thermo-mechanischer Belastung angepasst. Die neue Prüfung sieht nach der mechanischen Belastung einen Feuchte-Wärme Prüfung gemäß IEC 61215 vor, bei dem die enthaltenen Materialien nicht mechanisch belastet werden, sondern nur die Materialeigenschaften wie bei einer natürlichen Alterung geändert werden. Der Leistungsverlust durch diese Prüfung wird beurteilt, indem die Leistung des Moduls initial, nach mechanischer Belastung in AP1, nach der Feuchte-Wärme Prüfung und nach wiederholter mechanischer Belastung wie in AP1 gemessen wird.

Abb. 26 zeigt die Leistungsverluste der Module im jeweiligen Zustand. Initial haben alle Module einen Wirkungsgrad zwischen 13,4 % und 13,6 %. Die mechanische Belastung von 100 Zyklen verringert den Wirkungsgrad der Module nur um maximal 0,7 % was knapp außerhalb der Messunsicherheit des Flashers liegt. Die Feuchte-Wärme Prüfung verringert den Wirkungsgrad aller Module deutlich stärker.

Die Module mit senkrechten Verbinderbändchen zu den Biegerollen zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Rückseitenfolie. Im Modul 1 mit Rückseitenfolie verringert sich der Wirkungsgrad durch die Feuchte-Wärme Prüfung um 2,2 % und in Modul 6 ohne Rückseitenfolie um 10,3 %. Die Leistungsverringerung ist auf einen erhöhten Serienwiderstand in den Verbinderbändchen zurückzuführen was in Elektolumineszenz Aufnahmen analysiert werden kann. Diese werden während der Prüfung so weit gestreckt, dass sie sich plastisch verformen und einschnüren oder ganz abreißen. Die Streckung ist in Modul 1 mit Rückseitenfolie geringer, da dieses unter Spannung steht und die Zellen somit am Auseinanderdriften während der Belastung bremst was in Fotoaufnahmen bestätigt wurde. Die Wirkungsgradminderung tritt nicht direkt nach

der Belastung auf, da die gerissenen Bändchen unter Entlastung wieder Kontakt bekommen. Wir vermuten, dass die Bruchstellen während der Feuchtephase der Feuchte-Wärme Prüfung korrodieren und somit den Widerstand erhöhen. Nachfolgende mechanische Belastungszyklen verringern den Wirkungsgrad weiter.

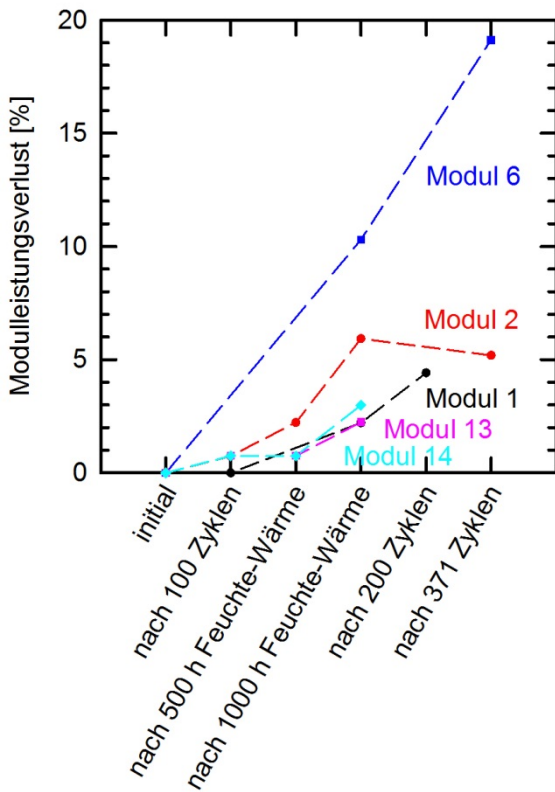


Abbildung 26: Modulleistungsverlust in den jeweiligen Zuständen der Alterung.

Die Module mit parallelen Verbinderbändchen zu den Biegerollen zeigen ebenfalls eine Verringerung des Wirkungsgrads. Hier sinkt der Wirkungsgrad während der Feuchte-Wärme Prüfung zwischen 1,5 % und 5,2 % in Abhängigkeit des verwendeten EVA Typs. Die Dicke des EVAs hat keine Auswirkung auf den Wirkungsgrad. Der Verlust ist hier auf den erhöhten Serienwiderstand in den Zellen zurückzuführen. In Elektrolumineszenzaufnahmen sind abgebrochene Zellflächen zu erkennen, die mit einem erhöhten Widerstand an den Zellteil mit Verbinderbändchen angeschlossen sind. Auch hier haben die Zellflächen einen guten Kontakt direkt nach der mechanischen Belastung. Die Kontaktflächen korrodieren dann während der Feuchte-Wärme Prüfung.

2.1.6. AP6: Simulation von Belastungsszenarien / Designvorschläge

In AP6.1 wurden elektrische Simulationen durchgeführt, um die Auswirkung von Rissen auf die Modulleistung zu beurteilen. Dazu wurde eine Rissstatistik von im Feld bzgl. der auftretenden Zellrisse von 574 charakterisierten Modulen herangezogen. Mit Monte-Carlo Simulationen wurde die Leistung in 1000 Modulen bestimmt in Abhängigkeit des Risswiderstands. Im Feld sind die Module in Strings von 20 Modulen verbunden. Dazu wurde die Leistung von 1000 20er-Strings mit Monte-Carlo Simulationen bestimmt. Als Risswiderstände wurde der in AP2 ermittelte

Risswiderstandsbereich von 0,03 bis 4000 Ω verwendet. Bei über 50 % des ermittelten Risswiderstandsbereichs haben 5 % der Module eine Leistung von weniger als 80 % der Ausgangsleistung und liegen somit unterhalb der Garantiegrenze von 80 % Ausgangsleistung nach 20 Jahren.

In AP6.2 wurden Designvorschläge für das Rissmanagement gemacht. Aus AP2 folgt, dass die Rissbreite möglichst klein gehalten werden muss, um den Widerstand und damit den Leistungsverlust ebenfalls klein gehalten wird. Dafür sollte, wie aus AP1 bekannt, eine Rückseitenfolie verwendet werden, die die Zellen möglichst stark zusammenzieht und somit die Rissbreite verringert. Eine Rückseitenfolie mit starkem Schrumpf, die eine möglichst hohe Vorspannung erzeugt könnte die Auswirkung der Risse noch weiter verringern. Hierbei muss natürlich sichergestellt werden, dass die Rückseitenfolie selbst nicht aufgrund der mechanischen Spannung Risse ausbildet. Der Einfluss der Rückseitenfolie auf die Zellrissproblematik wurde bisher in der PV-Technik noch nicht diskutiert.

Außerdem folgt aus AP1, dass die Hauptbelastung im Modul senkrecht zu den Verbinderbändchen vorliegen sollte, da so weniger kritische Risse entstehen. Im Arbeitspaket 5 ist gezeigt, dass diese wenigen Risse auch weniger Leistungsverlust verursachen. Die Zellausrichtung und der Rahmen kann dementsprechend konstruiert werden, dass die Hauptbelastung im Modul senkrecht zu den Verbinderbändchen ist.

In AP2 wurde gezeigt, dass die Al-Paste der entscheidende Faktor für den Leistungsverlust ist. Somit ist es interessant diese Paste in ihren mechanischen Eigenschaften so zu verändern, dass ihr Widerstand nicht so stark degradiert.

Aus AP1 folgt, dass Vorschädigungen in der Zelle, wie Kreuzrisse unter dem Verbinderbändchen oder Kantenrisse parallel zur Belastungsrichtung die Bruchstabilität der Zellen um das 3 bis 4-fache senken. Somit sollten in einer Vorcharakterisierung solche vorgeschädigten Zellen aussortiert werden, um eine dauerhaft hohe Leistung im Modul zu gewährleisten. Aus dem Rissöffnungsmodell in AP1 folgt außerdem, dass Mehrfachrisse eine geringere Rissbreite aufweisen, als Einzelrisse. Da geringere Rissbreiten potentiell auch geringere Risswiderstände zur Folge haben, könnte es von Vorteil sein, die Spannungsverhältnisse in der Zelle so anzupassen, dass die Zelle möglichst dendritisch bricht. Dafür müsste noch die genaue Abhängigkeit des Risswiderstands von der Rissbreite ermittelt werden.

2.1.7. AP7: Ausrichtung von Workshops

Es wurden zwei Workshops organisiert (AP7.1), in denen Ergebnisse dieses Projektes und verwandte Inhalte dem wissenschaftlichen und Fachkräftenachwuchs zugänglich gemacht wurden. Einen Workshop richtete das ISD an der Universität Hannover aus, einen weiteren Workshop richtete das ISFH in Hameln aus.

Der erste internationale Workshop mit dem Titel „Impact of mechanical and thermal loads on the long term stability of PV modules“ wurde am 05.11.2013 am ISFH ausgerichtet. Es wurden 10 Vorträge und 2 Poster vorgestellt darunter 2 Vorträge und 2 Poster vom ISFH und ISD. Die anderen Vorträge waren themenverwandt zum Projekt aus Forschung und Industrie. Das ISD und ISFH konnte bei diesen Vorträgen relevante Informationen zur Rissentstehung und Spannungsausbildung in PV Modulen für den weiteren Projektverlauf gewinnen. Die 50 Teilnehmer

kamen aus der Industrie und Forschung unter anderem auch Studenten. Die Vorträge sind außerdem der Öffentlichkeit auf der Homepage des ISFH zugänglich:

http://www.isfh.de/institut_solarforschung/workshop-mikro.php

Der zweite internationale Workshop mit dem Titel „Impact of mechanical and thermal loads on the long term stability of PV modules“ hat am ISD am 3. Februar 2015 stattgefunden. Es wurden 9 Vorträge präsentiert, darunter 2 Vorträge vom ISFH („Measurement of mechanical stress in interconnected silicon solar cells“ und „Impact of cracks in multicrystalline silicon solar cells on PV module power“) und einer vom ISD. Die anderen Vorträge waren themenverwandt zum Projekt aus Forschung und Industrie. Das ISD und ISFH konnte bei diesen Vorträgen relevante Informationen zur Rissentstehung und Spannungsausbildung in PV Modulen für den weiteren Projektverlauf gewinnen. Außerdem konnten wichtige Ergebnisse aus dem Projekt den Industriepartnern aus der Solarbranche (z.B. Heckert Solar AG, Schlenk Metallfolien GmbH & Co. KG, Mencke & Tegtmeyer GmbH, Pi4 Robotics GmbH) weitergegeben werden. Die Teilnehmer kamen aus der Industrie und Forschung. Die Vorträge sind der Öffentlichkeit auf der Homepage des ISFH zugänglich gemacht worden:

http://www.isfh.de/institut_solarforschung/2.-modulworkshop.php

2.1.8. AP8: Herstellung von PV Modulen für AP1 und AP5

Da Schott Solar AG aus dem Projekt ausgestiegen ist, war eine Umwidmung der Fördermittel notwendig. Die ursprüngliche Projektstruktur sah vor, dass alle im Projekt zu prüfenden Standard-PV-Module bei Schott Solar hergestellt werden. Diese Aufgabe wurde an das ISFH transferiert. Dafür wurde ein neuer Laminator angeschafft, mit dem die erforderlichen PV-Module mit entsprechender Größe hergestellt werden konnten. Des Weiteren wurden die dafür notwendigen Materialien wie Glas, EVA, Rückseitenfolie, Verbinder, Querverbinder und Flussmittel angeschafft. Schott Solar AG stellte uns außerdem noch 6000 Zellen, davon 3000 bzgl. Zellrissen vorcharakterisierte Zellen, zur Verfügung. Es wurden in der Projektlaufzeit 10 Module hergestellt, deren Spezifikationen in AP1 gegeben sind.

2.1.9. AP9: Mikrorissanalyse

Die Mikrorissanalyse vor und nach dem Zellverbindungsschritt hilft, die Ursache der Mikrorisse zu finden. Diese Mikrorisse können sich später zu makroskopischen Rissen ausbreiten und zur erheblichen Leistungsreduktion im PV Modul führen. Ein großer Teil der Zellen wurde bereits von der Schott Solar AG mit dem Edgelight-Verfahren vermessen. Das ISFH analysierte die mit dem Edgelight-Verfahren vermessenen Zellen hinsichtlich der unterschiedlichen Risstypen. Die drei häufigsten Risstypen waren Kantenrisse parallel und senkrecht zu den Busbars und Kreuzrisse am mittleren Busbar. Wie in AP1 beschrieben, wurden die vorgeschädigten Zellen in Modul ||BS-pd verbaut und für die Korrelation zwischen Mikro- und Makrorissen verwendet.

2.2 DARSTELLUNG DER WICHTIGSTEN POSITIONEN DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES

Die veranschlagten Sachmittel und Personalmittel wurden planmäßig eingesetzt. Die wichtigsten drei Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind:

0812 Beschäftigte E12-E15:	588.454,98 €
0817 Beschäftigte E1-E11:	181.396,60 €
0850 Gegenstände über 410 / 440 EUR	575.567,25 €

Dabei wurden bei den Gegenständen ein Röntgendiffraktometer für die Messung der mechanischen Spannung in den Verbinderbändchen und ein Ramanspektrometer für die Messung der mechanischen Spannung im Silizium angeschafft. Des Weiteren wurden die Teile für den 4-Linienbiegeaufbau für die mechanische Belastung der Module angeschafft.

2.3 DARSTELLUNG DER NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT

Die in den Arbeitspaketen vorgestellten Arbeiten waren für die Erreichung der Projektziele notwendig. Die 4-Linienbiegeversuche in AP1 waren notwendig, um eine statistische Aussage der Einflussfaktoren für die Entstehung Mikrorisse zu bekommen. Die Auswahl der Variationen in der Bauart der Module und die Anzahl der getesteten Module waren außerdem angemessen, um eine statistische Aussage treffen zu können. Die Widerstandsmessungen in AP2 waren notwendig, um die Einflussfaktoren für die Veränderung des Widerstands mit der Alterung der Module bestimmen zu können. Die Auswahl der Variationen in der Bauart der Minilamine war außerdem angemessen, um die mikroskopischen Ursachen für den alterungsabhängigen Widerstand zu bestimmen. In AP4 war es notwendig den geplanten Polarimeteraufbau zur Spannungsmessung durch eine vielversprechendere Lösung eines Röntgendiffraktometers und eines Ramanspektrometers zu ersetzen. Die Spannungsmessung ist notwendig, um ein tieferes Verständnis für die Rissbildung zu bekommen. Die dafür durchgeführten Messungen am Röntgendiffraktometer waren angemessen, um die Spannungsverteilung in den Verbinderbändchen zu bestimmen. Die Messungen mit dem Ramanspektrometer waren angemessen, um die Probleme im Aufbau des Geräts zu beheben und die komplexe Spannungsbestimmung zu ermöglichen. Leider haben diese Arbeiten zu keiner aussagekräftigen Messmethode zu Eigenspannungsmessung in Solarzellen geführt. Die Herstellung der Module am ISFH in AP8 war notwendig, da diese Module in den AP1 und AP5 getestet werden mussten und Schott diese nach dem Ausstieg nicht herstellten. Die dafür angeschafften Materialien und Geräte, wie dem Laminator, waren angemessen. In diesem Projekt wurde ein grundlegendes Verständnis für Mikrorisse in PV-Modulen gelegt. Dieses Verständnis ermöglicht die Entwicklung neuer Produkte, die zuverlässiger und damit langlebiger sind.

2.4 DARSTELLUNG DES VORAUSSICHTLICHEN NUTZENS, INSBESONDERE DER VERWERTBARKEIT DES ERGEBNISSES IM SINNE DES FORTGESCHRIEBENEN VERWETUNGSPLANS

Die Erfolgsaussichten des laut Änderungsantrag modifizierten Projektes und des bewilligten Aufstockungsantrag für 2015 bleiben auch nach Ausstieg der Firma Schott Solar AG unverändert. Das ISFH hat zusätzlich die Infrastruktur mit einem Laminator für Standardmodulgrößen, einem Ramanspektrometer für die Messung der Eigenspannung im Silizium und einem Röntgendiffraktometer für die Messung der Eigenspannungen in Metallen gestärkt. Das Ramanspektrometer und das Röntgendiffraktometer sind universelle Charakterisierungstools, die für andere Projekte wichtig sind. Im damals beim BMWi beantragten Forschungsprojekt Fidelitas

wurde beabsichtigt die Raman Spektroskopie zu verwenden, um die chemischen Veränderungen des Laminationsmaterials in künstlich bewitterten PV-Modulen über Zeit zu untersuchen. Im BMUB geförderten Projekt TASK wurde geplant Beschichtungen für Absorberbleche in thermischen Solarkollektoren hinsichtlich ihrer Phasenzusammensetzung und Kristallinität mit dem Röntgendiffraktometer zu analysieren. Außerdem wurde beabsichtigt, die Schichtdicke von dünnen, optisch intransparenten Schichten hochpräzise im streifenden Einfall mit dem Röntgendiffraktometer zu bestimmen. Im BMUB geförderten Projekt MEMO wurden Spannungsmessungen Al-Metallisierungen mit dem Röntgendiffraktometer durchgeführt. Die Spannung in einer auf einen dicken Si-Wafer aufgetragenen Metallschicht soll hier genutzt werden, um kontrolliert eine dünne Si-Schicht ohne Sägeverluste abzulösen.

Insbesondere die Spannungsmessung in Silizium ist auf Interesse bei verschiedenen Firmen gestoßen. Leider konnte innerhalb dieses Projektes kein Messsystem zur Spannungsmessung für die Qualitätskontrolle mit einem Unternehmen entwickelt werden. Des Weiteren ist erstmals systematisch der Ursprung des Kontaktverlusts an Zellrissen in Al-BSF und aktuellen PERC Zellen untersucht worden. Diese Methode kann dazu verwendet werden bei der Entwicklung neuer Al-Pasten oder anderer Metallisierungen die Zuverlässigkeit der Leitfähigkeit bei Zellbruch einschätzen zu können. Es ist geplant, die Ergebnisse zur Rissstatistik unter mechanischer Belastung aus AP1 in einem Journal zu veröffentlichen.

Da die Ergebnisse zur Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität von Solarzellen mit Zellrissen veröffentlicht wurden und werden, können diese Ergebnisse von allen deutschen Modulherstellern verwertet und zur Optimierung und Bewertung ihrer Solarmodule genutzt werden. Das starke Interesse an diesem Thema zeigte sich durch die großen Besucherzahlen von Industrie und Forschung bei den Workshops. Die in diesem Projekt erzielten Erkenntnisse können z.B. von der Firma Bruker Spaleck GmbH genutzt werden, mit der wir in ständigem Austausch standen. Es werden Verbinderbändchen der Firma getestet und bewertet und die Ergebnisse können in die Entwicklung der Verbinderbändchen bei Bruker Spaleck GmbH einfließen. Darüber hinaus hat der deutsche Modulhersteller Algatec Solar AG, der Anlagenhersteller für Photovoltaik Schmid Technology GmbH, das Ingenieur- und Sachverständigenbüro InsidePV, das Ingenieurbüro Fleiß und der unabhängige Sachverständige Tobias Leberz ihr starkes Interesse an den Ergebnissen des Projekts ausgedrückt. Die jeweiligen Interessensbekundungen lagen dem Zwischenbericht 2013 bei.

2.5 WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG DES VORHABENS DEM ZUWENDUNGSEMPFÄNGER BEKANNT GEWORDENER FORTSCHRITT AUF DIESEM GEBIET BEI ANDEREN STELLEN

Marco Paggi (2012): "A multi-physics and multi-scale numerical approach to microcracking and power-loss in photovoltaic modules":

Sasha Ditrich (2012): "Interdependency of mechanical failure rate of encapsulated solar cells and module design parameters"

Martin Sander (2013): "Investigations on cracks in embedded solar cells after thermal and mechanical loading"

Martin Sander (2013): "Systematic investigation of cracks in encapsulated solar cells after mechanical loading"

Marco Paggi (2013): "Numerical modelling of microcracking in PV modules induced by thermo-mechanical loads"

Pooja Chaturvedi (2013): "Broken metal fingers in silicon wafer solar cells and PV modules"

Popovich (2013): "Understanding the Properties of Silicon Solar Cells Aluminium Contact Layers and Its Effect on Mechanical Stability"

F. Kaule, W. Wang, S. Schoenfelder, Modeling and testing the mechanical strength of solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 120, Part A, January 2014, Pages 441-447.

A.S. Budiman, G. Illya, V. Handara, W.A. Caldwell, C. Bonelli, M. Kunz, N. Tamura, D. Verstraeten, Enabling thin silicon technologies for next generation c-Si solar PV renewable energy systems using synchrotron X-ray microdiffraction as stress and crack mechanism probe, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 130, November 2014, Pages 303-308.

M. Paggi, I. Berardone, A. Infuso, M Corrado (2014) Fatigue degradation and electric recovery in Silicon solar cells embedded in photovoltaic modules, *Scientific reports* 4, 4506.

A. Sapora, M. Paggi (2014) A coupled cohesive zone model for transient analysis of thermoelastic interface debonding, *Computational Mechanics*, 53:845-857

I. Berardone, M. Corrado, M. Paggi (2014) A generalized electric model for mono and polycrystalline silicon in the presence of cracks and random defects, *Energy Procedia* 55:22-29.

A. Infuso, M. Corrado, M. Paggi (2014) Image analysis of polycrystalline solar cells and modeling of intergranular and transgranular cracking, *Journal of European Ceramic Society*, 34:2713–2722

S. Spataru, P. Hacke, D. Sera, S. Glick, T. Kerekes and R. Teodorescu, "Quantifying solar cell cracks in photovoltaic modules by electroluminescence imaging," *Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2015 IEEE 42nd, New Orleans, LA, 2015, pp. 1-6. doi: 10.1109/PVSC.2015.7356124

V. Gade, N. Shiradkar, M. Paggi and J. Opalewski, "Predicting the long term power loss from cell cracks in PV modules," *Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2015 IEEE 42nd, New Orleans, LA, 2015, pp. 1-6. doi: 10.1109/PVSC.2015.7355665

Pletzer Tobias M., Mülken Justus I., Reißland Sven, Breitenstein Otwin, and Knoch Joachim (2015), Influence of cracks on the local current–voltage parameters of silicon solar cells, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 23, pages 428–436. doi: 10.1002/pip.2443

Diese komplementären Forschungsaktivitäten zeigen die Relevanz des Vorhabens und helfen bei der Interpretation und Einordnung der Ergebnisse.

2.6 ERFOLGTE ODER GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN DES ERGEBNISSES

Erfolgte geprüfte Veröffentlichungen in Fachzeitschriften:

Käsewieter J., Haase F., Köntges M., "Model of Cracked Solar Cell Metallization Leading to Permanent Module Power Loss", in IEEE Journal of Photovoltaics , vol. 6, no. 1, pp. 28-33, Jan. 2016, doi: 10.1109/JPHOTOV.2015.2487829

Morlier A., Haase F., Köntges M., "Impact of Cracks in Multicrystalline Silicon Solar Cells on PV Module Power - A Simulation Study Based on Field Data", in IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 5, no. 6, pp. 1735-1741, Nov. 2015, doi: 10.1109/JPHOTOV.2015.2471076

Geplante geprüfte Veröffentlichungen in Fachzeitschriften:

Haase F., Käsewieter J., Köntges M., "Fracture probability, crack patterns, and crack widths of multicrystalline silicon solar cells in PV-modules during mechanical loading", in Vorbereitung

Erfolgte geprüfte Veröffentlichungen auf Fachkonferenzen präsentiert:

Haase F., Käsewieter J., Köntges M., "Understanding the movement of cracked solar cell parts in PV modules during mechanical loading" Energy Procedia, Volume 92, August 2016, Pages 554-559, ISSN 1876-6102, <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.07.019>.

Morlier A., Haase F., Köntges M., "Impact of cracks in multicrystalline silicon solar cells on PV module power – A simulation study based on field data" Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015 IEEE 42nd, New Orleans, LA, 2015, pp. 1-3. doi: 10.1109/PVSC.2015.7355664

Morlier A., Haase F., Käsewieter J., Köntges M., "Measurement of residual stress in copper interconnectors on crystalline silicon solar cells by X-ray diffraction" 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Kyoto, Japan, 23.-27. November 2014

Haase F., Käsewieter J., Winter R., Blankemeyer S., Morlier A., Kunze I., Köntges M., "Impact of Backsheet on Interconnector and Cell Breakage in PV Laminates under Mechanical Loads", in Proceedings of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference (EUPVSEC), Amsterdam, Netherlands, 22-26 September 2014, pp. 2477-2483, doi: 10.4229/EUPVSEC20142014-5DO.11.1

Käsewieter J., Haase F., Larrodé M. H., Köntges M., "Cracks in Solar Cell Metallization Leading to Module Power Loss under Mechanical Loads", Energy Procedia, vol. 55, 2014, pp. 469-477, ISSN 1876-6102, <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.08.011>.

Erfolgte Vorträge auf Fachkonferenzen:

Haase F., Käsewieter J., Köntges M., "Properties of Cracks in Solar Cells and Their Impact on Long Term Module Power" at PV Module Reliability Workshop 2016, Denver, USA, 24. Februar 2016

Käsewieter J., Morlier A., Haase F., Köntges M., "Measurement of mechanical stress in interconnected silicon solar cells", at 2nd Workshop Impact of mechanical and thermal loads on the long term stability of PV modules, Hannover, Germany, 3. Februar 2015

Morlier A., Haase F., Köntges M., " Impact of cracks in multicrystalline silicon solar cells on PV module power", at 2nd Workshop Impact of mechanical and thermal loads on the long term stability of PV modules, Hannover, Germany, 3. Februar 2015

Haase F., Käsewieter J., Larrodé M. H., Köntges M., "Microscopic investigation of cell cracks leading to electric isolations and power loss under mechanical load", at 1st International Symposium on Energy Challenges and Mechanics, Aberdeen, Scotland, 8.-10. July 2014

Haase F., Käsewieter J., Larrodé M. H., Köntges M., "Mechanisms leading to electrically isolated cell parts and power loss under mechanical loads", at 1st Workshop Impact of mechanical and thermal loads on the long term stability of PV modules, Emmerthal, Germany, 5. November 2013

Referenzen

[1] A. M. Gabor, M. Ralli, S. Montminy, L. Alegria, C. Bordonaro, J. Woods, L. Felton, M. Davis, B. Atchley und T. Williams. Soldering induced damage to thin Si solar cells and detection of cracked cells in modules, 21th EU-PVSEC (Dresden, 2006).

[2] F. Reil, K. Strohkendl, J. Althaus und W. Vaassen. Mechanische Beanspruchungen für PV Module – Transportbelastungen, 6. Workshop – „Photovoltaik-Modultechnik“, (Deutschland, Köln, TÜV Rhein-land, Nov. 2009).

[3] S. Pingel, Y. Zemen, T. Geipel und J. Berghold. Mechanical stability of solar cells within solar panels. Proc. of 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Germany, Hamburg, WIP, 2009).

[4] M. Köntges und K. Bothe. Elektrolumineszenzmessungen an PV-Modulen, *ep Photovoltaik aktuell* 7/8, 2008, S.36

[5] M. Köntges, I. Kunze und K. Bothe. Bewertung der Elektrolumineszenzbilder von Photovoltaikmodulen, Tagungsband vom 25. Symposium Photovoltaische Solarenergie, (Bad Staffelstein, Deutschland, OTTI, 3.-5. März 2010)

[6] M. Köntges, I. Kunze, S. Kajari-Schröder, X. Breitenmoser und B. Bjørneklett. Quantifying the risk of power loss in PV modules due to micro cracks, 25th EU-PVSEC (WIP, Valencia, Spain, 2010), p. 3745 - 3752

[7] Y. Zemen, T. Prewitz, T. Geipel, S. Pingel, J. Berghold, THE IMPACT OF YIELD STRENGTH OF THE INTERCONNECTOR ON THE INTERNAL STRESS OF THE SOLAR CELL WITHIN A MODULE, Proc. of 25th EUPVSEC (WIP, Valencia, Spain, 2010), 4AV.3.38

[8] S. Dietrich, M. Pander, M. Sander, St. H. Schulze and M. Ebert, Mechanical and thermo-mechanical assessment of encapsulated solar cells by finite-element-simulation, Proc. SPIE 7773, 77730F (2010); doi:10.1117/12.860661

- [9] R. Meier, F. Kraemer, S. Wiese, K.-J. Wolter and J. Bagdahn, Reliability of copper-ribbons in Photovoltaic Modules under Thermo-Mechanical Loading, Proceedings of PVSC-35 (IEEE, Honolulu, HI, 2010) 1283- 1288
- [10] G. Sarau, M. Becker, G. Andrä, S. Christiansen, RESIDUAL STRESS MEASUREMENTS IN MULTICRYSTALLINE SILICON BULK AND THIN FILM SOLAR, Proc. of 23rd EUPVSEC (WIP, Valencia, Spain, 2008), p. 2265-2271
- [11] S. He, S. Danyluk, I. Tarasov, S. Ostapenko, Residual stresses in polycrystalline sheet silicon and its relation to lifetime, Appl. Phys. Lett. 89, 111909 (2006); doi:10.1063/1.2354308
- [12] M.P. Singh, Effect of Local Stress on Si p-n Junction Characteristics, Phys.Stat.Sol. (a) 1,259 (1970), p. 259
- [13] Ortner, A., Gräff, O., Stelzl, M., Macherey, F. and Neubecker, R. (2013), 'Edge-light': combination of sensitive crack detection and luminescence measurements. Prog. Photovolt: Res. Appl., 21: 1343–1353. doi:10.1002/pip.2275
- [14] F. Haase, J. Käsewiter, R. Winter, S. Blankemeyer, A. Morlier, I. Kunze, M. Köntges, "Impact of back sheet on interconnector and cell breakage in PV laminates under mechanical loads", *Proceedings of the 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Amsterdam, Netherlands, 2014, pp. 2477 - 2483.
- [15] R. B. Abernethy, *The New Weibull Handbook*, 4 (2005).
- [16] S. Dietrich, M. Pander, M. Sander, M. Ebert, "Mechanical investigations on metallization layouts of solar cells with respect to module reliability." *Energy Procedia* 38 (2013), pp. 488 - 497.
- [17] S. Dietrich, M. Pander, M. Sander, U. Zeller and M. Ebert, "Stress analysis of encapsulated solar cells by means of superposition of thermal and mechanical stresses," *Proc. SPIE 8825, Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components, and Systems VI*, 882505 (September 24, 2013); doi:10.1117/12.2024319; <http://dx.doi.org/10.1117/12.2024319>.
- [18] Versteifung der Struktur ISD
- [19] U. Eitner, M. Köntges and R. Brendel, "Measuring thermomechanical displacements of solar cells in laminates using digital image correlation," *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2009 34th IEEE*, Philadelphia, PA, 2009, pp. 001280-001284. doi: 10.1109/PVSC.2009.5411248
- [20] M. Birkholz, *Thin film analysis by X-Ray scattering*, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2006, Kapitel 6.2, 247-248.