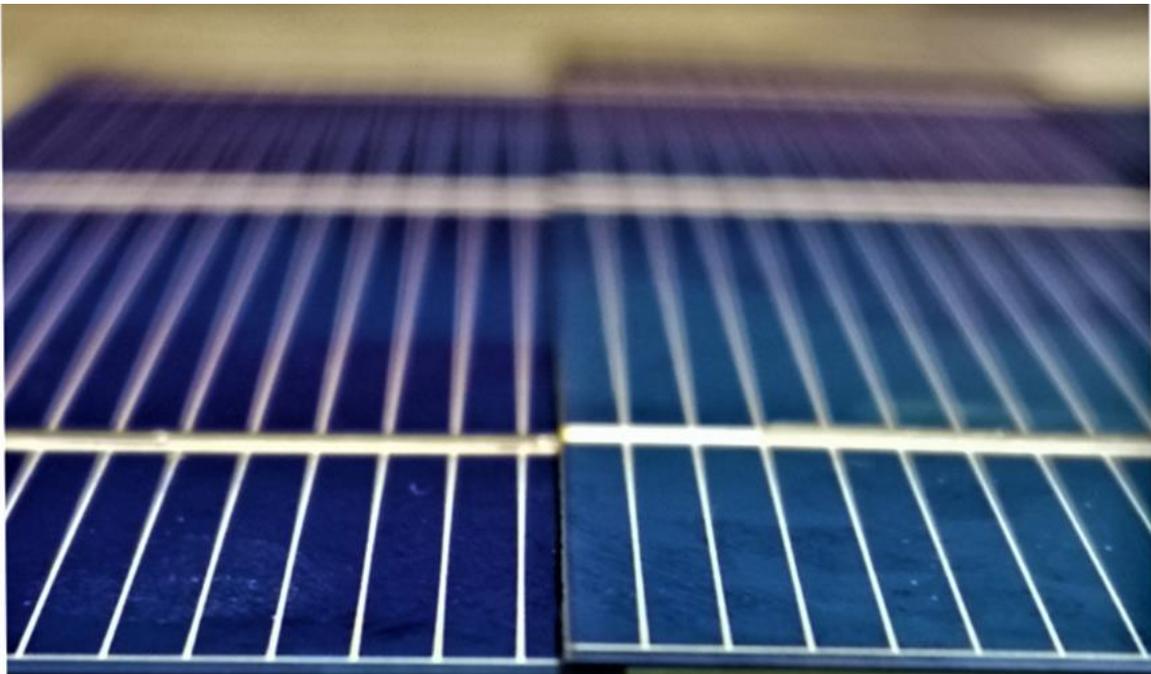




Schlussbericht vom 21.02.2023

AmBi PV II

Angepasste Module – Bifaziale Photovoltaik



Quelle: Roger Hiltbrand / ZHAW



Zürcher Hochschule
für Angewandte Wissenschaften



Datum: 21.02.2023

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW
Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering IEFE
Technikumstrasse 9, CH-8400 Winterthur
www.zhaw.ch/iefe

Autor/in:

Markus Klenk, ZHAW, SoE, IEFE, markus.klenk@zhaw.ch
Roger Hildebrand, ZHAW, SoE, IEFE, roger.hildebrand@zhaw.ch
Hartmut Nussbaumer, ZHAW, SoE, IEFE, hartmut.nussbaumer@zhaw.ch

BFE-Projektbegleitung:

Stefan Oberholzer, stefan.oberholzer@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502052-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Dieses BFE-Projekt ist Teil einer internationalen Zusammenarbeit im Rahmen des Solar-Era.net-Programms. Die Kernthemen sind drei Verschaltungstechnologien für bifaciale Zellen, ein neues drahtbasiertes Konzept für die Verschaltung von IBC-Rückkontaktzellen und zwei Shingling-Technologien für PERX-Zellen.

Der Schwerpunkt des nationalen BFE-Projekts liegt auf dem überlappenden Lötten von PERX-Zellen. Die anfänglich extreme Bruchrate nach dem Laminieren konnte sehr deutlich verbessert werden, so dass es nun möglich ist PV-Module ohne optisch oder im EL sichtbare Risse herzustellen. Die wesentlichen Änderungen, die zu einer deutlichen Verbesserung des Bruchverhaltens führten, waren die Einführung einer reduzierten Verbinderhöhe durch Verpressen des Bandmaterials im Übergangsbereich und vor allem die Einführung von Einbettungsmaterial im Überlappungsbereich. Durch die überlappende Lötung konnten Module mit guter elektrischer Leistung hergestellt werden. Auch in mechanischen Belastungstests erwies sich die Verbindung als robust.

Résumé

Ce projet de l'OFEN fait partie d'une collaboration internationale dans le cadre du programme Solar-Era.net. Les thèmes principaux sont trois technologies d'interconnexion pour les cellules bifaciales, un nouveau concept basé sur le fil pour l'interconnexion des cellules IBC à contact arrière et deux technologies de shingling pour les cellules PERX.

Le projet national de l'OFEN se concentre sur le brasage par chevauchement des cellules PERX. Le taux de rupture après laminage, initialement extrême, a pu être très nettement amélioré, de sorte qu'il est désormais possible de fabriquer des modules sans fissures visibles à l'œil nu ou à l'EL. Les principales modifications qui ont conduit à une nette amélioration du comportement à la rupture ont été l'introduction d'une hauteur de connecteur réduite par pressage du matériau en bande dans la zone de transition et surtout l'introduction de matériau d'enrobage dans la zone de chevauchement. La soudure par chevauchement a permis de fabriquer des modules présentant de bonnes performances électriques. La connexion s'est également révélée robuste lors des tests de charge mécanique.

Summary

This BFE project is part of an international cooperation within the Solar-Era.net program. The core topics are three interconnection technologies for bifacial cells; a new wire-based concept for the interconnection of IBC back-contact cells and two shingling technologies for PERX cells.

The focus of the national BFE project is on overlapping soldering of PERX cells. The initially extreme breakage rate after lamination could be improved very significantly, so that it is now possible to produce modules without cracks visible optically or in the EL. The main changes that achieved a significant improvement in breakage behaviour were the introduction of a reduced connector height by pressing the ribbon material in the transition area and, most importantly, the introduction of embedding material in the overlap area. With the overlapping soldering, modules with good electrical performance could be produced. The connection also proved to be robust in mechanical load tests.

This BFE project is part of an international cooperation within the Solar-Era.net program. The core topics are three interconnection technologies for bifacial cells; a new wire-based concept for the interconnection of IBC back-contact cells and two shingling technologies for PERX cells.



The focus of the national BFE project is on overlapping soldering of PERC cells. The initially extreme breakage rate after lamination could be improved very significantly, so that it is now possible to produce modules without cracks visible optically or in the EL. The main changes that achieved a significant improvement in breakage behaviour were the introduction of a reduced connector height by pressing the ribbon material in the transition area and, most importantly, the introduction of embedding material in the overlap area. With the overlapping soldering, modules with good electrical performance could be produced. The connection also proved to be robust in mechanical load tests.

Take-home messages

- Im europäischen Solar-Era.net- Projekt AmBi PV wurden mehrere Verschaltungstechnologien für moderne Solarzellentypen untersucht.
- Die zentralen Ziele der Projektpartner waren die Verschaltung von IBC-Rückkontaktzellen, das Schindeln mit leitfähigem Kleber, inklusive eines angepassten Zellendesigns, die Analyse von Materialeigenschaften (Polymere) im Modulbau und die Entwicklung eines thermischen Modells.
- Im Schweizer Teilprojekt lag der Schwerpunkt auf dem überlappenden Lötens. Die Herausforderungen konnten im Laufe des Projekts gelöst werden. Mit dieser Verschaltungstechnologie können leistungsfähige Module ohne Bruch hergestellt werden.
- Der sich fortsetzende Trend zu einer höheren Anzahl an Busbars mit kleineren Querschnitten, oder zu vergleichbaren Ansätzen wie beispielsweise SmartWire, ist vorteilhaft für eine Anwendung des überlappenden Lötens.



Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Zusammenfassung | 3 |
| Résumé | 3 |
| Summary | 3 |
| Take-home messages | 4 |
| Inhaltsverzeichnis | 5 |
| Abkürzungsverzeichnis | 6 |
| 1 Einleitung | 7 |
| 1.1 Ausgangslage und Hintergrund | 7 |
| 1.2 Motivation des Projektes | 7 |
| 1.3 Projektziele | 8 |
| 2 Vorgehen und Methode | 8 |
| 3 Ergebnisse und Diskussion | 9 |
| 3.1 Literaturrecherche und aktuelle Entwicklungen | 9 |
| 3.2 Experimentelle Arbeiten | 11 |
| 3.2.1 Optimierung der Verlötungstechnik | 12 |
| 3.2.2 Schädigung durch Versträngen oder beim Laminationsprozess | 14 |
| 3.2.3 Schnittkantenausrichtung | 15 |
| 3.2.4 Variation der Überlapptiefe | 15 |
| 3.2.5 «Mini-Gap» mit vorgebogenen Bändchen | 16 |
| 3.2.6 Zusätzliche Abstandshalter | 17 |
| 3.2.7 Verringerte Bändchenhöhe im Überlappbereich | 18 |
| 3.2.8 Aufbau: Glas/Glas; Glas/Backsheet | 19 |
| 3.2.9 Einbettmaterial im Überlappbereich | 21 |
| 3.2.10 Verwendung der besten Ansätze mit bifazialen Zellen des Projektpartners SolAround | 23 |
| 3.2.11 Grossmodul aus monofazialen Solarzellen inklusive «mechanical load»- Tests | 25 |
| 3.2.12 Bifaziale PERC-Zellen auf industrietauglichem Stringer (ISC Konstanz) | 30 |
| 3.2.13 Eigenschaften der bifazialen PERC-Minimodule (ISC Konstanz Stringer) | 38 |
| 3.2.14 Grossmodul mit bifazialen PERC-Zellen (ISC Konstanz Stringer) | 39 |
| 3.2.15 Meilensteine und Deliverables | 43 |
| 4 Schlussfolgerungen und Fazit | 45 |
| 5 Ausblick und zukünftige Umsetzung | 46 |
| 6 Nationale und internationale Zusammenarbeit | 47 |
| 7 Publikationen | 47 |
| 8 Literaturverzeichnis | 48 |



Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------------|--|
| Al-BSF | Aluminum Back Surface Field |
| BB | Busbars |
| CTM | Cell to Module |
| DH | Damp-Heat / Feuchte-Hitze |
| ECA | Electrically conductive adhesives / leitfähige Kleber |
| EL | Elektrolumineszenz |
| EVA | Ethylenvinylacetat |
| GfK | Glasfaserverstärkter Kunststoff |
| HJT | Hetero Junction Technology |
| IBC | Interdigitated back contact / ineinandergreifende Rückkontakte |
| ISC Konstanz | International Solar Research Center, Konstanz |
| ISFH | Institut für Solarenergieforschung Hameln |
| PCCL | Polymer Competence Center Leoben |
| PERX | Passivated Emitter and Rear; (X für versch. Passivierungstechnologien) |
| POE | Polyolefin |
| TRL | Technology Readiness Level |
| W-HS | Westfälische Hochschule |
| ZHAW | Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften |



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Der höhere Strom in bifazialen Modulen führt zu grösseren ohmschen Leistungsverlusten, die durch fortschrittliche Verschaltungstechniken wie Schindelung, Halbzellen oder kombinierte Ansätze angegangen werden können. In diesem Projekt werden drei Verschaltungstechniken untersucht, sowie daran angepasste Zell-/Modulmaterialien und Layouts optimiert. Es handelt sich bei den Ansätzen um ein neues, drahtbasiertes Konzept für die Verschaltung von bifazialen IBC-Zellen (Interdigitated Back Contact) und zwei Techniken mit überlappenden Zellenbereichen (Schindeln) für PERX-Zellen. Ziel des Teilprojekts zur IBC-Verschaltung ist es, die Machbarkeit zu demonstrieren und die Eigenschaften dieses innovativen drahtbasierten Konzepts aufzuzeigen, das ein Hauptproblem von IBC-Zellen lösen könnte. Für bifaziale PERX-Zellen, Zellen mit Busbars auf der Vorder- und Rückseite wie bei den bisherigen Standardzellen, werden zwei Schindeltechniken untersucht. Zum einen Schindeln basierend auf elektrisch leitfähigen Klebstoffen (ECA) und zum anderen Schindeln mit überlappendem Verlöten.

Jeder der Ansätze hat spezifische Herausforderungen, die nicht nur mit dem Verschaltungsprozess an sich, sondern auch mit dem jeweiligen Modul- und Zelldesign zu tun haben. Während das für die Verschaltung der IBC-Zellen offensichtlich ist, gilt dies auch für Module mit geschindelten Zellen. Die mechanische Beanspruchung durch z.B. Biegung des Laminats wirkt sich auf die Verschaltung von geschindelten Zellen anders aus als bei den nur rückseitig mit Drähten verbundenen IBC-Zellen oder auch Standardmodulen. Unterschiedliche Herausforderungen ergeben sich auch bei der Anwendung der Ansätze zur Verschaltung, so ist die mechanische Beanspruchung bei der Lamination einer Matrix, welche durch überlappendes Lötens hergestellt wurde, offensichtlich.

Die materialbezogenen Aufgaben werden vom PCCL, einem renommierten Institut auf diesem Gebiet, geleitet. Die Projektpartner ZHAW, ISC Konstanz und das W-HS führen die Aufgaben aus, die sich auf die strukturellen und elektrischen Eigenschaften beziehen (Probenvorbereitung, Prüfung, Messung, Simulation und Entwicklung eines thermischen Modells).

Im Schweizer Teilprojekt wird überwiegend das Schindeln in Form des überlappenden Lötens bearbeitet, weswegen sich dieser Bericht auf dieses Thema fokussiert. Ein übergreifender transnationaler Report wird parallel zur Erstellung dieses Berichts zusammengestellt.

1.2 Motivation des Projektes

Das überlappende Lötens wurde im Laufe der letzten Jahre von mehreren chinesischen Tier-1-Herstellern in verschiedenen Versionen, die sich im Detail unterscheiden, eingeführt. Es basiert auf konventionellem Lötens mit «Ribbons», also den typischen Lötbändchen welche bei der Versträngung von Standardmodulen eingesetzt werden, jedoch mit «negativem Spalt». Die Überlappung führt aufgrund des Zellenüberlapps und der Bändchen zu lokal hervorstehenden Bereichen der gelöteten Zellmatrix. Infolgedessen sind mechanische Belastungen durch die hervorstehenden Bereiche, aber auch durch den direkten Kontakt der empfindlichen Zellenkanten, offensichtlich.

Über diese Technik ist über das Grundkonzept hinaus nicht viel bekannt, es gibt nur wenige Informationen und fast keine wissenschaftlichen Publikationen. Da diese Technik, aufgrund der Markteinführung bei grossen Herstellern, offensichtlich effektiv, aber augenscheinlich sehr bruchgefährdend ist, sind angepasste Prozesse, Materialien und Modul-Layouts von grosser Bedeutung. Im Schweizer Teilprojekt sollen die wesentlichen Herausforderungen bei diesem Ansatz adressiert werden, um potenzielle Lösungen zu finden und zu evaluieren, sowie um die Eigenschaften



entsprechender Verbindungen zu untersuchen. Die Ergebnisse können sowohl mit den klassischen Ansätzen zur Zellverbindung wie auch mit alternativen Ansätzen verglichen werden.

1.3 Projektziele

Der Schweizer Anteil im Projekt ist auf das Schindeln mit überlappendem Lötten fokussiert. Die Ziele dieses Ansatzes sind, die Herausforderungen anzugehen, die sich aus der Verwendung moderner Zellen- und Modullayouts ergeben. Dies sind insbesondere die in etwa verdoppelte Anzahl von Zellenzwischenräumen bei Verwendung von Halbzellen, sowie die Verringerung von Serienwiderstandsverlusten. Durch den Überlapp werden die Zellenzwischenräume eliminiert und somit eine höhere Leistungsdichte pro Modul erreicht. Die ohmschen Verluste sind bei Verwendung von Halbzellen aufgrund der kleineren Ströme reduziert, der Überlapp verspricht zudem geringere Serienwiderstandsverluste. Trotz der mechanischen und produktionstechnischen Herausforderung zielt der Ansatz der Verwendung von hocheffizienten Halbzellen mit überlappendem Lötten daher ein Modul mit hoher Leistungsdichte und höherer Leistung. Während die Verwendung von Halbzellen auch bei konventionell aufgebauten Modulen mit Hochleistungssolarzellen angewandt wird, liegt der Fokus dieser Arbeit auf dem überlappenden Lötten. Die angestrebten, geringeren Serienwiderstandsverluste sollten sich über einen höheren Füllfaktor positiv auf die Modulleistung auswirken. Dies bedeutet insbesondere auch, dass sich der Verlust an Leistung zwischen Zellen- und Modulleistung («CTM-loss» ; «cell to module loss») verringert.

In diesem Projekt sollen mit Modulen, welche durch überlappendes Lötten hergestellt werden, CTM-Verluste von < 3 % erreicht werden.

2 Vorgehen und Methode

In diesem Bericht wird hinsichtlich der durchgeführten Arbeiten primär auf die Aktivitäten im Hinblick auf den Punkt 3), das «überlappende Lötten» eingegangen, da dieses Thema überwiegend an der ZHAW bearbeitet wurde. Im Abschnitt «Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse» werden die gewonnenen Ergebnisse dargestellt. Die Inhalte werden dabei in drei Segmente gegliedert

- Literaturrecherche und aktuelle Entwicklungen
- Experimentelle Arbeiten
- Deliverables und Meilensteine

Beim Abschnitt Literaturrecherche und aktuelle Entwicklungen wird insbesondere auf neue Informationen zum überlappenden Lötten berichtet, die im Berichtszeitraum veröffentlicht wurden.



3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Literaturrecherche und aktuelle Entwicklungen

Grundprinzip des Verstringens mit Überlapp

Die bereits im Vorfeld des Projekts begonnene Recherche zur Technologie des Lötens mit Überlapp wurde vertieft. Es gibt nur sehr wenige wissenschaftlichen Veröffentlichungen zum Thema [1], man kann jedoch versuchen die Techniken anhand entsprechender Broschüren und Magazinartikel nachzuvollziehen [2] [3]. Im Prinzip kann man sagen, dass entsprechende Ansätze in verschiedenen Formen von grossen chinesischen Herstellern wie Jinko [2], Longi [4] [5] [6], Trina und Jolywood [7] seit 2019 auf den Markt gebracht oder zumindest beworben werden. (Anmerkung: Zumindest Longi und Trina sind vom Ansatz inzwischen wieder abgekommen, siehe weiter unten).

Die technischen Ansätze unterscheiden sich im Detail von Hersteller zu Hersteller. Eine gewisse Komplikation ergibt sich zudem aus den Benennungen, da verschiedene Bezeichnungen für diese Verbindungstechnik geprägt wurden. Während Jinko von «Tiling-Ribbon» [6] oder Trina von «Tiling» [8] spricht, bezeichnen andere Hersteller ihre Techniken beispielsweise als «Paving» (Jolywood, LG) oder «seamless soldering» (Longi). In einer wissenschaftlichen Veröffentlichung zum Thema wird dagegen der Begriff «Interconnect-Shingling» benutzt [1]. Um Verwirrung zu vermeiden, wird in diesem Bericht der Begriff «überlappendes Löten» bevorzugt. Da entsprechende Ansätze im Berichtszeitraum experimentell untersucht wurden, wird teilweise deren Beschreibung weiter unten in den jeweiligen Abschnitten vorgenommen. Wegen allfälliger Wiederholungen erfolgt an dieser Stelle keine nähere Beschreibung.

Allen Ansätzen gemeinsam ist, dass im Gegensatz zum ECA-Shingling kein leitfähiger Kleber im Überlappbereich zum Einsatz kommt, sondern ein dem Standard-Verstringen mit Bändchen (Ribbons) sehr ähnlicher Aufbau vorliegt. Wesentlicher Unterschied ist das Fehlen des Zwischenraumes von einer Zelle zur anderen, der früher bei etwa 4 mm und in Standardmodulen heute typischerweise ca. 2-3 mm beträgt. Insbesondere bei Halbzellenmodulen wird somit ungenutzte Modulfläche erzeugt, was den Modulwirkungsgrad senkt. Beim Schindeln gibt es nun keinen Abstand, sondern eine Überlappung («Negative Gap) der Zellkanten. Das Prinzip ist hier nochmal anhand einer frühen Darstellung des Herstellers Longi dargestellt.

Bild entfernt (copyright)

K. Pickerel, „LONGi Solar jumps on ‚tiling‘ module train with new seamless soldering technology“, *Solar Power World*, 31. Mai 2019.
<https://www.solarpowerworldonline.com/2019/05/longi-solar-jumps-on-shingled-module-train-with-new-seamless-soldering-technology/> (zugegriffen 20. Oktober 2021).

Abb 1.: Schindeltechnik («Seamless Soldering») wie von Longi ursprünglich beschrieben, mit tatsächlichen Überlapp [5]



Das Verfahren ist somit ähnlich zum wesentlich bekannteren und deutlich länger bearbeiteten Shingling mit leitfähigem Kleber («electrical conductive adhesive» - ECA) [9], das ebenfalls in diesem Projekt untersucht wird. Beim ECA-Shingling wird jedoch im Überlappbereich leitfähige Paste aufgebracht, um die Zellen elektrisch zu verbinden, wobei jeweils eine Front- auf eine Rückseite mit unterschiedlicher elektrischer Polarität trifft. Das Schindeln mit leitfähigem Kleber wird seit vielen Jahren von zahlreichen Gruppen und Herstellern wegen der potenziellen Vorteile gegenüber der Standardtechnologie bearbeitet und trotz einiger Herausforderungen auch vermehrt in industriellen Modulen beworben. Dennoch könnte auch der Ansatz des überlappenden Lötens gegenüber dem «ECA-Shingling» vorteilhaft sein. Ein wichtiger Vorteil ist der geringere Silberverbrauch, weil gerade auch der ECA-Kleber einen hohen Silbergehalt aufweist. Zudem werden im Gegensatz zum Einsatz von ECA nur eingeführte Prozesse angewandt. Gegenüber dem standardmässigen Versträngen kann aus der Methode eine verbesserte mechanische Stabilität resultieren, wenn die strukturellen Herausforderungen der Überlappung gelöst werden. In diesem Fall entfällt ein als kritisch bekannter Bereich bei Standardmodulen, nämlich die Bändchen im Bereich des Zellenzwischenraums.

Aktuelle Entwicklungen beim überlappenden Löten

Die Anzahl von Anbietern geschindelter Module und entsprechender Lösungen nahm im Projektzeitraum stark zu, wobei dies überwiegend ECA-Shingling mit leitfähigem Kleber betrifft. Dabei finden sich auch nicht-chinesische Hersteller wie Solaria, Recom, oder Hyundai. Die Firma M10 entwickelte zusammen mit dem Fraunhofer ISE einen «Shingling-Stringer» [10]. Das Fraunhofer ISE arbeitet darüber hinaus an einem ähnlichen, neuen Verbindungsverfahren («FoilMet®-Interconnect»), bei welchem die Verbindung über eine Metallfolie gewährleistet wird, welche durch Bonding mit den Zellen verbunden wird.

Während das Interesse am Shingling mit leitfähigem Kleber stark zunimmt, finden sich für das überlappende Löten deutlich weniger Meldungen. Neu können Jolywood und LG genannt werden. Jolywood mit der Ankündigung der Produktion seines bifazialen Moduls mit Paving-Technik in Indonesien [11] und LG mit einer entsprechenden Ankündigung für Korea [12]. Auch die Meyer Burger AG ist auf dem Gebiet aktiv [13], wobei durch die speziellen Gegebenheiten der Verschaltung in diesem Fall im Detail wiederum andere Voraussetzungen vorliegen, als beim hier ansonsten beschriebenen Löten mit Überlapp.

Der Trend hin zu zahlreicheren und dünneren Zellverbindern ist prinzipiell günstig für den Ansatz des überlappenden Lötens. Er ist jedoch auch vorteilhaft, um einen anderen Ansatz zu realisieren, der ebenfalls auf die Verringerung der Zellenabstände abzielt und einfach darin besteht diese zu minimieren. Bei früheren Modullayouts mit zwei oder drei Busbars waren die einzelnen Verbinder vergleichsweise steif. Dies verursachte bei der Modulherstellung, aber auch thermomechanischer Belastung, an den Zellenkanten häufig Bruch, was teilweise zur Verwendung von eingepprägten Stufen («Sicken») im Zellenzwischenraum führte. Zahlreichere und dafür dünnere Verbinder reduzieren die lokal einwirkenden Kräfte. Tatsächlich scheint dieser Ansatz eine effektive Alternative zum überlappenden Löten darzustellen, da Modulhersteller meldeten vom überlappenden Löten abzurücken und auf Modullayouts mit «Micro-Gap» zu wechseln.

So hat Longi ursprünglich in Broschüren den eigenen Ansatz in Form eines Verschaltens von Halbzellen mit tatsächlichem Überlapp als «Seamless Soldering»-Technologie veröffentlicht [4] [5]. Später jedoch wird die beim «Hi-Mo X Modul» angewandte Technik von Longi in anderer Form, mit «Micro-Gap» statt eines Überlapps unter dem Namen «Smart Soldering», gezeigt [14] (siehe auch Abbildung 6). Longi setzt dabei zudem einen strukturierten Verbinder ein, um die Lichteinkopplung zu verbessern. Über die Gründe von dem bereits publizierten Verfahren abzuweichen, wurde von Longi nichts genannt.



Als weiterer grosser Tier1 Hersteller hat Trina veröffentlicht, das angekündigte überlappende Lötten bei seinem «Vertex»-Modul nicht anzuwenden und stattdessen ebenfalls einen «Micro-Gap»-Ansatz umzusetzen [8]. Im Gegensatz zu Longi wurde als Begründung genannt, dass:

Zitat: «...previous spacing of 2 mm between cells has been reduced to 0.5mm – have also been implemented throughout the product range. This has been achieved by moving away from the manufacturer's previous tiling approach to a slightly more traditional ribbon-based interconnect. Zhang said that while Trina still believes tiling will have a future in the industry, it did prompt some concerns with regards the balance of cell and module efficiency against manufacturing yield. Without any gap between the cells, Zhang said Trina's analysis found output losses far outweighed any benefit created within the manufacturing yield. "The technology is a good idea but it's not cost effective right now," he said.» [8]

Die zitierte Aussage beschreibt recht deutlich, dass sich die mechanischen Herausforderungen beim überlappenden Lötten offensichtlich in einer höheren Bruch- bzw. Ausschussquote widerspiegeln. Durch die Option sehr kleiner Zellenzwischenräume («Micro-Gap») statt überlappendem Lötten wird die höhere Leistungsdichte durch Verringerung der Zellenabstände annähernd erreicht, sie bietet jedoch nicht den Vorteil potenziell geringerer Serienwiderstände.

3.2 Experimentelle Arbeiten

Zum Projektbeginn fand ein Meeting zum Zellenlayout mit den Projektpartnern PCCL, ISC Konstanz, H-WS und SolAround statt. Dabei wurden die physikalischen und technischen Hintergründe durchgesprochen, welche bei der jeweiligen Verschaltungstechnologie relevant sein werden. Dabei standen die Schindelansätze im Vordergrund, da das drahtbasierte Verschalten der IBC-Zellen beim Projektpartner ISC-Konstanz liegt.

Bei den Schindeltechniken wurden insbesondere Zellen-Layoutvorgaben für das ECA-Shingling diskutiert und beschlossen, da hier die Herstellung von Solarzellen mit geeigneten Kontaktbereichen / geeigneter Metallisierung am Überlapp zwingend notwendig sind, um eine Klebefläche zu erhalten.

Im Fall der mit Überlapp verlöteten PERX-Zellen wurden keine wesentlichen Gründe gefunden, welche ein spezielles Zellenlayout erfordern würden. Für die Versuche zu Beginn konnten somit auch Dummy-Zellen eingesetzt werden, welche vorrätig zur Verfügung standen und direkt verarbeitet werden konnten.

Die Versuche wurden insbesondere zu Beginn auf einem älteren Halbautomaten zur Versträngung (Meyer-Burger AG) durchgeführt. Dieser Halbautomat basiert auf dem früher üblichen Kontaktlöten mit einzelnen Lötköpfen. Heutzutage werden vermehrt Lötautomaten eingesetzt welche kontaktlos, zumeist in Form von IR-Strahlung, die zur Lötung notwendige Wärme einbringen. Durch das Ausbleiben des mechanischen Drucks durch die Lötköpfe wird die Belastung deutlich reduziert. Zudem werden heute standardmässig mehr Busbars eingesetzt, was die Dicke der einzelnen Verbinder reduziert. Auf einen industrietauglichen «state-of-the-art» Stringer konnten wir beim Projektpartner ISC Konstanz zugreifen. Dies war allerdings aus mehrererlei Gründen erst ganz am Ende der Projektlaufdauer möglich, insbesondere auch, weil die Einrichtung des Stringers auf neue Zellen allgemein, wie auch auf das Lötten mit Überlapp, zeitaufwändig ist.

Zunächst wurden daher die prinzipiellen Eigenschaften der Herstellung und der Zellverbindung mit Überlapp untersucht. Dabei wurden überwiegend monofaziale Dummy-Zellen mit zumeist drei Busbars eingesetzt, um den vorhandenen halbautomatischen Stringer einsetzen zu können. Hieraus ergaben sich «erschwerte Bedingungen» beim Kontaktlöten, aber auch im Hinblick auf Schädigungen im Überlappbereich durch insbesondere die wenigen Ribbons mit grossem Querschnitt. Nach und nach wurden im Berichtszeitraum experimentell mehrere Ansätze getestet, um die Bruchneigung zu verringern, auf welche im Folgenden eingegangen wird.



Experimentelle Ansätze, um die Bruchneigung zu verringern

- Optimierung der Verlötungstechnik
- Untersuchung: Schädigung durch Versträngen oder beim Laminationsprozess
- Schnittkantenausrichtung
- Variation der Überlapptiefe
- «Mini-gap» mit vorgebogenen Bändchen
- Zusätzliche Abstandshalter
- Verringerte Bändchenhöhe im Überlappbereich
- Aufbau: Glas/Glas; Glas/Backsheet
- Verwendung gemischter Einbettmaterialien
- Verwendung der besten Ansätze mit bifacialen PERX-Zellen
- Verwendung der besten Ansätze mit bifacialen PERX-Zellen auf «state-of-the-art» Stringer

3.2.1 Optimierung der Verlötungstechnik

Die Herausforderung beim Löten mit Überlapp im Hinblick auf die strukturellen Eigenschaften ist offensichtlich. Im Überlappbereich der Zellenkanten treffen lokale Erhöhungen in Form von Lötbändchen auf die Zellenkanten. Diese sind ohnehin empfindlich und wurden durch den Laserprozess bei Einsatz der üblichen Halbzellen weiter geschädigt, wodurch sich Zentren für den Kerbeffekt ausbilden können. Mechanische Belastungen treten sowohl beim Lötprozess wie im Anschluss in Form thermomechanischen Spannungen bei der Abkühlung auf. Zusätzliche Belastungen treten beim Laminieren auf, wobei die grössten Belastungen erneut im Bereich der lokalen Erhebungen wirken.

Wie im ersten Bericht beschrieben wurden die Versuche zunächst an Dummies ausgeführt. Obwohl später Halbzellen zum Einsatz kommen werden wurden bewusst auch schmalere Streifen gelasert, um mehr potenzielle Bruchzentren und dadurch eine bessere Statistik bei geringer Anzahl Laminationen zu bekommen.

Die Versuche zur Optimierung der Löttechnik zogen sich länger als geplant hin. Ein wesentlicher Grund war die Verwendung des zur Verfügung stehenden halbautomatischen Laborstringers auf der Basis des Kontaktlötens.

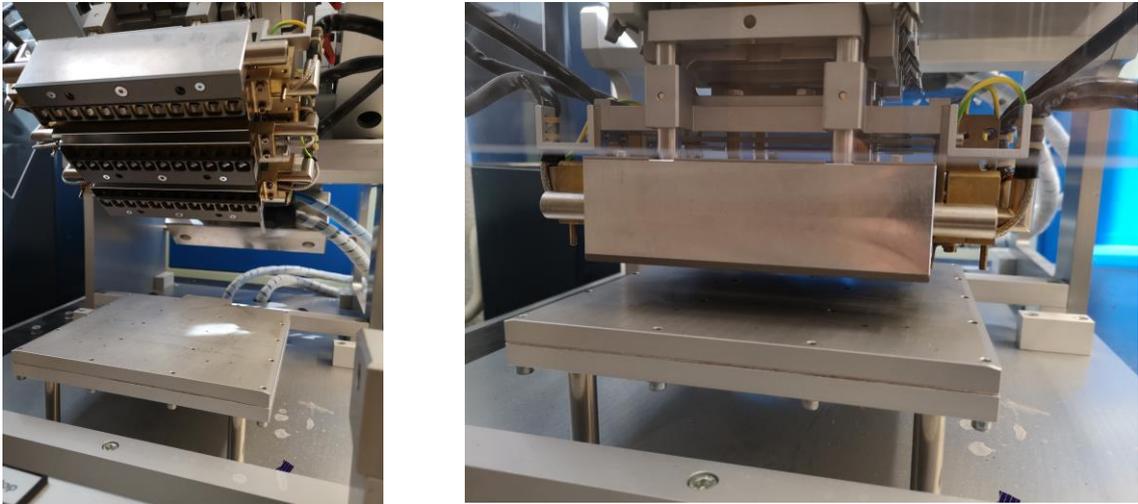


Abb.2: Halbautomatischer Stringer mit Lötköpfen zur Kontaktlötlung. Beim Lötprozess senkt sich der obere Block mit den federnd aufgehängten Lötköpfen ab, wobei die Lötköpfe mechanischen Druck auf die Zellverbinder ausüben.

Die Versuchsreihen zum Bruchverhalten beim Löten waren zeitaufwändig und führten langsam zu einer Verbesserung der Bruchrate. Die Brüche traten zunächst überwiegend auf einer Seite auf und entstanden aufgrund der mechanischen Belastung durch die Lötköpfe in Bereichen mit Überlapp. Eine graduelle Verbesserung konnte durch Justage erreicht werden.



Abb.3: Die Brüche traten zunächst überwiegend auf einer Seite auf und entstanden aufgrund der mechanischen Belastung durch die Lötköpfe in Bereichen mit Überlapp.

Durch optimierte Justage konnte die Bruchneigung schliesslich deutlich gesenkt werden, wobei eine totale Bruchfreiheit in mehreren hintereinander folgenden Versuchen nicht erreicht wurde, wenn man auf EL-Bildern sichtbare Mikrorisse mit einbezieht. Durch die Elektrolumineszenz ist eine wesentlich höhere Empfindlichkeit bei der Detektion mechanischer Schädigungen als bei der Sichtprüfung möglich. Eine quantitative Bewertung des Bruchverhaltens, bzw. eine Zuordnung zum schädigenden Prozess wird jedoch dadurch erschwert, dass diese Schädigungen auch erst nach dem Löten beim Laminationsprozess entstehen können.



3.2.2 Schädigung durch Verstringen oder beim Laminationsprozess

Durch EL-Aufnahmen können Mikrorisse sichtbar gemacht werden, welche ansonsten unerkannt bleiben würden. Dies ist insbesondere bei laminierten Zellen möglich, bei welchen ein Verschieben von losen Bruchteilen und somit die Entstehung eines sichtbaren Spalts, durch die Fixierung im Einbettmaterial verhindert wird.

Um die Schädigung beim Verstringen von jener beim Laminieren unterscheiden zu können wurde auch auf manuelles Löten zurückgegriffen. Dieses vermeidet Spannungen in der Zelle zwar nicht völlig, weil sich die Bändchen beim Erkalten zusammenziehen und in der Folge eine deutliche sichtbare Wölbung der Zelle entsteht. Werden zunächst alle Bändchen auf einer Seite aufgelötet, dann können sich starke Spannungen an den Zellenkanten ergeben. Beim Verstringen im Automaten wird dieser Effekt dadurch abgeschwächt, dass beide Bändchen auf Vorder- und Rückseite der Zelle simultan gelötet werden, wodurch sich die Spannungen in etwa ausgleichen. Dies kann jedoch beim manuellen Löten auch durch jeweils abwechselndes Löten einzelner Bändchen jeweils abwechselnd auf der Vorder- und Rückseite annähernd erreicht werden. In der Folge ist es mit einiger Übung möglich die Zellen manuell fast vollständig ohne Bruch zu verlöten.

Bei späteren Versuchen wurde eingeführt, dass die Zellen jeweils nicht nur nach dem Laminieren, sondern auch bereits nach dem Verstringen mittels EL analysiert wurden, um eine bessere Zuordnung zum Prozess zu erhalten, der ursächlich zum Bruch führte. Schädigungen an den Zellenkanten im Überlappbereich sind typisch für mechanische Beanspruchung beim Laminieren, aber auch für das einseitige manuelle Löten aller Bändchen auf zunächst nur einer Seite. Beim Laminieren werden zuvor bestehende Mikrorisse verstärkt.

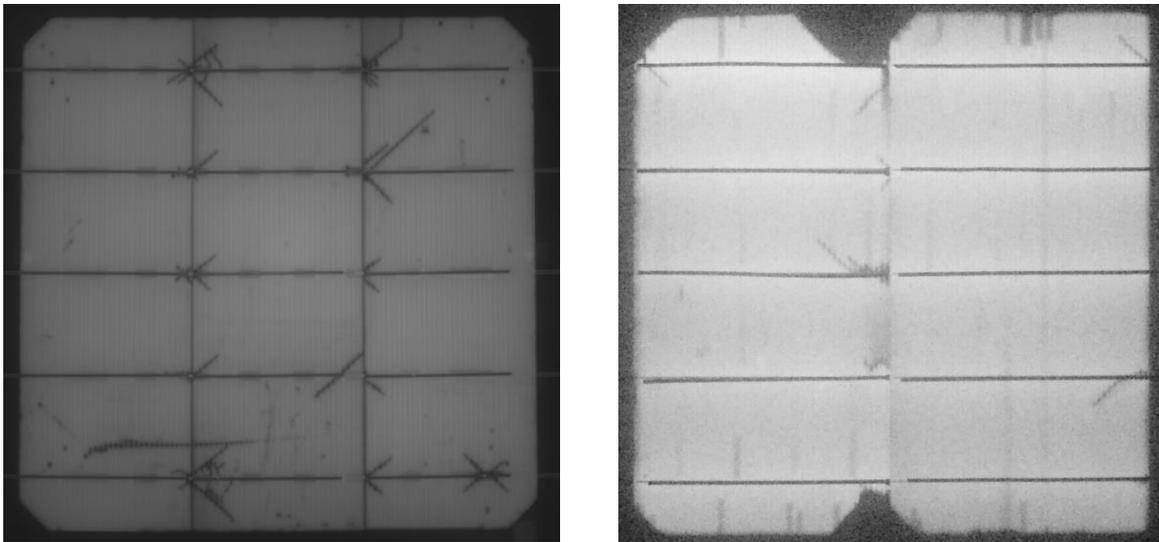


Abb.4: EL-Aufnahmen von einlaminierten Solarzellen in verschiedenen Projektphasen. Links ein extremes Beispiel von Bruchlinien, welche an den Waferkanten von den Busbars ausgehen. Die Brüche verlaufen wegen der monokristallinen Kristallstruktur gerade. Rechts: Die dunklen Stellen zeigen von den Busbars abgetrennte Splitter an, die elektrisch nicht mehr aktiv sind.



3.2.3 Schnittkantenausrichtung

Es ist naheliegend davon auszugehen, dass gelaserte und somit geschädigte Zellenkanten im Überlappbereich nochmals verstärkt bruchempfindlich sind. Dies ist auch tatsächlich der Fall, wobei der Effekt insbesondere bei starken Belastungen unter nicht-optimierten Bedingungen auftritt, siehe z.B. obige Abbildung links. Unter optimierten Bedingungen ist der Einfluss der Zellenkantenausrichtung kaum merklich. Eine Orientierung ist auch nicht sinnvoll, da längere Strings angestrebt werden. Daher wurde im Folgenden zumeist die ursprüngliche Ausrichtung angewandt.

3.2.4 Variation der Überlapptiefe

Im Hinblick auf eine optimale Ausnutzung der aktiven Zellenfläche wäre beim überlappenden Versträngen ein «Zero Gap» optimal, wodurch einerseits keine zusätzlich notwendige Modulfläche und andererseits keine unnötige Abschattung erzeugt wird. Ein exaktes Aneinanderstossen der Waferkanten ist jedoch schwierig zu bewerkstelligen und kann zu ungleich verteilten Belastungen an der Waferkante führen. Somit wird bewusst eine kleiner Überlapp vorgesehen.

Dennoch wurde untersucht, ob sich das Bruchverhalten bei Lamination ändert, wenn der Überlapp bewusst vergrößert wird. Die sonst angestrebte Überlappungstiefe von ca. 1 mm wurde dabei auf 2 mm, 4 mm und 6 mm erhöht.

Wie auch bei den anderen Ansätzen beschrieben ist eine quantitative Auswertung der Effekte schwierig. Es wurden jedoch auch bei extremem Überlapp von 6 mm bei Dummy-Zellen Mikrorisse nach der Lamination beobachtet, wobei anzumerken ist, dass die Brüche in diesen Fällen nur auf der oberen Zelle detektiert wurden. Eine deutliche Verringerung der Bruchneigung war nicht zu beobachten.

Insgesamt war die Untersuchung dieses Ansatzes, wie auch die Variation der Ausrichtung, eher von grundlegendem Interesse, da ein grosser Überlapp im Hinblick auf die Abschattung nicht angestrebt wird.

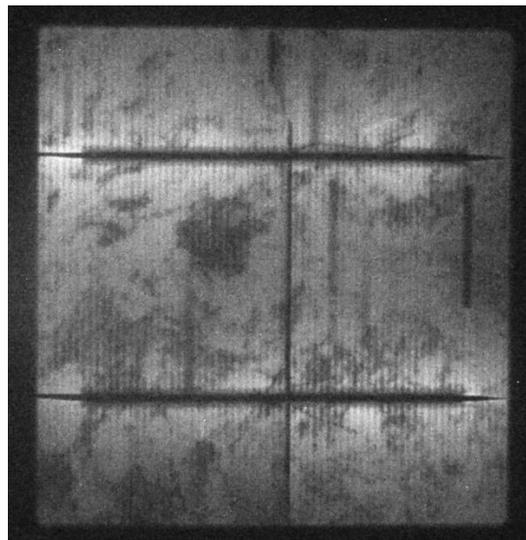


Abb.5: Multikristalline Zelle mit bewusst gewähltem extremen Überlappungsbereich von 6 mm. Durch grösseren Überlapp wird die Bruchneigung nicht signifikant verringert. In der Abbildung sind Mikrorisse an den Waferkanten, ausgehend von den Enden der Busbars, erkennbar. Durch die multikristalline Struktur sind die Risse weniger augenfällig.



3.2.5 «Mini-Gap» mit vorgebogenen Bändchen

Wie an anderer Stelle in diesem Bericht beschrieben ist beim Internetauftritt von Longi, als einer der frühen und führenden Hersteller, welche das überlappende Löten eingeführt hatten, immer noch die innovative Verschaltung aufgeführt. Dabei wird jedoch nicht mehr wie in früheren Darstellungen [15] explizit das Schindeln durch überlappendes Löten erwähnt. Stattdessen findet sich die Einführung eines «Micro-Gap», mit wesentlich geringeren Zellenabständen als dies bei Standardmodulen der Fall ist, aber ohne tatsächlichen Überlapp.

Bild entfernt (copyright);

M. Osborne, „LONGi Solar's Hi-MO 5 Series module offers gallium-doped wafers and 'Smart Soldering' for 540Wp“, *PV Tech*, 29. Juni 2020. <https://www.pv-tech.org/longi-solars-hi-mo-5-series-module-offers-gallium-doped-wafers-and-smart-so/> (zugegriffen 20. Oktober 2021).

Abb.6: Spätere Beschreibung der «Smart Soldering»-Technik von Longi, wobei nun ein «Micro-Gap» ohne tatsächlichen Überlapp hergestellt wird [14].

Abstände zwischen den Zellen bei Standardmodulen lagen früher im Bereich von ca. 4 mm, während heute 3 – 2 mm üblich sind. Der Grund für die Abstände sind unter anderem Pufferzonen im Modul, um thermomechanische Spannungen auf die Zellverbinder abzufangen und auf längere Bändchenelemente zu verteilen. Schon lange wurde die Diskussion geführt, ob Bändchen besser vorgeprägte Stufen («Sicken») haben sollten, um die Belastung auf die Zellen geringer zu halten, oder ob die Sicken eher kontraproduktiv sind, weil die Verformung zu potenziellen Bruchstellen führt. Es gab hierzu nie eine eindeutige Antwort, da beide Argumente für sich ihre Berechtigung hatten. Heute verlieren entsprechende Überlegungen zunehmend an Bedeutung, weil die Anzahl der Busbars zunimmt und somit die Querschnitte und Biege radien abnehmen, was zu geringerer Bruchneigung bei Biegung führt. Dennoch verschärft sich das Problem andererseits, wenn die Abstände minimiert werden und somit kleinere Biegeradien und geringe Bändchenlängen vorliegen.

Longi setzt dabei ein «Integrated Segmented Ribbon» ein. Die Terme «Integrated» und «Segmented» deuten dabei an, dass es sich nicht einfach um ein Bändchen mit durchgehend gleichem Querschnitt handelt, sondern eine vorgefertigte Struktur aufweist, welche insbesondere in den beiden Hälften eine jeweils entgegengesetzt ausgerichtete dreieckige Struktur aufweist [6], um nach der Lötung die Lichteinkopplung zu verbessern.

Bei den im Projekt vorgesehenen Zellen mit vier und fünf Busbars sind die Querschnitte und Biegeradien der Bändchen anders als bei wirklichen «Multi-Busbar» Zellen. Der Ansatz von Longi lässt sich somit prinzipiell nicht direkt übertragen. Dennoch wurden Versuche mit den zur Verfügung stehenden Bändchen durchgeführt, in welche zudem eine Stufe (Sicke) eingepreßt wurde. Die Verlötung wurde dabei manuell mit minimal möglichen Abständen durchgeführt. Wie sich zeigte ist der Ansatz mit dem gegebenen Bändchenquerschnitt nicht sinnvoll, da schon die geringste Belastung zu einem Ausbruch an der Waferkante führt. Da das eigentliche Ziel ein wirklicher Überlapp ist, wurden nur eine begrenzte Anzahl von Versuchen durchgeführt. Eine Variante wäre eine erneute Auflage der Serie mit im Zwischenbereich verformten Verbindern, wie sie weiter unten vorgestellt werden.

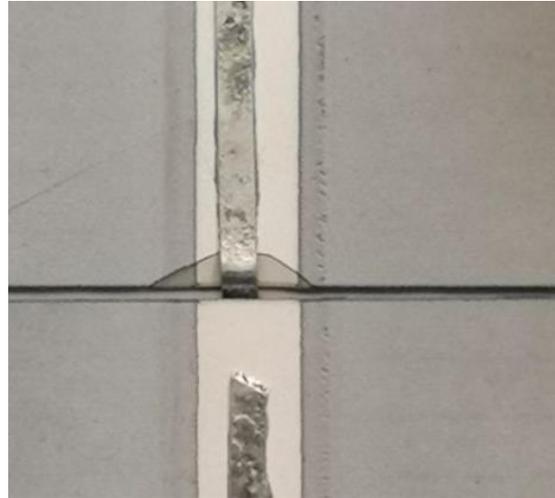
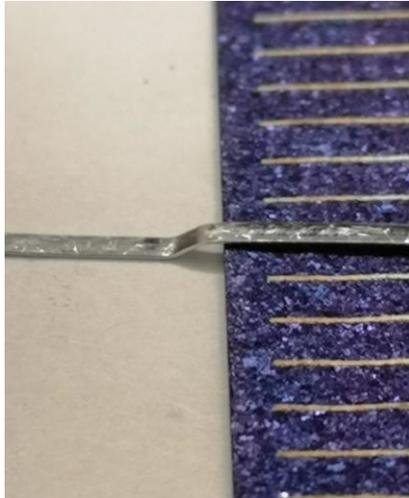


Abb.7: Versuche wurden mit den zur Verfügung stehenden Bändchen durchgeführt, in welche zudem eine Stufe (Sicke) eingeprägt wurde. Die Verlotung wurde dabei manuell mit minimal möglichen Abständen durchgeführt. Wie sich zeigte ist der Ansatz mit dem gegebenen Bändchenquerschnitt nicht sinnvoll, da schon die geringste Belastung zu einem Ausbruch an der Waferkante führt.

3.2.6 Zusätzliche Abstandshalter

Eine wesentliche Schwachstelle und potenzielle Bruchursache ist die lokale Auflage auf den Bändchen im Überlappbereich. Durch Druck auf den Zellenverbund werden die Waferkanten um die Bändchen herumgebogen und es entsteht Bruch an den Auflagepunkten, meist ausgehend von den empfindlichen Waferkanten (Kerbwirkung).

Ein Gedanke die Bruchempfindlichkeit zu senken war das Einbringen zusätzlicher Bändchenstücke in den Überlappbereich, um einerseits den Druck besser zu verteilen und andererseits die Hebelwirkung von Zellkantenbereichen ausserhalb der Bändchen zu verringern.

Mehrere Versuche mit unterschiedlicher Anzahl an eingeschobenen Bändchenstücken wurden unternommen. Die Bruchneigung wurde dadurch nicht erkennbar verringert.

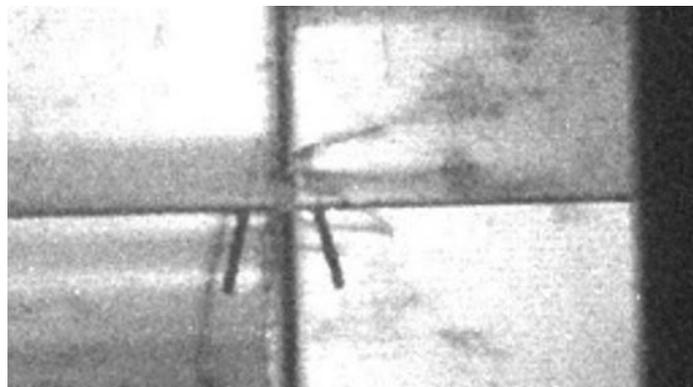


Abb.8: Durch Einschieben zusätzlicher Bändchenstücke wurde keine Verringerung der Bruchneigung erreicht. In der Abbildung zeigen sich gleich mehrere Mikrorisse im entsprechenden Bereich.



3.2.7 Verringerte Bändchenhöhe im Überlappbereich

Durch die Bändchen werden im Überlappbereich lokale Auflagepunkte geschaffen, welche sich bei mechanischer Belastung auf die Zellenfläche umso stärker negativ auswirken, je höher sie sind. Insofern ist die Verwendung möglichst dünner Bändchen günstig, um die offensichtlichen Herausforderungen beim überlappenden Löten zu minimieren.

Andererseits ist der Bändchenquerschnitt entscheidend für den Serienwiderstand. Bei gleicher Querschnittsfläche entspricht eine verringerte Höhe einer grösseren Breite. Dies ist jedoch wiederum nicht erwünscht, da daraus eine höhere Abschattung der Zelle resultiert.

Ein Ansatz diese Thematik anzugehen ist die Verwendung einer unterschiedlichen Bändchengemetrie. Dabei wird im Bereich auf der Zelle das Bändchen mit der gewünschten typischen Geometrie aufgebracht. Im Zellenzwischenraum, bzw. im Überlappbereich, wird das Bändchen durch mechanische Bearbeitung verbreitert. Dadurch wird die Höhe verringert und die Breite erhöht. Eine Verbreiterung wirkt sich in diesem Bereich kaum oder nicht nachteilig aus, da die höhere Abschattung auf einen sehr begrenzten Raum an der Zellenkante limitiert ist. Diese Technik ist bereits etabliert und wird sowohl bei Standardverschaltungen wie auch beim überlappenden Löten eingesetzt. Bei Standardverschaltungen wird dadurch der Biegeradius durch die geringere Dicke verringert und die Zellenabstände können geringer gehalten werden, beim überlappenden Löten wird die Höhe der Auflagepunkte reduziert. Insgesamt wird der Querschnitt durch die Pressung nicht verändert und somit der Serienwiderstand nicht nachteilig beeinflusst.

Entsprechende Techniken wurden insbesondere vom Hersteller Jinko Solar herausgestellt. In früheren Darstellungen wurde dabei eine besondere Formgebung abgebildet, welche an das Schindeln angepasst ist. Dabei ergibt sich eine Stufe, um den Höhenunterschied der Zellenkanten abzufangen. In späteren Darstellungen von Jinko Solar wird jedoch lediglich eine einfache Einprägung in den Verbinder gezeigt, wobei die runde Form der Verbinder hervorgehoben wird, welche die Lichteinkopplung im Modul verbessern soll.

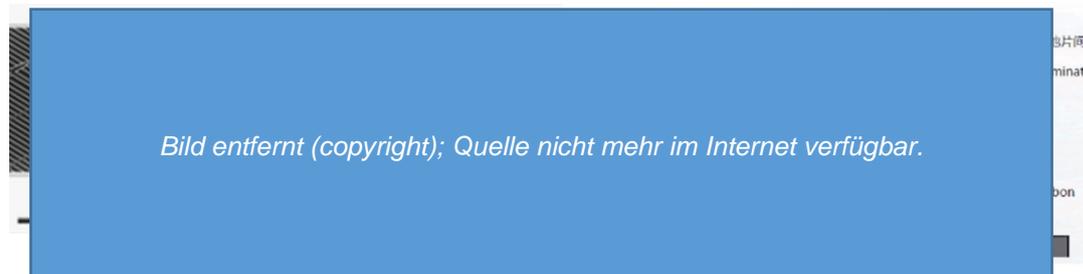


Abb.9: In früheren Darstellungen wurde vom Hersteller eine besondere Formgebung abgebildet, welche an das Schindeln angepasst ist. Dabei ergibt sich eine Stufe, um den Höhenunterschied der Zellenkanten abzufangen.



Abb.10: In späteren Darstellungen wurde die Form nach der mechanischen Bearbeitung anders dargestellt. Jinko Solar verwendet runde Drähte, was die Lichteinkopplung im Modul verbessert.



Entsprechende Versuche wurden von uns ebenfalls durchgeführt und erbrachten eine deutliche Verbesserung der Bruchneigung. Durch Pressung der Bändchen wird bei unserem derzeit angewandten Verfahren die Breite in etwa verdoppelt. Da der Querschnitt rechteckig und die Querschnittsfläche insgesamt konstant bleibt, entspricht das einer Halbierung der Höhe. In der untenstehenden Abbildung eines früheren Versuchsmoduls ist die gepresste Fläche noch nicht so weit wie später in den Überlappbereich geschoben. Dadurch ist die Verbreiterung des Querschnitts sehr deutlich zu erkennen.

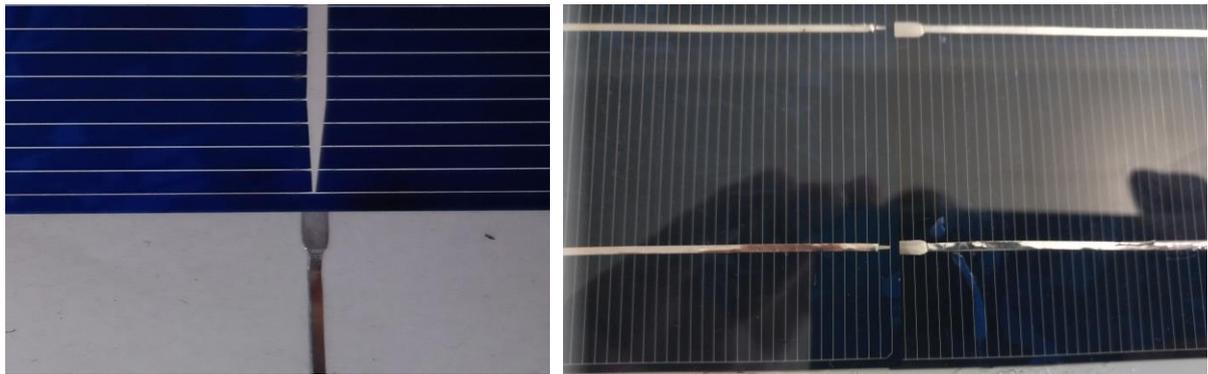


Abb. 11: Durch das derzeit angewandte Verfahren wird die Breite verdoppelt. Links: Detail vor dem Verlöten. Beim Versuchsmodul rechts ist die gepresste Fläche noch nicht so weit wie später in den Überlappbereich geschoben. Dadurch ist die Verbreiterung des Querschnitts sehr deutlich zu erkennen.

Die lokale Verringerung der Bändchenhöhe im Überlappbereich durch Pressen war ein wesentlicher Schritt vorwärts und hatte deutlich höheren Einfluss auf die Bruchempfindlichkeit als die zuvor beschriebenen Ansätze. Dies zeigt auch, dass das Schindeln mit Überlapp insbesondere zukünftig interessant wird, falls sich der Trend zu Multi-Busbar Designs mit kleineren Bändchenquerschnitten fortsetzt.

3.2.8 Aufbau: Glas/Glas; Glas/Backsheet

Beim Laminieren von Modulen mit Glas/Glas-Aufbau geben die sehr harten Grenzflächen des Laminats den Druck der angepressten Laminatormembran direkt auf die lokalen Auflagepunkte, also die Bändchen im Überlappbereich, weiter.

Durch Verwenden eines Backsheets kann der Druck etwas verteilt werden, da das Backsheet eine gewisse Flexibilität aufweist. Tatsächlich zeigten Laminats mit Glas/Backsheet-Aufbau eine nochmals geringere Bruchneigung als mit Glas/Glas-Layout. Eine Quantifizierung ist jedoch schwierig, da in Kombination mit den anderen wesentlichen Verbesserungen, den bearbeiteten Bändchen und der EVA/POE-Mischung, die Bruchraten niedrig lagen, jedoch aufgrund der limitierten Stückzahl keine wirkliche Statistik möglich ist.

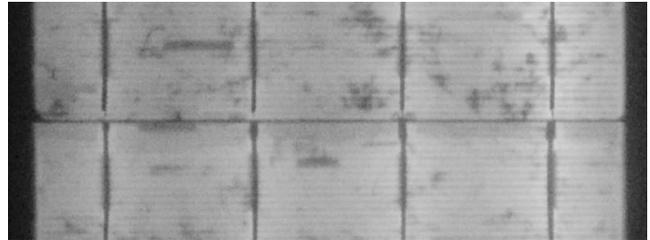
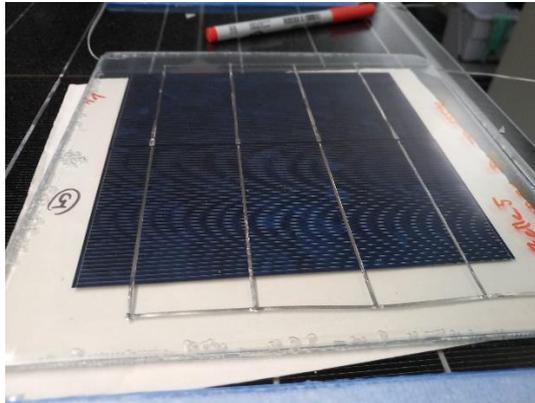


Abb. 12: In den später gefertigten Modulen können unter Verwendung der erfolgreichen Massnahmen (gespresste Bändchen und POE/EVA-Mischung auch im EL mikrorissfreie Glas/Glas-Module hergestellt werden. Hier: Minimodul aus monofazialer, multikristalliner Zelle

Da im Projekt bifaziale Solarzellen im Fokus stehen wurde, ausser in einer frühen Phase, transparentes Backsheet (Krempel) eingesetzt. Daneben wurde jedoch auch mit anderen Materialien experimentiert, welche noch aus dem U-Light verfügbar waren. Dies waren Kunststoff-Stegplatten und Platten aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GfK) zum Test der prinzipiellen Eignung. Beides ging problemlos, wobei kein grosser Unterschied zum Backsheet festgestellt werden konnte. Andererseits ist die Transparenz bei den entsprechenden transparenten Optionen geringer als die des Backsheets, weswegen kein wirklicher Vorteil aus deren Anwendung resultiert. Solche steiferen Rückseiten können jedoch interessant werden, falls leichtgewichtige Ansätze angestrebt werden, insbesondere wenn das Glas auf der Frontseite durch ein Polymer-Frontsheet ersetzt wird.

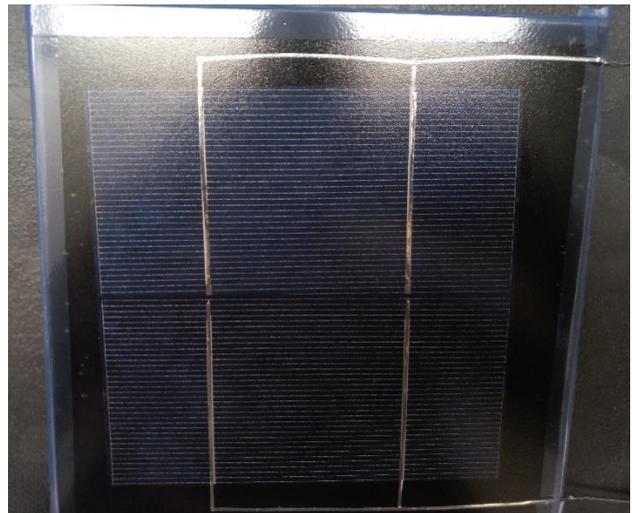
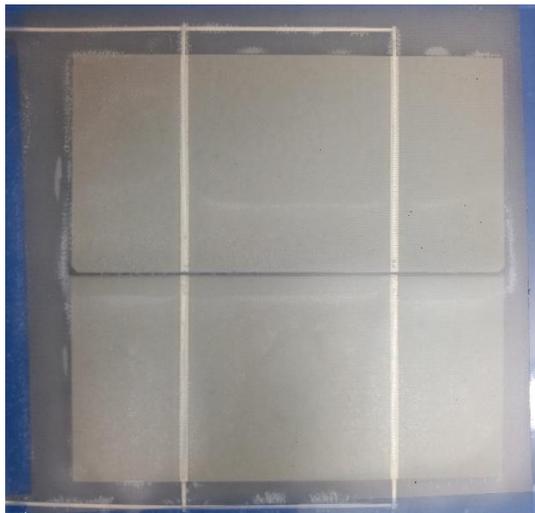


Abb. 13: Test alternativer Rückseitenmaterialien an Laminaten mit monofazialen Dummyzellen zum Test der prinzipiellen Materialeigenschaften. Links: Rückseitig aufgebrachte transparente GfK-Platte. Rechts: Opake, schwarze Kunststoffstegplatte.



Insbesondere im Verbund mit den beschriebenen steiferen Alternativmaterialien kann somit auch die Verwendung eines Frontsheets eine sinnvolle Option sein. Dabei würde die harte Glasplatte auf beiden Seiten durch Kunststoffe ersetzt und die lokale Belastung bei der Lamination verringert. Die mechanische Stabilität des resultierenden Laminats muss dann aufgrund der geringeren Steife durch eine Gitterstruktur oder Rückplatte gewährleistet werden. Bereits im U-Light Projekt wurde gezeigt, dass ein leichtgewichtiges Layout aus Polymerlayern prinzipiell geeignet ist, wobei die mechanische Stabilität durch eine stützende Platte oder eine Gitterstruktur gewährleistet werden kann. Da diese spezielle Form der Umsetzung nicht dem ursprünglichen Ansatz entspricht, wurde dieser Weg jedoch nicht weiterverfolgt.

3.2.9 Einbettmaterial im Überlappbereich

Wenn man annimmt, dass die Bändchen als Auflagepunkte dienen, was unter Druck zum Bruch führt, stellt man sich dabei vor, dass die Waferkanten heruntergedrückt werden und als Hebel dienen. Dieser Gedanke motivierte das Einsetzen zusätzlicher Bändchenstücke, um die Hebelwirkung zu verringern und Druck besser zu verteilen. Dieser Ansatz erwies sich experimentell als nicht erfolgreich.

Ein anderer Ansatz zur Verbesserung, der auf demselben Grundgedanken basiert, besteht darin die Auflageflächen im Überlappbereich zu polstern. Der String in klassischer Form hat Einbettmaterial nur auf der Front- und Rückseite der Zellen. Dies ist beim Standardmodul auch kein Problem, da die Zellenkanten über einen Abstand voneinander getrennt sind. Beim überlappenden Löten sind jedoch die Zellenkanten in direktem Kontakt zueinander. Beim Evakuieren im Laminator drückt das auf und unter der Zelle liegende Einbettmaterial auf die Zellenkanten im Überlappbereich.

Man sollte diesen unerwünschten Effekt abfangen können, wenn man Einbettmaterial in den Überlappbereich einbringt, um somit erstens die Hebelwirkung und zweitens den direkten Kontakt der empfindlichen und spröden Zellenkanten zu verhindern.



Abb. 14: Einbringen von Einbettmaterial in den Überlappbereich zwischen den Bändchen beim Stringaufbau, um den direkten Kontakt der Zellenkanten zu verhindern und die Hebelwirkung zu verringern.



Dies wurde in mehreren Versuchen experimentell untersucht, wobei Einbettmaterial in den Überlappbereich zwischen den Bändchen beim Stringaufbau eingelegt wird. Durch diesen Ansatz konnte eine wesentliche Verbesserung des Bruchverhaltens erreicht werden und es konnten Mini-Module hergestellt werden, die nach der Lamination keinen Bruch im Überlappbereich aufwiesen.

Eine weitere Änderung wurde motiviert durch eine Information im Internetauftritt des Herstellers Jinko Solar (nicht mehr online und daher nicht zitierbar). Darin wurde erwähnt, dass Jinko Solar eine Materialkombination aus EVA und POE (Polyolefin) einsetzt, um einen Puffereffekt im Überlappbereich zu erreichen. Hieraus entstand, ohne den Ansatz von Jinko Solar genau zu kennen, die Idee POE-Folie statt EVA in den Überlappbereich einzubringen. Das in kleinen Mengen benötigte POE-Folienmaterial zur Durchführung entsprechender Versuche erhielten wir vom Projektpartner PCCL. Das Einbringen erfolgt dabei in gleicher Weise wie mit EVA und wie in obiger Abbildung dargestellt. Das Bruchverhalten bei Verwendung von POE war nochmals besser als bei Verwendung von EVA, eine quantitative Bewertung der Unterschiede ist jedoch schwierig.

Auch ohne Einprägung der Ribbons (3.2.7) konnten nun sicher Mini-Module hergestellt werden, die nach der Lamination keinen Bruch aufwiesen. Das Vorgehen erwies sich als der Effektivste der versuchten Ansätze um Bruch zu vermeiden. Mit dem Verfahren war es auch in späteren Versuchen möglich Mini- und Grossmodule ohne Bruch im Überlappbereich (3.2.11. und 3.2.12) herzustellen.

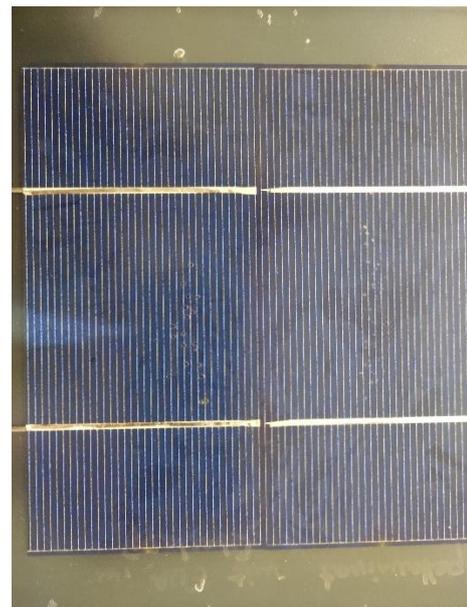
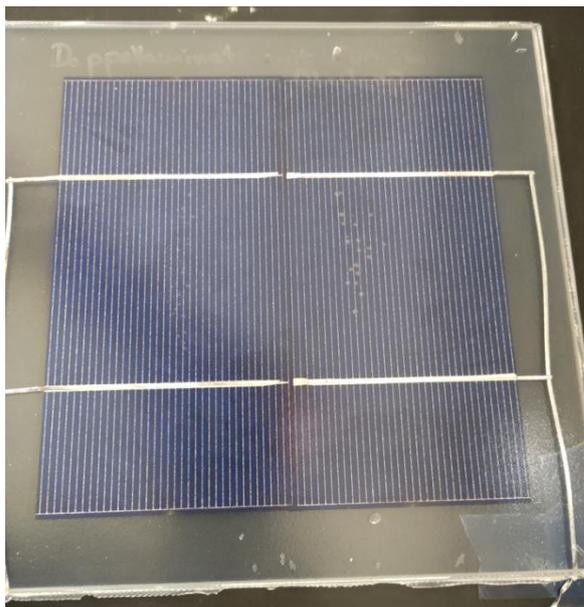


Abb.: Auch nach ausgiebigen Klimakammertests, bei welchen sich eine generelle Verfärbung des Einbettmaterials zeigte, waren keine Effekte durch die Vermischung der Materialien (EVA und POE) im Überlappbereich erkennbar.

Die Mischung der Einbettmaterialien (POE und EVA) im Übergangsbereich zeigte unter UV-Einfluss keine erkennbaren Probleme. Für entsprechende Versuche sind 3 Mini-Module mit unterschiedlichen Materialien verwendet worden. Bei allen Modulen wurde EVA als Einbettmaterial und POE in den Überlappbereichen eingesetzt.

- GFK-EVA-Zelle-EVA-Glas
- Glas-EVA-Zelle-EVA-Glas
- BS transparent -EVA-Zelle-EVA-Glas



Die Mini- Module wurden mit einer Lichtintensität von ca. 80 W/m^2 (Fe-Strahler) über 750 h bestrahlt um eine kumulierte Dosis von 60 kWh/m^2 erreicht.

Optisch und in EL-Aufnahmen war nach der Lamination kein Kontrast oder Übergang zu erkennen. Auch nach ausgiebigen Klimakammertests, bei welchen sich eine generelle Verfärbung des Einbettmaterials zeigte, waren, keine Effekte durch die Vermischung der Materialien (EVA und POE) im Überlappbereich erkennbar. Anhand der Versuche bleibt offen, ob dies für die Mischung von POE und EVA allgemein, oder nur zufällig für die gewählten Materialien zutrifft.

In den späteren Versuchen wurden die Materialstreifen in flächenmässig ausgedehnter Form eingesetzt (siehe Abbildungen 29 und 31) um einen zusätzlichen unterstützenden Effekt zu erreichen, wie er bei einem Ansatz des ISFH [1] beschrieben wird (siehe 3.2.12). Zudem wurde dort auf eine Mischung verzichtet und überwiegend durchgehend POE eingesetzt.

3.2.10 Verwendung der besten Ansätze mit bifazialen Zellen des Projektpartners SolAround

Auch wenn aufgrund der limitierten Stückzahl keine wirkliche Statistik zum Bruchverhalten möglich ist, waren die Effekte der unterschiedlichen Ansätze qualitativ erkennbar. Die grössten Verbesserungen wurden durch das Verringern der Bändchenhöhe und durch das Einbringen von Einbettmaterial in den Überlappbereich erzielt, insbesondere wenn EVA durch POE ersetzt wird. Insgesamt konnte so im bisherigen Projektverlauf eine sehr deutliche Verbesserung erreicht werden. Während beim reinen Übertragen der Standardtechnik auf das überlappende Lötten zu praktisch 100 % mit Bruch zu rechnen ist, werden unter Anwendung der beschriebenen Änderungen überwiegend Module hergestellt, die weder sichtbaren Bruch noch im EL erkennbare Mikrorisse aufweisen.

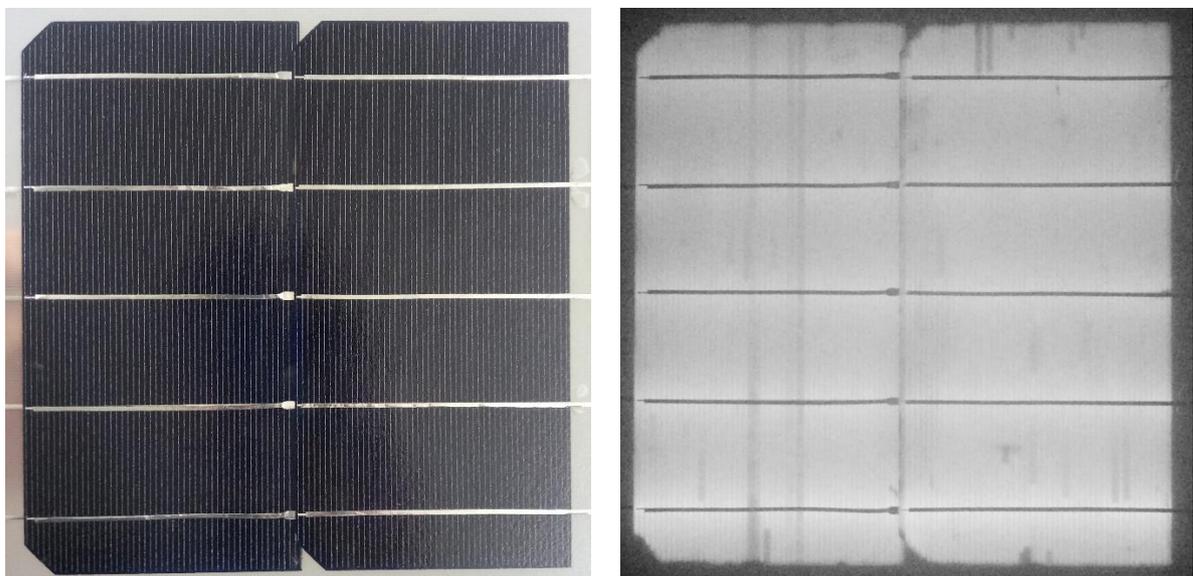


Abb. 15: Mit überlappendem Lötten hergestelltes Mini-Modul (Glas/transparentes Backsheet) aus bifazialer monokristalliner 5 Busbar Solarzelle von SolAround ohne erkennbaren Bruch auch im EL.

Insgesamt konnten somit nun regelmässig Mini-Module ohne wesentliche Schäden hergestellt werden. Vom Projektpartner SolAround stand nur eine sehr begrenzte Anzahl Solarzellen zur Verfügung. Unglücklicherweise wurden aus den zur Verfügung stehenden SolAround- Zellen in einem grösseren Run eine Serie von Minimodulen entsprechend jenem in Abbildung 15 hergestellt, welche prinzipiell in Ordnung waren, jedoch einen systematischen Fehler im Aufbau hatten. Beim Einbetten



der Minimodule wurde versehentlich kein breiterer «Querverbinder» benutzt, sondern das gleiche schmale Ribbon wie auf den Busbars. Dies fiel allerdings erst nach der Herstellung auf, als die einzelligen Mini-Module vermessen wurden und durchgehend einen auffallend niedrigen Füllfaktor aufwiesen.

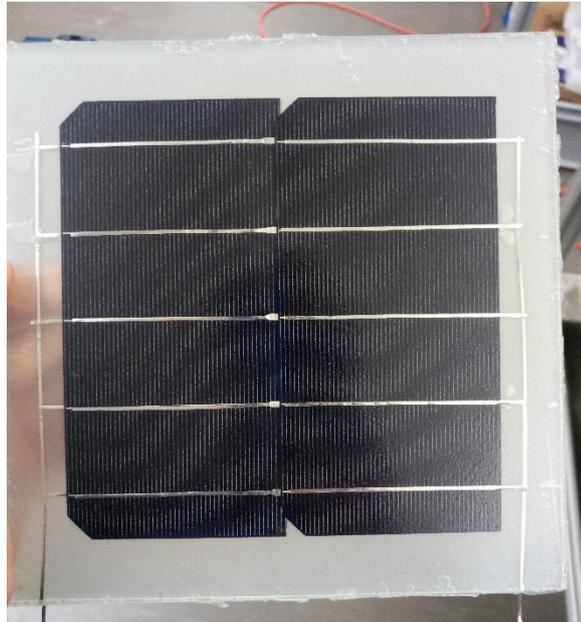


Abb. 16: Mini-Modul aus zwei überlappenden SolAround Halbzellen mit dünnem Ribbon wie auf Busbar, statt Querverbinder mit grösserem Querschnitt.

Die Messung der Mini-Module wurde am ISC Konstanz durchgeführt, da an der ZHAW zwar ein LED-Flasher zur Verfügung steht, dieser jedoch eine Minimodul-Spannung von circa 2V (entsprechend 4 Siliziumsolarzellen) benötigt, um verlässliche Messungen zu ermöglichen. Von dem systematischen Fehler betroffen waren dabei sowohl die aus zwei Halbzellen zusammengesetzten Mini-Module mit Überlapp wie auch die Referenzen mit einer kompletten Zelle pro Minimodul. Bei den Referenzen war, aufgrund des doppelt so hohen Stroms, der Effekt des kleinen Bändchenquerschnitts sogar noch ausgeprägter. Somit wurden zwar, im Vergleich zur Referenz, durch das Löten mit Überlapp bessere Werte erreicht, jedoch kam dies aufgrund des beschriebenen Effektes zustande. Auch die angestrebten CTM-Verluste nach der Einbettung wurden so nicht zu erreichen, obwohl davon ausgegangen werden konnte, dass diese ohne den systematischen Fehler erreicht worden wären. Dennoch konnte der Meilenstein zu diesem Zeitpunkt nach wie vor nicht als erfüllt angegeben werden.

Tabelle: SolAround-Zellen und Minimodule mit systematischem Fehler durch schmale Bändchen statt breiter «Querverbinder». Mittelwerte charakteristischer elektrischer Daten, frontseitige Messung.

| Mittelwerte | FF [%] | Pmpp [W] | Voc [mV] | Isc [A] |
|--|--------|----------|----------|---------|
| Solaround-Zellen | 79.8 | 5.1 | 674 | 9.5 |
| Referenzen- 1 ganze Zelle pro Minimodul | 63.8 | 3.8 | 668 | 9.1 |
| Überlapp: 2 Halbzellen pro Minimod. (Abb. 15) | 74.8 | 4.5 | 1.320 | 4.5 |



Obwohl die elektrischen Daten der hergestellten Mini-Module aufgrund des beschriebenen systematischen Fehlers hinter den Erwartungen zurücklagen, waren die strukturellen Eigenschaften dennoch zufriedenstellend.

Somit wäre man prinzipiell in der Lage gewesen weitere Mini-Module herzustellen, hatte aber keine Solarzellen des Projektpartners SolAround zur Verfügung. Auch die Übertragung der gefundenen Ansätze auf grössere Module, insbesondere durch den industrietauglichen Stringer am ISC Konstanz, wurde durch die fehlenden Zellen verhindert.

3.2.11 Grossmodul aus monofazialen Solarzellen inklusive «mechanical load»- Tests

Als deutlich wurde, dass es bei den Zellen SolAround zu Verzögerungen kommen wird, wurde entschieden kommerziell erhältliche bifaziale Hochleistungszellen von extern zu beziehen, um die Versuche während der mehrmonatigen Lieferzeit fortführen zu können.

In der Folge wurde beschlossen ein oder mehrere Grossmodule mit den an der ZHAW gegebenen Möglichkeiten herzustellen. Dies sollte es ermöglichen «mechanical load»- Tests durchzuführen, aber auch generell die Übertragbarkeit auf längere Strings und Module demonstrieren.

Um ein grosses Modul mit 120 Halbzellen herzustellen zu können, wurde auf vorhandene monofaziale, multikristalline Zellen mit zwei Busbars zurückgegriffen, die in ausreichender Stückzahl vorhanden waren. Die Zellen waren funktionsfähig aus einer zusammengehörenden Serie, aber in Boxen ohne vermerkte Klassierung. Da der Fokus auf Bruchdetektion nach mechanischer Belastung sowie auf vergleichenden Relativmessungen liegen sollte wurde auf eine individuelle Zellenmessung vorab verzichtet, die extern hätte stattfinden müssen (siehe weiter oben).

Die Zellen wurden zur Herstellung von Halbzellen gelasert und dann manuell verlötet. Die zeitaufwändige manuelle Verlötung der 120 Halbzellen wurde gewählt, um die Eigenschaften des Überlapps im Laminat zu erhalten, ohne den Effekt des Halbautomaten einzuschliessen, der sich durch das Kontaktlöten negativ auswirkt. Auch wenn durch die Optimierung des Lötprozesses am Halbautomaten die Bruchrate stark verringert wurde, sollten die Strings nicht durch einzelne geschädigte Zellen gefährdet werden. Das Modul wurde mit dem heute für Halbzellen verbreiteten Layout aufgebaut, bei welchem sich die herausgeführten Modulkontakte in der Modulmitte befinden. Die Verschaltung erfolgte ebenfalls entsprechend des üblichen Layouts und erlaubt eine Messung des Gesamtmoduls, sowie der einzelnen Strings.

Die Strings wurden vor dem Laminieren mittels EL auf Brüche geprüft. Es war möglich die Strings durch überlappendes Verlöten, ohne im EL erkennbaren Bruch aufzubauen. Leider kam es bei der Lamination zu einem Problem in der Prozessführung, welches zu einer teilweise unzureichenden Haftung des Einbettmaterials auf den Zellen führte (siehe Abb. 17). Die Haftungsprobleme treten zumeist inmitten der Zellenfläche und nicht an den Überlappbereichen auf. Die Vernetzung des Materials war nach dem Laminationsschritt abgeschlossen, ein «Nachlaminieren» brachte keine Verbesserung.



Abb. 17: Durch überlappendes Lötten aus 120 Halbzellen hergestelltes Grossmodul. Probleme bei der Lamination verursachten eine teilweise unzureichende Haftung des Einbettmaterials auf der Zellenoberfläche.

Trotz der optisch störenden Bereiche ohne Haftung des Einbettmaterials entstand ein funktionsfähiges Grossmodul, welches unter anderem für «mechanical load»- Tests eingesetzt werden konnte. Insbesondere konnte anhand des Moduls aber gezeigt werden, dass es, bei Anwendung der in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Techniken, möglich ist, durch überlappendes Lötten ein bruchfreies Modul herzustellen.

Die EL-Aufnahmen (Abb. 18) erscheinen auf den ersten Blick sehr unruhig, was aber der Multikristallinität der Wafer, sowie zahlreichen Fingerunterbrechungen und sonstigen Artefakten der Zellen zuzuschreiben ist. Bruch ist auch nach der Lamination nicht erkennbar, weder durch optische Begutachtung noch in der EL-Aufnahme. Das Modul zeigte zudem eine recht homogene Leitungsverteilung über die Strings und keine Hinweise auf Probleme, die insbesondere dem überlappendem Lötten zuzuordnen wären.

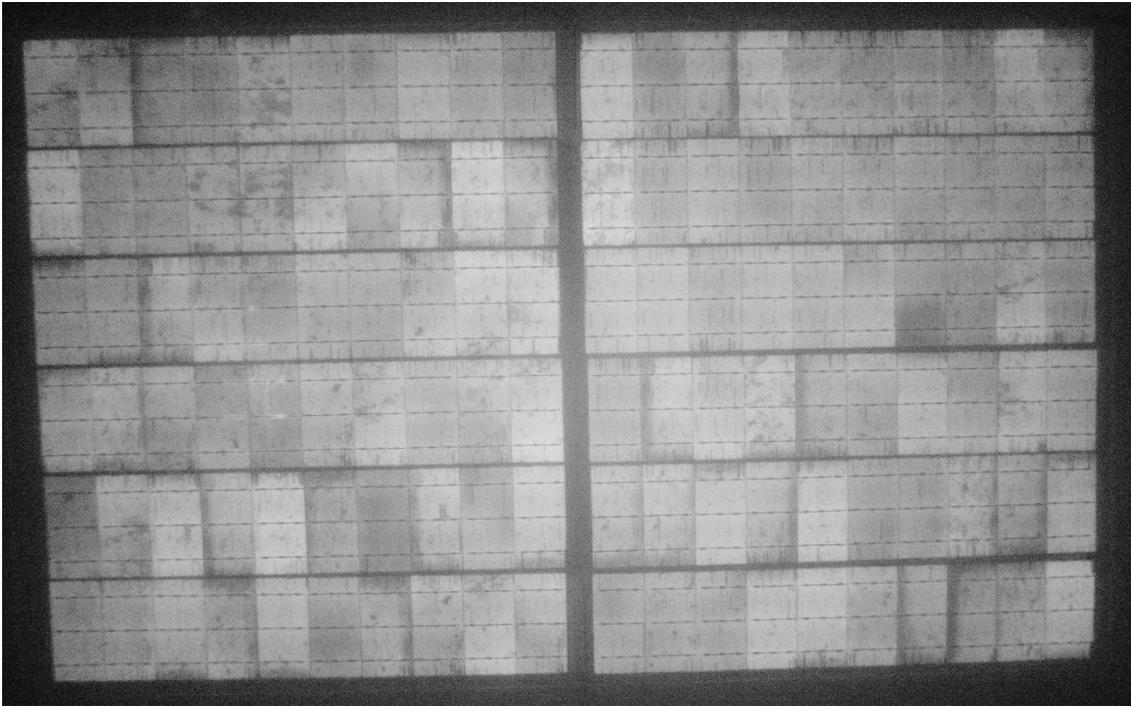


Abb. 18: EL-Aufnahme des Moduls aus Abbildung 17 nach der Lamination. Die Hell/Dunkel Variationen über die Modulfläche sind der Multikristallinität der Wafer, zahlreichen Fingerunterbrechungen und sonstigen Artefakten der Zellen zuzuschreiben. Bruch ist auch nach der Lamination nicht erkennbar.

Tabelle: Elektrische Leistungsdaten des in den Abbildungen 16 und 17 gezeigten Moduls nach der Lamination

| | I_{MPP} [A] | U_{MPP} [V] | P_{MPP} [W] | I_{SC} [A] | U_{OC} [V] | P_{MAX} [W] | FF [%] |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------|
| Modul ganz | 7.6 | 31.0 | 234.3 | 7.9 | 37.8 | 298.2 | 78.7 |
| String 1+2 | 7.6 | 10.3 | 77.9 | 7.9 | 12.6 | 99.0 | 78.7 |
| String 3+4 | 7.6 | 10.3 | 78.2 | 7.9 | 12.6 | 100.2 | 78.3 |
| String 5+6 | 7.5 | 10.3 | 78.1 | 7.9 | 12.6 | 99.3 | 78.6 |

Mit dem Modul wurden insbesondere auch ausgiebige «mechanical load»-Tests durchgeführt. Derartige Tests sind gerade für das Verlöten mit Überlapp von grossem Interesse, da die Überlappbereiche bei mechanischer Belastung anderen Belastungen ausgesetzt sind als bei einem typischen Modul mit klassischem Aufbau.

Das Modul ist rahmenlos und vom Glas/Glas-Typ mit je 2 mm Solarglas auf der Front- und Rückseite. Die Belastung wurde mit Sandsäcken durchgeführt, wobei die Belastung um jeweils 20 kg pro Schritt erhöht wurde. Das Modul lag dabei mit den «kurzen Seiten» auf dem Rahmen eines Gestells auf, was eine maximale Durchbiegung des Laminats erlaubte. Das Maximalgewicht der Sandsäcke lag bei 260 kg. Die Durchbiegung des Moduls bei diesen Belastungen war erheblich wie in Abbildung 19 qualitativ direkt erkennbar. In Abbildung 19 werden Belastungen von etwa 200 kg gezeigt.



Abb. 19: «Mechanical Load»- Test mit dem in Abbildungen 17 und 18 gezeigten Modul. Das Gewicht wurde in Schritten von 20 kg erhöht. Das Maximalgewicht der Sandsäcke lag bei 260 kg. Hier wird die Belastung bei etwa 200 kg gezeigt.

Nach Erhöhung der Last in Schritten von jeweils 20 kg wurden jeweils IV-Messungen und EL-Aufnahmen durchgeführt, um das Modul auf Schädigungen zu untersuchen. Die IV-Messungen wurden dabei jeweils sowohl für das ganze Modul wie auch für die einzelnen Strings durchgeführt, für den Fall, dass einzelne Bereiche mehr geschädigt würden als andere.

In Abbildung 20 werden die wesentlichen elektrischen Daten nur des Gesamtmoduls als Funktion der Belastung abgebildet. Weder beim Gesamtmodul noch bei den einzelnen Strings ergab sich ein Anhaltspunkt dafür, dass sich die Belastung negativ auf die elektrischen Daten auswirkt.

Neben den elektrischen Daten aus den IV-Messungen, zeigten auch die EL-Aufnahmen, trotz der starken Durchbiegung, keinen Hinweis auf eine Schädigung (Abbildung 21).

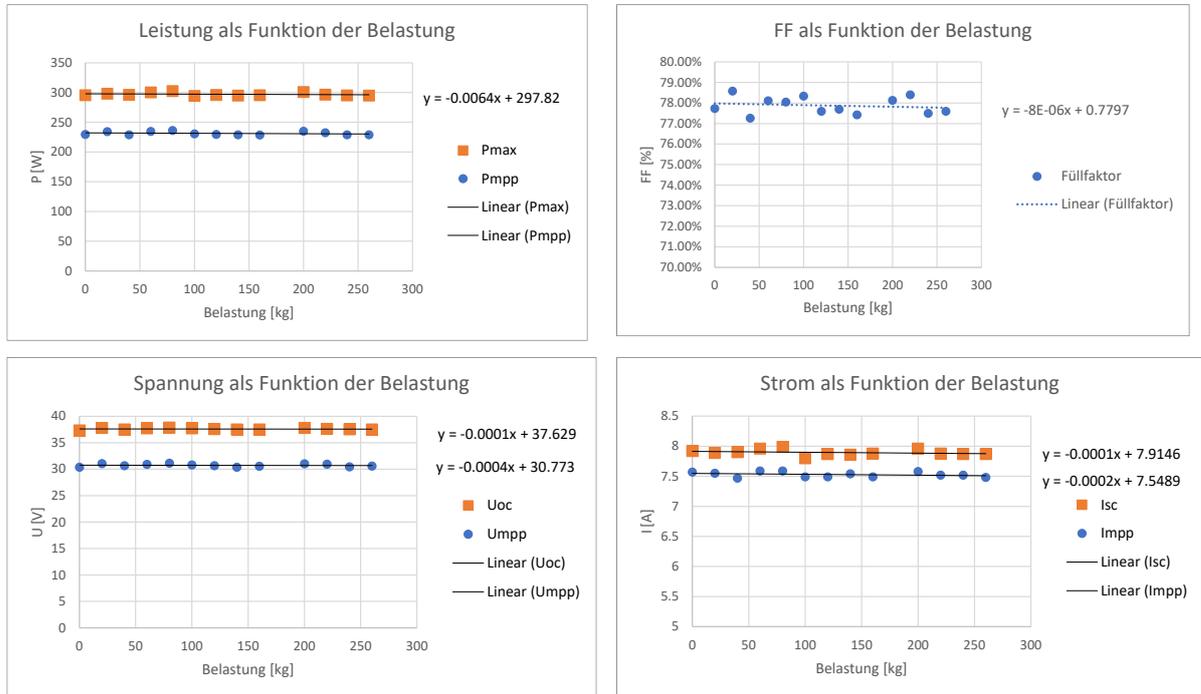


Abb. 20: Die wesentlichen elektrischen Daten nur des Gesamtmoduls als Funktion der Belastung. Weder beim Gesamtmodul noch bei den einzelnen Strings ergab sich ein Anhaltspunkt dafür, dass sich die Belastung negativ auf die elektrischen Daten auswirkt.

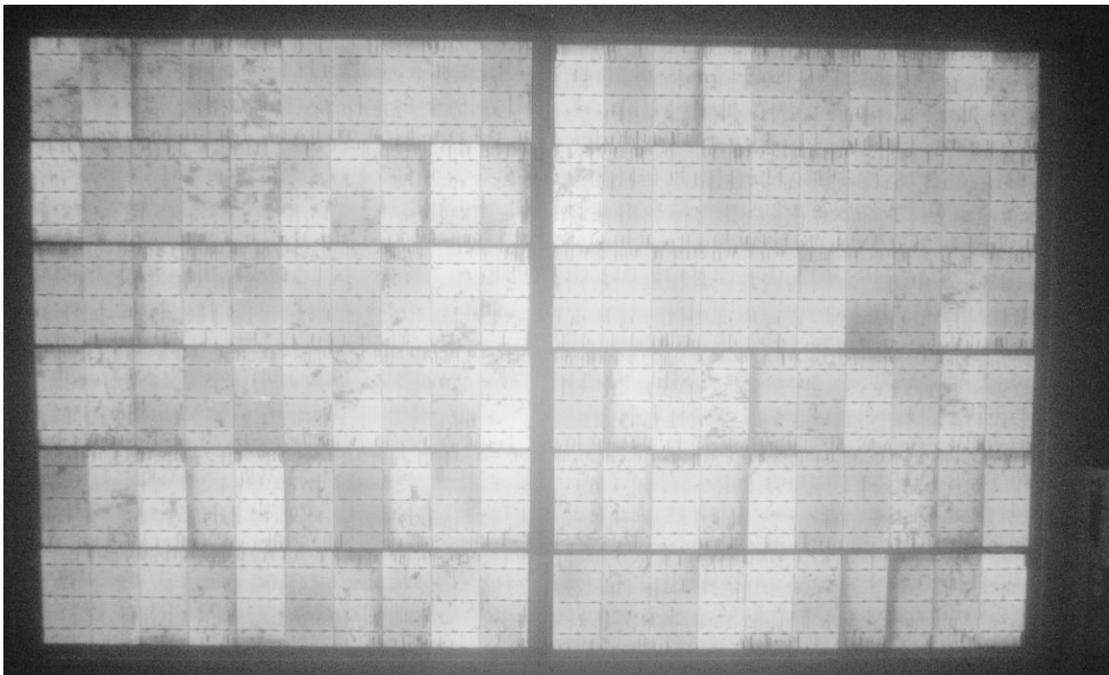


Abb. 21: EL-Aufnahme nach Abschluss der «mechanical load»- Tests. Wie bei den elektrischen Daten ergaben sich keine Hinweise auf eine Schädigung. Für eine eingehende Bilduntersuchung muss eine höhere Vergrößerung gewählt werden, als hier möglich ist.



3.2.12 Bifaziale PERC-Zellen auf industrietauglichem Stringer (ISC Konstanz)

Wie in Abschnitt 3.2.10 beschrieben, stand nur eine geringe Anzahl von Solarzellen des Partners SolAround zur Verfügung, weswegen der geplante Projektverlauf unterbrochen wurde und zunächst ein Grossmodul aus monofazialen Zellen herzustellen (vorheriger Abschnitt 3.2.11).

Als deutlich wurde, dass es zu weiteren Verzögerungen kommt, wurde entschieden kommerziell erhältliche bifaziale Hochleistungszellen von extern zu beziehen, um die Versuche fortführen zu können. Die Festlegung des Zellenlayouts erfolgte dabei in Absprache mit dem ISC Konstanz, da die Einrichtung des Stringers dort möglichst einfach gehalten werden sollte (sechs Busbars mit gegebenen Abständen auf M6-Format). Erst nach längerer Suche wurde ein geeigneter Anbieter gefunden, welcher bereit war eine vergleichsweise geringe Menge an bifazialen PERC-Zellen mit den geforderten Eigenschaften zu liefern. In der Folge konnten bifaziale p-Typ PERC-Solarzellen mit einem Bifazialitätsfaktor von ca. 60 % bestellt werden.

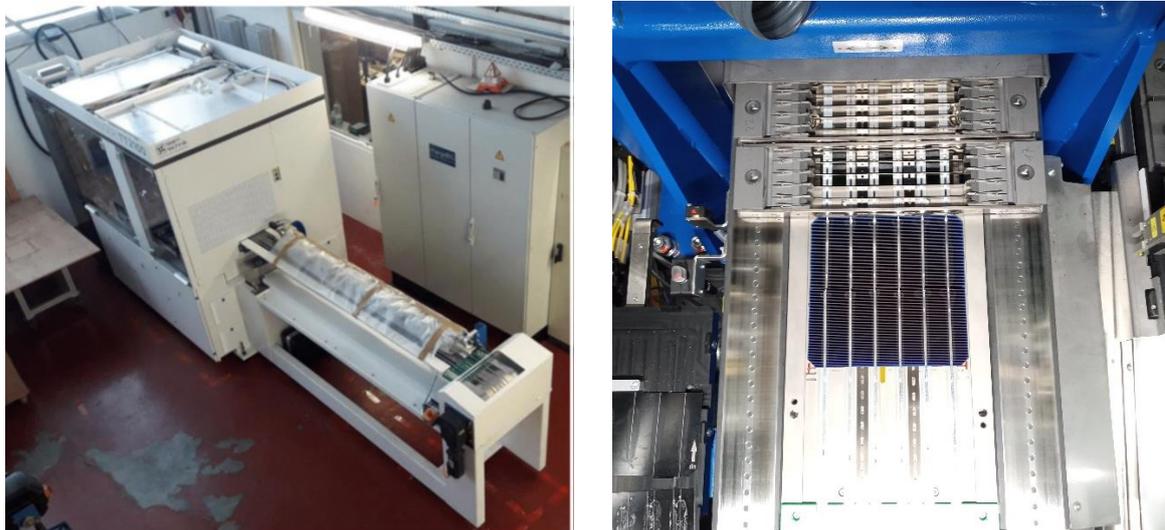


Abb. 22: Team Technik Stringer am ISC Konstanz. Rechts ist ein Ministring, bestehend aus zwei Halbzellen vor der Lötung gezeigt. Direkt hinter den Zellen stehen Niederhalter bereit, welche im Anschluss aufgesetzt werden.

Der industrietaugliche Stringer von TeamTechnik, welcher am ISC Konstanz zur Verfügung stand, bringt die Löttemperatur über Wärmestrahlung ein. Die Zellverbinder werden dabei mittels Niederhaltern sanft auf die Zelle gedrückt, wobei wesentlich geringere mechanische Kräfte als beim Kontaktlöten auftreten, zudem ist die Temperatur über der Zelle deutlich homogener.

Der Stringer musste zunächst auf den Zellentyp umgestellt werden, damit insbesondere auch das automatische Handling die Zellen erkennt. Ebenso muss die Zuführung der Bändchen und schliesslich der gewünschte Überlapp auf der Anlage eingestellt und anhand von Probeläufen verifiziert werden (Abb. 23). Teststrings wurden auch mittels EL auf Brüche nach der Verstringung untersucht (Abb. 23).

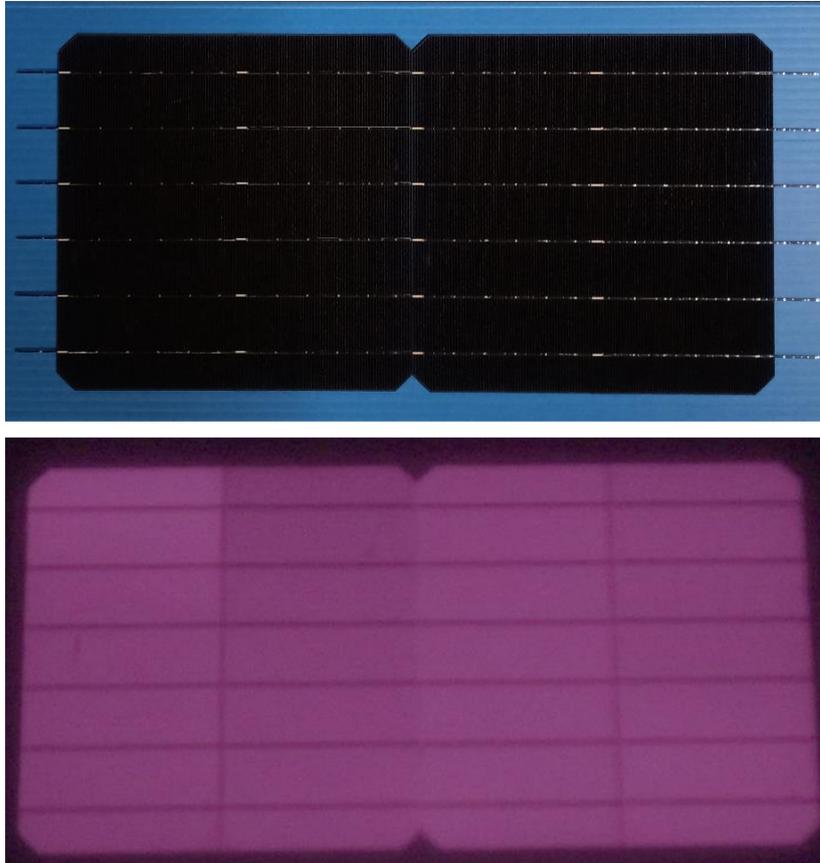


Abb. 23: Teststrings aus jeweils vier Halbzellen nach der Verstringung (oben) und in einer EL-Aufnahme (unten).

Als Zellverbinder wurden in praktisch allen Versuchen Bändchen des Typs SnPb 60/40 mit einem Querschnitt von 1.0 mm x 0.24 mm ($R_m \sim 217 \text{ N/mm}^2$) eingesetzt, in einer Gruppe mit einem breiteren und flacheren Querschnitt von 2.5 mm x 0.10 mm. Für die Querverbinder kam derselbe Materialtyp mit einem Querschnitt von 5 mm x 0.3 mm zum Einsatz.

Typische Proben waren jeweils Mini-Module bestehend aus 8 Halbzellen, in Strings zu je 4 Halbzellen, welche in Solarglas (500 mm x 500 mm x 2.0mm) ohne Antireflexbeschichtung eingebettet wurden. Einbettmaterialien waren EVA und POE. In Abbildung 24 ist ein typisches Minimodul dieser Versuchsreihe abgebildet (450 μm EVA; 260 μm transparentes Backsheet).

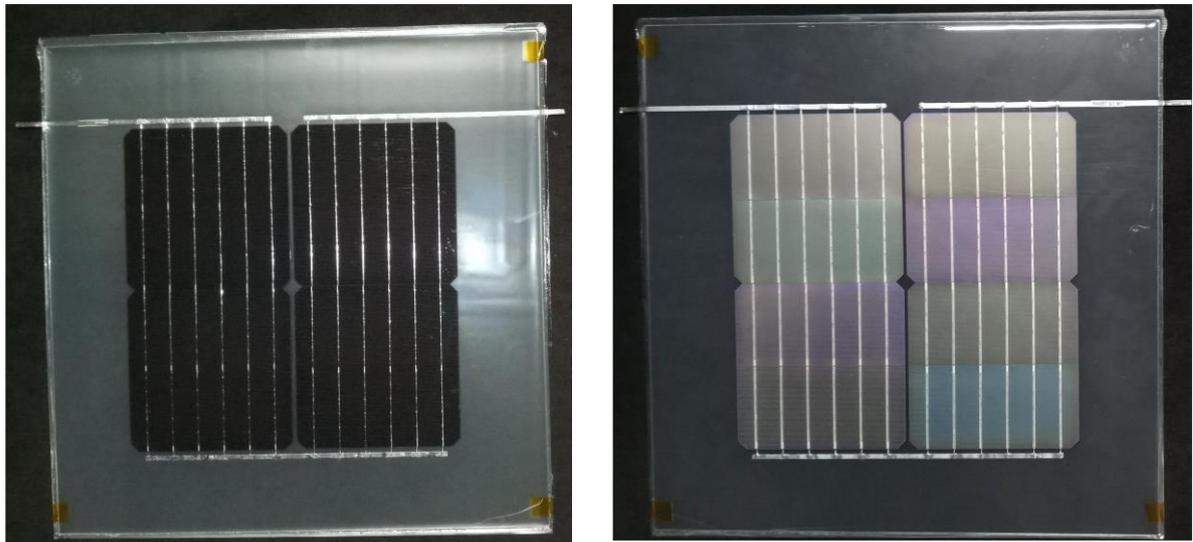


Abb. 24: Typischer Aufbau der Mini-Module dieser Versuchsreihe, mit jeweils 8 Halbzellen in zwei Strings mit je 4 Halbzellen.

Gruppe 1: EVA – möglichst Standard

Bei der ersten Gruppe wurden zunächst alle Parameter möglichst ähnlich zum «normalen» Prozess gewählt, bis auf den «negativen Zellabstand» von etwa einem Millimeter. Als Einbettmaterial wurde EVA eingesetzt.

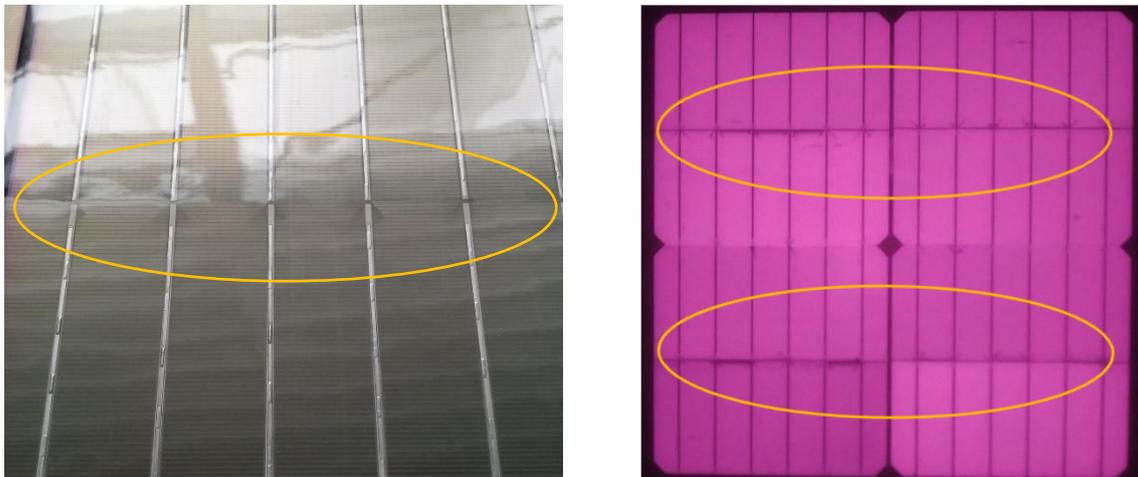


Abb. 25: Bruch am Überlapp ist optisch und im EL direkt erkennbar.

Gruppe 2: Wie zuvor, aber 2x EVA und Druck bei Lamination von 1000 mbar auf 900 mbar reduziert.

Die beobachteten Schäden im Überlappbereich sollten bei diesem Ansatz durch verringerten Druck beim Laminieren und jeweils 2 Lagen EVA reduziert werden.

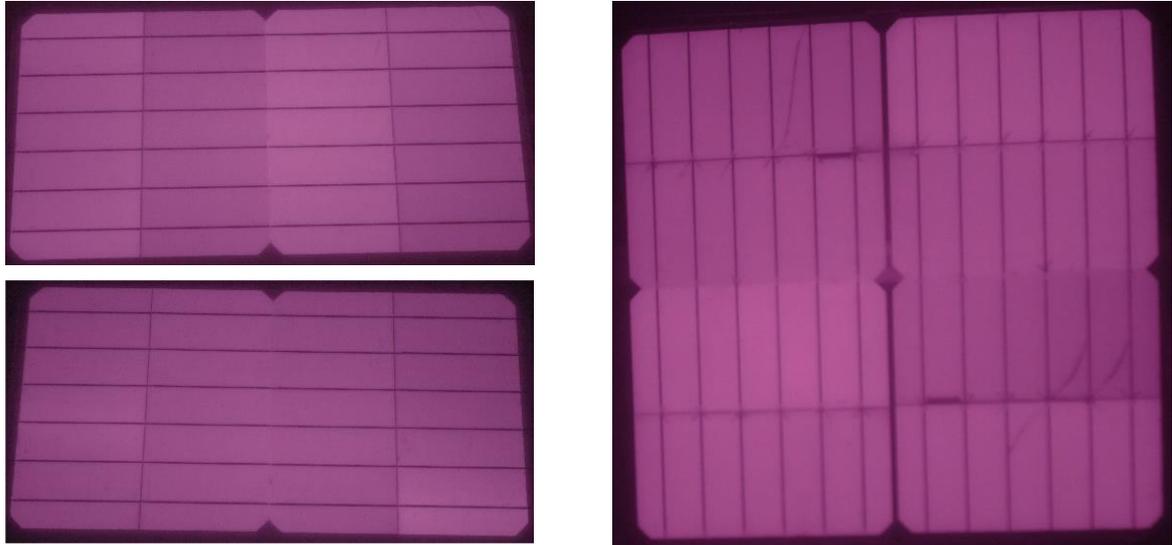


Abb. 26: Strings vor Lamination und resultierendes Modul Gruppe 2. Verbesserungen im Überlappbereich sind qualitativ erkennbar. Deutliche Schädigungen sind aber dennoch erkennbar, ebenso wie weitere Risse, welche von den Überlappbereichen ausgehen.

Gruppe 3: Ersatz von EVA durch POE

POE zeigt im Vergleich zu EVA ein anderes thermomechanisches Verhalten und wurde als Alternative zum EVA eingesetzt.

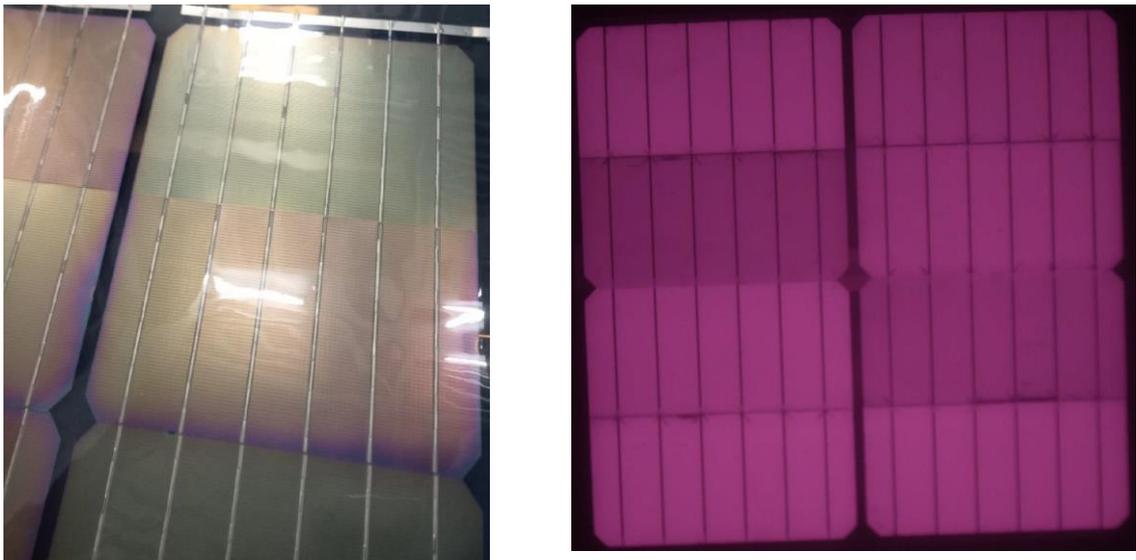


Abb. 27: Bei Ersatz von EVA durch POE wurden die optisch sichtbaren Brüche im Überlappbereich reduziert, jedoch waren sie in EL-Aufnahmen nach wie vor deutlich zu erkennen.



Gruppe 4: POE und «Tannenbaumanordnung»

Bei den vorherigen Gruppen wurden die Zellen nach dem Lasern jeweils wieder an den Laserkanten zusammengesetzt. Die gelaserten Kanten sind geschädigt (Kerbwirkung) und weisen zudem mikroskopische Aufwürfe oder Grate auf, die ihrerseits als Auflagepunkte dienen. Es ist somit ein plausibler Ansatz die mechanische Belastung insgesamt zu reduzieren, indem man jeweils eine gelaserte Waferkante mit einer unbearbeiteten Kante kombiniert. Die Hoffnung auf eine merklich verminderte Bruchneigung bestätigte sich jedoch nicht.

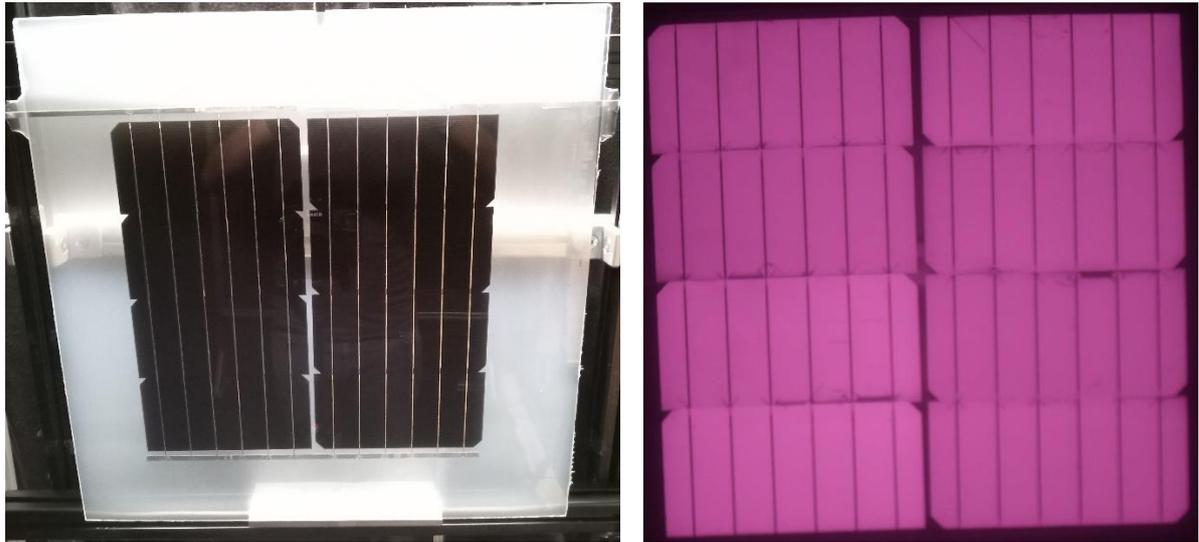


Abb. 28: Gruppe 4 Modul mit «Tannenbaumanordnung», bei welcher jeweils eine gelaserte Waferkante auf eine unbearbeitete Kante trifft. Der Ansatz erbrachte keine wesentliche Verbesserung.

Gruppe 5: POE und Einbettmaterial im Überlappbereich

Das Lötten mit Überlapp führt im Verbindungsbereich der Zellen zu einem in mehrerlei Hinsicht ungünstigen Aufbau. Die Verbinder wirken als erhöhte Auflagepunkte, welche bei Belastung im Laminator direkt auf das harte und spröde Wafermaterial treffen. Zudem wird das aufliegende Wafersegment bei Druck um die Verbinder herumgebogen, da durch die Verbinder ein Zwischenraum geschaffen wird.

Ein Weg um sowohl den Effekt des Durchbiegens im Zwischenraum wie auch den des direkten Kontakts, abzumildern, könnte darin bestehen Einbettmaterial in den Zwischenraum einzubringen. Dies kann im Extremfall darin bestehen Material in Folienform vor der Lamination in die Strings einzubringen wie in Abbildung 29 dargestellt und auch schon in Abschnitt 3.2.9 beschrieben. Der Ansatz könnte deswegen scheitern, weil das Material vor Anwendung des Druckes im Laminator bereits verflüssigt ist und somit beim Druckaufbau verdrängt wird.

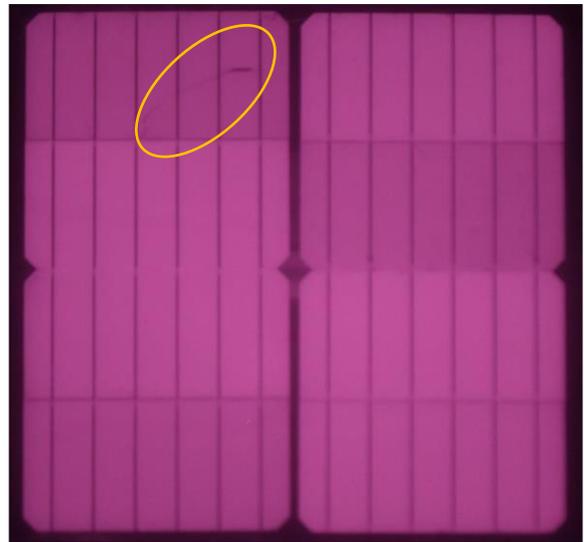


Abb. 29: Gruppe 5 String mit Einbettmaterial im Zwischenraum und resultierendes Modul. Keine Brüche im Überlappbereich durch Lamination, aber durch Schädigung beim Einbringen.

Tatsächlich war es durch die Anwendung des Ansatzes möglich den Bruch durch Lamination vollständig zu vermeiden. Schädigungen wie in Abbildung 29 gezeigt treten deswegen auf, weil die Materialstreifen nach der Versträngung in den sehr kleinen Zwischenraum eingeschoben werden müssen. Von entsprechenden Vorschädigungen abgesehen treten nach der Lamination keine zusätzlichen Brüche auf. Der Erfolg des Ansatzes zeigte sich auch bereits früher (Abschnitt 3.2.9).

Gruppe 6: POE und Verwendung von dünneren und breiteren Verbindern

In Abschnitt 3.2.10 wurde beschrieben, wie lokal verbreiterte Verbinder erfolgreich eingesetzt wurden, um die Erhöhung im Überlappbereich zu mindern. Mit dem zur Verfügung stehenden Stringer können entsprechende strukturierte Verbinder nicht verarbeitet werden. Es können aber Verbinder mit durchgehend geringerer Höhe verwendet werden. Da ein Umrüsten des Stringers auf den neuen Bändchentyp zu aufwändig gewesen wäre, wurden die Verbinderabschnitte manuell zugeschnitten und von Hand aufgelegt, bevor sie im Stringer weiter prozessiert wurden (in Abbildung 22 gezeigt). Statt der sonst benutzten Verbinder des Typs SnPb 60/40 mit einem Querschnitt von 1.0 mm x 0.24 mm ($R_m \sim 217 \text{ N/mm}^2$) wurden solche mit einem breiteren und flacheren Querschnitt von 2.5 mm x 0.10 mm eingesetzt. Insgesamt resultiert ein etwas geringerer Querschnitt mit einer jeweils um einen Faktor von ca. 2.5 verringerten Höhe und vergrößerten Breite.

Auch bei dieser Gruppe führte der Ansatz zu einem deutlich verbesserten Bruchverhalten (Abbildung 30). Bruch im Überlappbereich war optisch nicht zu erkennen, durch Anwendung der Elektrolumineszenz sind jedoch noch Risse nachweisbar, allerdings in viel geringerem Ausmass als bei der Verwendung höherer Verbinder.

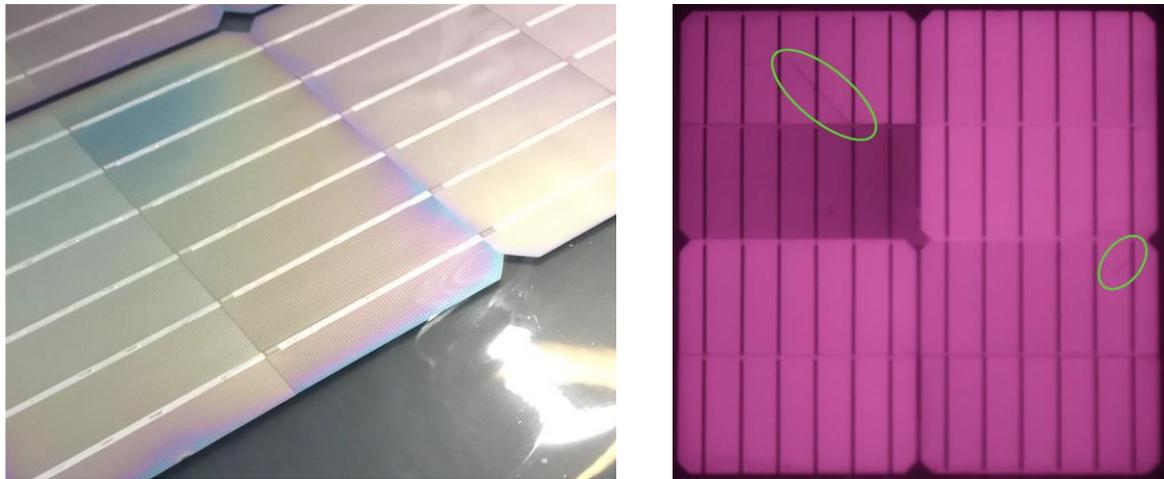


Abb. 30: Einsatz von breiteren Verbindern mit vergleichbarem Querschnitt, wobei die Höhe und die Breite jeweils um einen Faktor von ca. 2.5 verringert, bzw. erhöht ist.

Die Reduktion der Bändchendicke hat somit einen sehr deutlichen positiven Effekt, wie auch bereits in früheren Versuchen gesehen (3.2.10), wobei hier in geringem Umfang jedoch auch Bruch durch den Laminationsschritt erzeugt wurde.

Wie weiter unten beim Vergleich der elektrischen Daten gezeigt wird, wirkt sich das breite Bändchen (2.5 mm) allerdings auch merklich negativ aus. Zum einen ist der Strom geringer, zum anderen ist auch der Füllfaktor reduziert, was durch die im Vergleich zum Bändchen, schmalen Busbars erklärt werden kann. Somit ist die gezeigte Verwendung von durchgehend breiten Bändchen keine attraktive Option, sehr wohl aber der Ansatz mit lokal verbreiterten Querschnitten (3.2.10).

Gruppe 7: POE und erhöhte Materialmenge im Überlappbereich

Die Ergebnisse der Gruppen 6 und 7 zeigten die besten Ergebnisse, wobei nur in Gruppe 6 Bruch im Überlappbereich durch die Lamination vollständig vermieden werden konnte.

Das Ergebnis unterstreicht die Wichtigkeit von Einbettmaterial im Überlappbereich der Zellen. Um den positiven Effekt noch zu verstärken und um zudem den Grundgedanken einer Veröffentlichung [1] aufzunehmen wurde an die Stösse der Waferkanten jeweils unten und oben ein zusätzlicher Streifen Einbettmaterial mit Breite 2.5 aufgelegt (Abbildung 31). Dies einerseits, um noch mehr Material in diesen kritischen Bereich zu bringen und andererseits, gemäss dem Ansatz der Publikation, um die Freiräume zwischen Zelle und Folienmaterial durch die Schindelung zu verringern und somit bei Druck Unterstützung zu bieten. Dies erfolgte einerseits in Gruppe 7 in Verbindung mit dem Vorgehen in Gruppe 6 und in Gruppe 8 ohne diesen zusätzlichen Ansatz, um die Auswirkung separat zu betrachten.

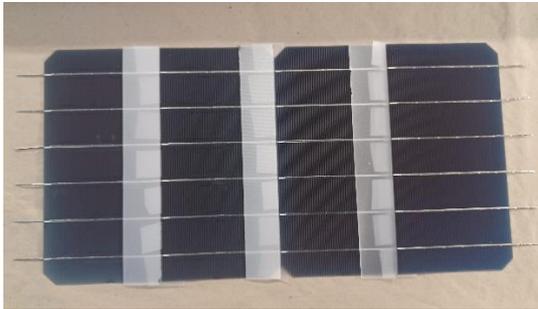


Abb. 31: Links: Kombination des Ansatzes aus Gruppe 6 mit zusätzlichen Folienstreifen von ca. 2.5 cm Breite an die Stösse der Zellenkanten angeschoben, um die die Freiräume zwischen Zelle und Auflage (Schindeleffekt) zu minimieren. Rechts: Verringerung des Lötbereiches durch eingeschränktes Aufbringen von Flussmittel (gezeigt: Testmittel mit Fluxspuren).

Zudem wurde bei dieser Gruppe der Lötbereich der Bändchen auf den Busbars verringert (Abbildung 31 rechts). Ziel dieser Massnahme ist, das Einbringen von Material in den Zwischenbereich zu vereinfachen, sowohl in den Experimenten mit manuellem Einbringen, aber auch durch einen breiteren Spalt, in welchen flüssiges Material einfließen kann, bevor der Druckaufbau im Laminator einsetzt. Beim Vergleich der elektrischen Daten mit jenen der anderen Gruppen (weiter unten) zeigte sich kein negativer Effekt.

Mit diesem Ansatz ist es (wie auch bei Gruppe 5) möglich Minimodule herzustellen, ohne dass durch die Lamination Bruch verursacht wird.

Gruppe 8: Zusätzliches POE nur durch Querstreifen an den Stössen der Zellkanten

In Gruppe 7 wurden zwei Massnahmen, Einschleiben in den Zwischenraum und Querstreifen an den Stössen, kombiniert. In Gruppe 8 wurde die Wirkung der Querstreifen alleine überprüft, ähnlich zum Ansatz wie in [1] beschrieben.

Während bei den besten Gruppen (5 und 7) Material direkt in den Überlapp eingbracht wurde, kamen bei Gruppe 8 nur die Querstreifen an den Stössen der Zellkanten zum Einsatz, siehe auch Abb. 31. Die Querstreifen alleine zeigten keinen erkennbar positiven Effekt auf das Bruchverhalten, sondern ergaben Resultate vergleichbar zu jenen in den Gruppen 1-3.

Dies belegt zwar einerseits die Wichtigkeit des Einbettmaterials im Überlappbereich, bedeutet aber andererseits nicht, dass der Ansatz in Gruppe 8 prinzipiell nicht funktioniert. Im Hinblick auf die Ergebnisse dieser Arbeit, sind die Effekte aus [1] jedoch eventuell anders zu deuten. Dort wird beschrieben, dass der positive Effekt auf das Bruchverhalten durch die Geometrie des Folienmaterials vor dem Laminierprozess bedingt wird. In den Gruppen 5 und 7 und den entsprechenden früheren Versuchen, wird ein positiver Effekt allein und sehr deutlich durch Material im Übergangsbereich erzielt. Dabei wird durch das Vorgehen vor der Lamination eine ähnliche Unterfütterung erreicht, wie in [1] beschrieben. Die Unterfütterung alleine, wie in Gruppe 8 getestet und dem Ansatz in [1] entsprechend, erbrachte bei den beschriebenen Versuchen jedoch keinen merklich positiven Effekt auf das Bruchverhalten.

Mehrere Erklärungen scheinen möglich. Die thermomechanischen Eigenschaften verschiedener Einbettmaterialien unterscheiden sich. Es ist denkbar, dass die Eigenschaften der Materialien in der beschriebenen Quelle [1] so von denen des hier benutzten POE abweichen, dass die Unterfütterung den in der zitierten Veröffentlichung beschrieben positiven Effekt hervorruft. Eine andere Möglichkeit wäre, dass das dort benutzte Material (durch die Strukturierung der Folie) flüssiger sein könnte als bei



den hier beschriebenen Versuchen, und vor Einwirkung des Laminationsdrucks in den Überlappbereich eindringen kann. Auch die in 3.2.9. beschriebene Verwendung von gemischten Materialien, wie sie auch von Jinko Solar beschrieben wurde, könnte zu diesem Ansatz passen, wenn man zusätzliches Material in die Nähe des Überlappbereichs einbringt, welches vor oder bei Einsetzen des Prozessdrucks dünnflüssiger ist als das restliche Einbettmaterial. Mit dem jetzigen Stand der Erkenntnisse sind das jedoch nur Hypothesen, welche in weiteren Versuchen geklärt werden müssten.

3.2.13 Eigenschaften der bifazialen PERC-Minimodule (ISC Konstanz Stringer)

Mechanical load tests wurden ausführlich am Grossmodul durchgeführt, wie in 3.2.11 beschrieben. Das Modul entsprach in seinem Aufbau mit multikristallinen und monofazialen Zellen zwar nicht den Vorgaben, jedoch kann die mechanische Stabilität auch mit diesem Modul demonstriert werden. Aufgrund des rahmenlosen Aufbaus kam es bei Belastung zu einer sehr starken Verformung. Auch nach zahlreichen Wiederholungen zeigten sich keine Anzeichen von Bruch oder einer Leistungsdegradation.

Materialprüfungen in der Klimakammer wurden, wenn auch mit anderen Materialien als bei den hier beschriebenen Mini-Modulen, aufgebaut durchgeführt. Die funktionsfähigen Demonstratoren mit PERC-Zellen wurden der beschriebenen Verzögerungen erst zu einem sehr späten Zeitpunkt im Projektverlauf dargestellt. Klimakammer-Versuche mit diesen Modulen laufen zum Zeitpunkt der Berichterstellung, diese sind jedoch sehr langwierig und umfassen mehrere Zyklen von jeweils 1000 Stunden Dauer (ca. 1.5 Monate).

Die Minimodule aus den obigen Versuchsreihen wurden elektrisch charakterisiert und auch mit einer entsprechenden Referenz verglichen.



Abb. 32: 4-zelliges Referenzmodul mit klassischer Verschaltung zum Vergleich mit den Mini-Modulen aus jeweils 8 Halbzellen.

Tabelle: Elektrische Leistungsdaten von Mini-Modulen aus den obigen Serien und der Referenz.

| Group | Impp [A] | Umpp [V] | Pmpp [W] | Isc [A] | Uoc [V] | FF [%] | CTM [%] |
|---------------|----------|----------|----------|---------|---------|--------|---------|
| M1 | 4.94 | 4.50 | 22.23 | 5.22 | 5.38 | 79.16 | 2.05 |
| M2 | 4.93 | 4.50 | 22.19 | 5.24 | 5.38 | 78.76 | 2.20 |
| M3 | 5.03 | 4.48 | 22.50 | 5.28 | 5.37 | 79.44 | 0.83 |
| M4 | 5.02 | 4.49 | 22.51 | 5.27 | 5.37 | 79.61 | 0.80 |
| M5 | 4.97 | 4.49 | 22.30 | 5.19 | 5.40 | 79.56 | 1.71 |
| M6 | 4.69 | 4.52 | 21.20 | 5.04 | 5.36 | 78.57 | 6.57 |
| Ref. 4 Zeller | 10.01 | 2.17 | 21.70 | 10.56 | 2.65 | 77.49 | 4.35 |



Die charakteristischen Messdaten der Mini-Module aus den obigen Serien zeigen, dass die Verschaltung mit überlappendem Verlöten im Hinblick auf die Leistung sinnvoll ist und der klassischen Verschaltung überlegen sein kann. Die Gruppe M6 mit breiteren und weniger dicken Verbindern war im Hinblick auf das Bruchverhalten günstig, zeigt jedoch hier Nachteile durch einen geringeren Strom (Abschattung) und auch einen geringeren Füllfaktor. Dieser wird durch den etwas verringerten Querschnitt der Bändchen, aber auch durch den höheren Strom der kompletten, nicht-halbierten Zellen bedingt. Insgesamt werden durch die Gruppen mit überlappendem Löten sehr hohe Füllfaktoren erzielt, die deutlich höher liegen als jene der Referenz. Der CTM-loss ist, von der Gruppe 67 mit den breiteren Verbindern abgesehen, ebenfalls niedriger als bei der Referenz und erfüllt die Vorgaben des Meilensteins M4.2 und des Deliverables D4.2. (siehe Abschnitt 3.2.15), bis auf den Bifazialitätsfaktor. Dies ist jedoch den eingesetzten p-PERC Zellen geschuldet, die eine Bifazialität von nur ca. 60 % aufweisen, statt den etwa 90 % der ursprünglich vorgesehenen n-PERT Zellen.

3.2.14 Grossmodul mit bifazialen PERC-Zellen (ISC Konstanz Stringer)



Abb. 32: Auflegen der Strings auf das frontseitige Glas und die frontseitige POE-Lage. Bei diesem Arbeitsschritt wurde auch das Verschalten der Strings ausgeführt.

Aufbauend auf den Ergebnissen wie in 3.2.12 beschrieben wurde analog zu Gruppe 7 ein Grossmodul aufgebaut (Abbildung 32). Die jetzt längeren Strings wurden aufgrund ihrer Empfindlichkeit nicht einzeln mittels EL auf Bruch vor der Lamination untersucht.

Durch den industrietauglichen Stringer verlief das Herstellen der Strings selbst sehr zügig und problemlos, nachdem die Einstellung bereits in den Vorversuchen erfolgte. Die Stings wurden manuell



auf einen Leuchttisch zum «Lay-Up» transferiert, auf welchem das frontseitige Glas (3.2 mm) und die frontseitige POE-Folie positioniert waren (Abbildung 32). Dort erfolgte auch sukzessive das manuelle Verschalten der Strings («Bussing»). Rückseitig wurde ein transparentes Backsheet aufgebracht, wie es auch bei den Mini-Modulen eingesetzt wurde. Das Modullayout entspricht dem für Halbzellen typischen Aufbau mit zwei parallel geschalteten Modulhälften, mit dreisegmentigen Anschlussdosen.

Das Layout wurde durch die Abmessungen der zur Verfügung stehenden Gläser eingeschränkt. Beim eingesetzten Waferformat M6 war es nicht möglich ein Modul aus 120 Halbzellen, entsprechend 60 ganzen Zellen aufzubauen. Stattdessen wurden insgesamt 12 Halbzellen weniger, entsprechend 108 Halbzellen, verbaut.

Das Modul ist bei optischer Begutachtung ohne erkennbare Fehler oder Schädigungen, auch bei sehr genauer Untersuchung der Überlappbereiche.



Abb. 33: Bifaziales Grossmodul aus PERC-Zellen welches, basierend auf den Ergebnissen der Vorversuche mit Mini-Modulen, hergestellt wurde.

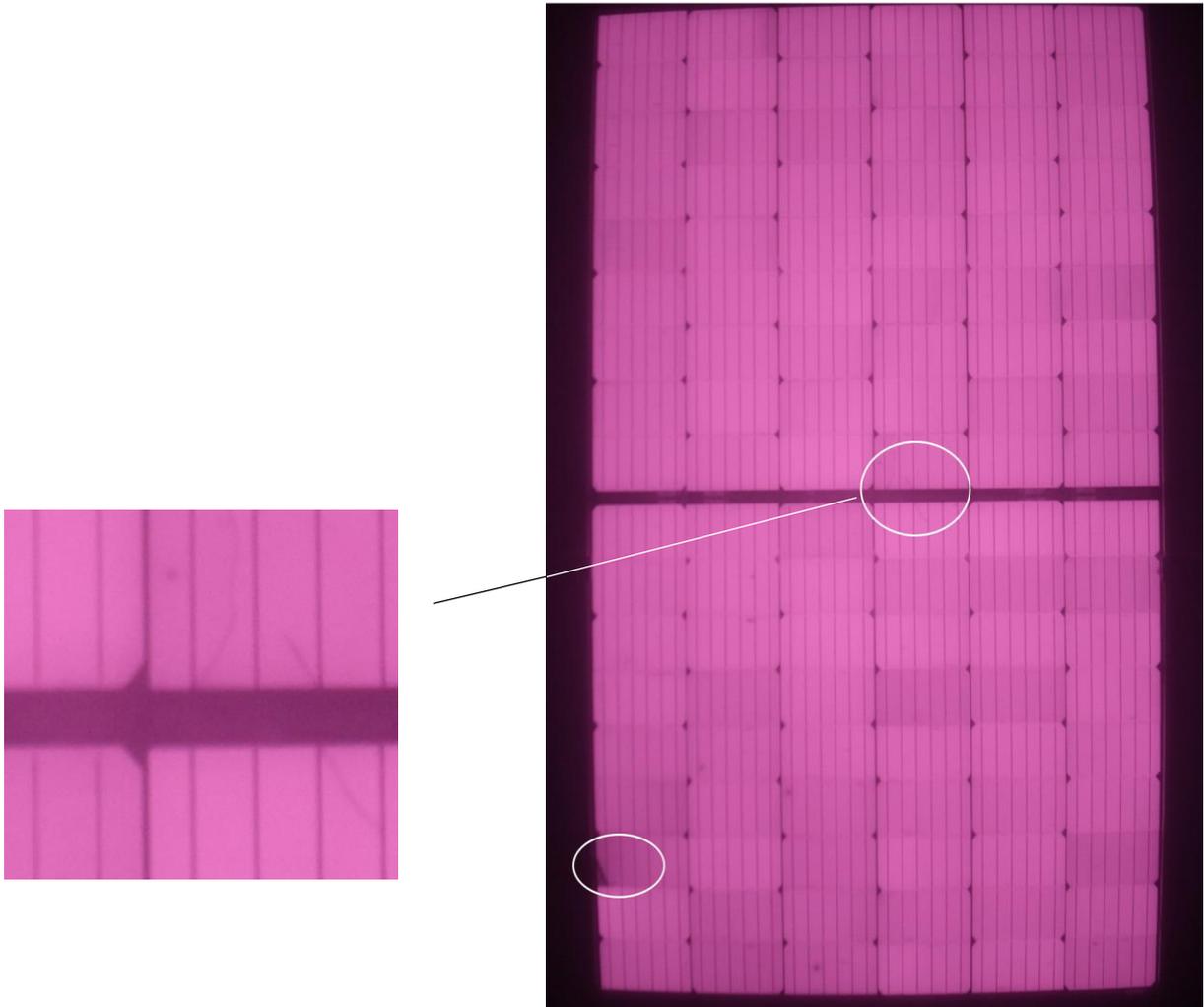


Abb. 33: EL-Aufnahme des bifazialen Grossmoduls aus PERC-Zellen. Brüche durch Handlingfehler sind weiss markiert, die weiteren Unregelmässigkeiten sind Artefakte auf den Zellen. Es sind an keiner Stelle weitere Brüche, insbesondere keine Brüche durch das Löten mit Überlapp, vorhanden.

Auf den EL-Aufnahmen sind zwei Stellen mit Schädigungen erkennbar. In beiden Fällen ist die Ursache bekannt und durch das Handling beim Modulaufbau bedingt. Die Schädigung im zentralen Bereich erfolgte beim Verschalten der Strings («Bussing»), unmittelbar nach Aufnahme von Abbildung 31. Bei diesem Arbeitsschritt wird eine mit Teflon überzogene Schiene unter den Querverbinder geschoben, um ein Aufschmelzen des Einbettmaterials beim Verlöten zu verhindern. Beim Einschieben der Schiene unter den Querverbinder erfolgte eine Schädigung des Bereichs, welche sich durch die Lamination verstärkte. Die Schädigung an der Kante erfolgte am fertigen Laminat durch Abrutschen, als das über die Glaskante hinaus überstehende Kunststoffmaterial mit einem Cuttermesser entfernt wurde.

Die IV-Messkurve des Moduls (Abbildung 34) wurde mit dem Halm-Modulflasher des ISC Konstanz aufgenommen und zeigt keine Hinweise auf einen «Mismatch» der Zellen oder Leistungsunterschiede der Strings.

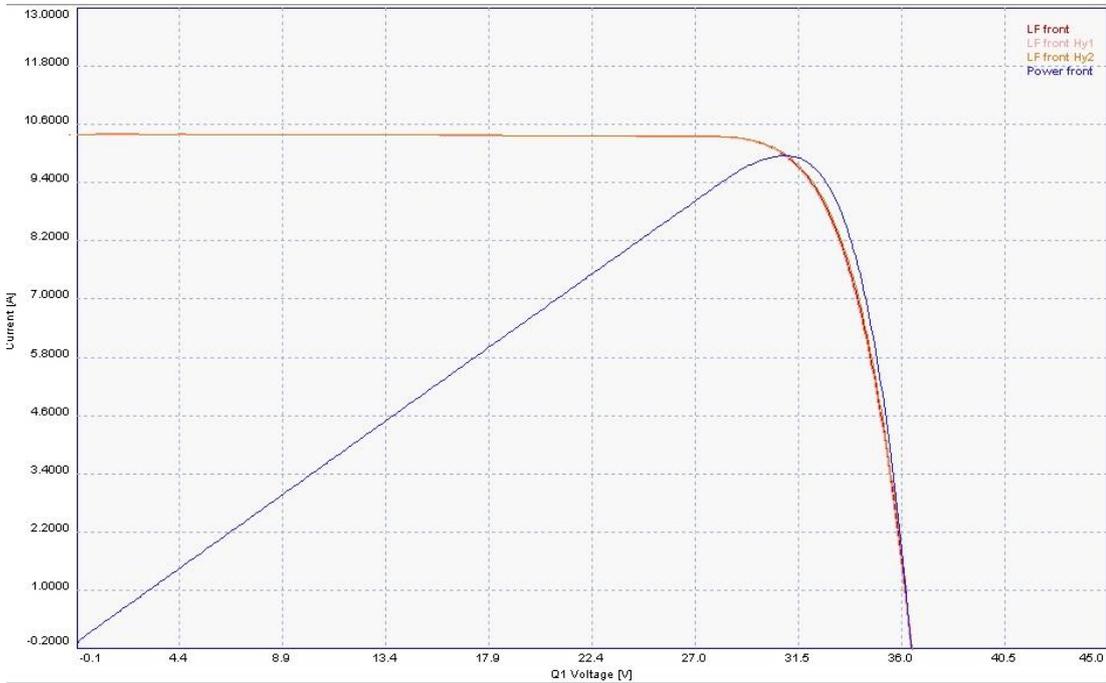


Abb. 34: IV-Messkurve des Moduls aus Abbildung 34, aufgenommen mit dem Halm Modulflasher am ISC Konstanz.

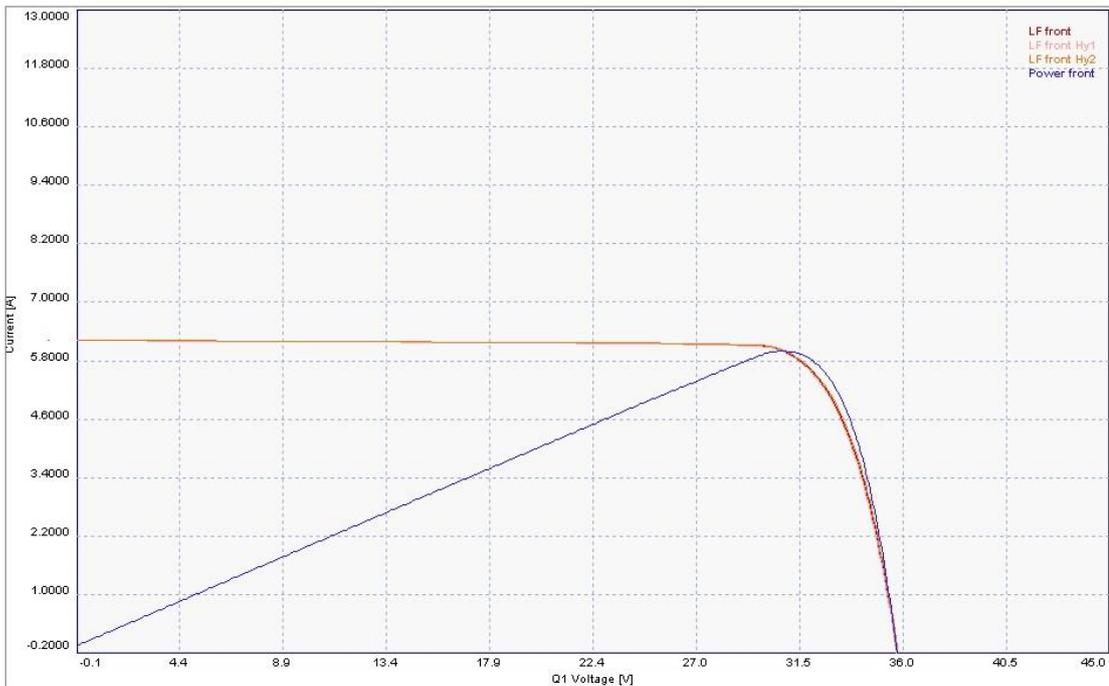


Abb. 35: IV-Messkurve der Modulrückseite aus Abbildung 34, aufgenommen mit dem Halm Modulflasher am ISC Konstanz.



Das beschriebene grosse Modul wurde mit Zellen aus einer Zellcharge mit etwas höherem Wirkungsgrad (21.0 %) als im Falle der Minimodule (20.7 %) hergestellt. Beide unterscheiden sich im Wirkungsgrad somit um 0.3 % absolut.

Tabelle: Elektrische Daten des Moduls, gemessen am ISC Konstanz.

| Impp [A] | Umpp [V] | Pmpp [W] | Isc [A] | Uoc [V] | FF [%] | CTM [%] |
|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|
| 10.00 | 30.83 | 308.39 | 10.414 | 36.4 | 81.35 | 0.70 |

3.2.15 Meilensteine und Deliverables

In 3.2.13 und in 3.2.15 wurden die elektrischen Messdaten der Mini-Module und des Grossmoduls angegeben, die aus den p-PERC Zellen in Zusammenarbeit mit dem ISC Konstanz hergestellt wurden.

Diese Daten sind mit der Erfüllung der Meilensteine und Deliverables verknüpft, die jeweils für die entsprechenden Demonstratoren definiert sind.

M4.2 und D4.1 bezogen auf Demonstratoren in Form von Minimodulen

M4.2: Mini module with seamless soldering

Bifacial mini-module demonstrator with seamless soldered cells with < 3 % CTM loss and > 92% bifacial factor.

D4.1: Mini module with seamless soldering interconnections

Successful application of the seamless soldering process to non-optimized solar cells

Das Deliverable D4.2 wurde somit klar erreicht. Im Sinne des Projekts wird aufgrund der offensichtlichen Bruchgefährdung die erfolgreiche Anwendung insbesondere als Demonstrator ohne Bruch verstanden.

Der CTM-loss des Meilensteins M4.2 wurde ebenfalls erreicht, wenn auch wegen der beschriebenen Verzögerungen erst zu einem späten Zeitpunkt im Projekt. Mit überlappendem Lötverfahren wurde ein deutlich geringerer CTM-loss im Vergleich zur Referenz erreicht. Insgesamt konnten mit dem Verfahren elektrisch gute Module mit einem insbesondere hohen Füllfaktor hergestellt werden.

Nicht erfüllt wurden die Vorgaben bezüglich der Bifazialität. Der angestrebte Bifazialitätsfaktor von 90 % konnte mit den schliesslich verwendeten p-PERC Zellen eines externen Anbieters nicht erreicht werden, da deren Bifazialitätsgrad mit gut 60 %, deutlich geringer war als die 90 % der vorgesehenen PERT-Zellen. Dies ist somit jedoch den Zellen geschuldet und hängt nicht mit der Verschaltung zusammen.



Tabelle: Elektrische Leistungsdaten von Mini-Modulen aus den obigen Serien und der Referenz.

| Group | Imp [A] | Umpp [V] | Pmpp [W] | Isc [A] | Uoc [V] | FF [%] | CTM [%] |
|---------------|---------|----------|----------|---------|---------|--------|---------|
| M1 | 4.94 | 4.50 | 22.23 | 5.22 | 5.38 | 79.16 | 2.05 |
| M2 | 4.93 | 4.50 | 22.19 | 5.24 | 5.38 | 78.76 | 2.20 |
| M3 | 5.03 | 4.48 | 22.50 | 5.28 | 5.37 | 79.44 | 0.83 |
| M4 | 5.02 | 4.49 | 22.51 | 5.27 | 5.37 | 79.61 | 0.80 |
| M5 | 4.97 | 4.49 | 22.30 | 5.19 | 5.40 | 79.56 | 1.71 |
| M6 | 4.69 | 4.52 | 21.20 | 5.04 | 5.36 | 78.57 | 6.57 |
| Ref. 4 Zeller | 10.01 | 2.17 | 21.70 | 10.56 | 2.65 | 77.49 | 4.35 |

Der Meilenstein M4.4 und das Deliverable D4.4 beziehen sich auf einen Demonstrator in Form eines grossen «Full-Size» Moduls. Dieses wurde wie in 3.2.14 beschrieben in Zusammenarbeit mit dem ISC Konstanz aufgebaut. Beim Aufbau auf einem industrietauglichen Stringer wurden die gleichen p-PERC Zellen wie bei den zuvor beschriebenen Mini-Modulen eingesetzt, die jedoch aus einer Charge mit einem etwas höheren Wirkungsgrad stammen 21.0 % statt 20.7 %. Das Grossmodul besteht aus 108 Halbzellen, entsprechend 54 kompletten Solarzellen.

Die Beschreibung des entsprechenden Meilensteins M4.4 und Deliverables D4.4 sind identisch und stellen eine Übertragung der auf die Mini-Module bezogenen Ziele auf ein grösseres Format dar.

M4.4 und D4.4 bezogen auf Demonstratoren in Form eines grossen Demonstrators

| |
|--|
| <i>M4.4: Bifacial full-size module by seamless soldering</i> |
| <i>Bifacial full-size module by seamless soldering demonstrator with < 3 % CTM loss and > 0.92 bifacial factor</i> |
| <i>D4.4: Bifacial full-size module with seamless soldering interconnection</i> |
| <i>Bifacial full-size module by seamless soldering demonstrator with < 3 % CTM loss and > 0.92 bifacial factor</i> |

Wie in 3.2.14 gezeigt konnten die Lösungen bezüglich des Bruchverhaltens von den Mini-Modulen auf das grosse «Full-Size» Format übertragen werden.

Die elektrischen Eigenschaften (Messungen ISC Konstanz) entsprechen im Wesentlichen jenen der kleineren Module, wobei Zellen mit einem um 0.3 % absolut höheren Wirkungsgrad eingesetzt wurden. Hervorzuheben sind ein nochmals besserer Füllfaktor und ein CTM-loss von 0.7 %.

Tabelle: Elektrische Daten des «Full-Size» Moduls, gemessen am ISC Konstanz.

| Imp [A] | Umpp [V] | Pmpp [W] | Isc [A] | Uoc [V] | FF [%] | CTM [%] |
|---------|----------|----------|---------|---------|--------|---------|
| 10.00 | 30.83 | 308.39 | 10.414 | 36.4 | 81.35 | 0.70 |

Wie bereits bei den Mini-Modulen konnten somit nur die Vorgaben bezüglich der Bifazialität nicht erfüllt werden, was aber durch den Typ der schliesslich eingesetzten Solarzellen bedingt ist. Der geringere Bifazialitätsfaktor wird nicht durch die Art der Verschaltung verursacht.



4 Schlussfolgerungen und Fazit

Im Rahmen des europäischen Solar-Era.net-Projekts AmBi PV wurden Verschaltungstechnologien für moderne Zelltypen untersucht. Der Fokus des nationalen Teilprojekts lag auf den Arbeiten zum überlappenden Löten.

Das Verfahren des überlappenden Lötens in verschiedenen Varianten und Bezeichnungen wird oder wurde bereits von grossen Herstellern eingesetzt. Obwohl der Ansatz somit prinzipiell bekannt ist, gibt es nur sehr wenig Information über die technischen Lösungen im Detail und fast keine wissenschaftlichen Veröffentlichungen zum Thema. Die verfügbaren Informationen beschränken sich im Wesentlichen auf Mitteilungen der Hersteller im Internet, die einerseits die Umsetzung der Technik in ihren Produkten bewerben, andererseits aber auch nicht zu viel preisgeben wollen. Jeder der Hersteller setzt dabei auf jeweils im Detail unterschiedliche Lösungen.

Somit gibt es für Interessenten an der Technik derzeit insbesondere keine Lösung «von der Stange», die zum Beispiel über einen Maschinenbauer verfügbar wäre.

Schon allein die Umsetzung durch grosse Hersteller zeigt dabei, dass es sich um eine potenziell interessante Verbindungstechnologie handelt. Dies, sowie die fehlende Verfügbarkeit von fertigen Lösungen und auch schon das Fehlen von Informationen, motiviert die Untersuchung im Rahmen dieses Projektes.

Ziel ist eine möglichst umfassende Zusammenstellung von Informationen zum Thema, was eine Literaturstudie (Kapitel 3.1) beinhaltet, vor allem aber auch praktische Erfahrungen aus Versuchen (Kapitel 3.2). Bei der Erstellung des Berichtes werden bewusst alle Ansätze aufgeführt, auch solche welche zu keiner erkennbaren Verbesserung führten.

Die Präsentation der Versuchsergebnisse ist sinnvoll, da sich, trotz der spezifischen Eigenheiten der verschiedenen Ansätze, aufgrund des Überlapps grundsätzlich ähnliche Problemstellungen ergeben, die für eine reale Umsetzung gelöst werden müssen. Selbst wenn Lösungen für diese Problemstellungen bekannt sind, müssten diese für eine Anwendung in der Produktion an spezifische Produktionsprozesse angepasst werden.

Die Herausforderungen beim überlappenden Löten sind offensichtlich und mindestens zwei grosse Hersteller sind inzwischen von dem Verfahren auch wieder abgerückt. Bei Aufnahme der Experimente bestätigten sich die Annahmen. Bruch an den überlappenden Zellenkanten trat zu praktisch 100 % auf, wenn die Standardverfahren im Modulbau, bis auf den «negative gap», übernommen wurden.

Zahlreiche Versuchsreihen wurden durchgeführt, um verschiedene Ansätze auf ihre Eignung hin zu untersuchen. Die Versuche erfolgten zunächst überwiegend an Dummy-Zellen und mit manuellem, bzw. halbautomatischem Verstricken. Später wurden die gewonnenen Erkenntnisse auf dünneren und empfindlichen bifazialen PERC-Zellen angewandt. In der Endphase der Arbeiten wurden das überlappende Löten dann auf einem industrietauglichen Stringer beim Projektpartner ISC Konstanz durchgeführt, wo auch der komplette sonstige Modulaufbau stattfand.

Im Rahmen der Versuche wurden Wege gefunden Bruch im Überlappbereich nach der Lamination zu unterdrücken, bzw. vollständig zu vermeiden. Einen deutlichen positiven Effekt erbrachte die lokale Reduzierung der Verbinderdicke im Übergangsbereich der Zellen. Als nochmals effektiver erwies sich der Ansatz Einbettmaterial in den Überlapp einzubringen. Hierdurch konnte entsprechender Bruch vollständig vermieden werden, auch wenn auf eine lokale Reduzierung der Verbinderdicke verzichtet wurde.

In der Folge war es schliesslich möglich Mini- und Grossmodule herzustellen, ohne dass nach der Lamination Bruch optisch oder im EL erkennbar war. Die elektrischen Eigenschaften erwiesen sich als gut, der angestrebte CTM-loss wurde erreicht. Auch die mechanischen Eigenschaften der überlappenden Verbindung erwiesen sich als unkritisch. Der angestrebte Bifazialitätsfaktor von 90 % konnte mit den schliesslich verwendeten p-PERC Zellen eines externen Anbieters nicht erreicht



werden, da deren Bifazialitätsgrad mit gut 60 %, deutlich geringer war als die 90 % der vorgesehenen PERT-Zellen. Dies ist somit jedoch den Zellen geschuldet und hängt nicht mit der Art der Verschaltung zusammen.

Die gefundenen Lösungsansätze stehen bereit, um in eine industrietaugliche Umsetzung überführt zu werden. Für eine reale Umsetzung in der Fertigung müssen die Ansätze an das jeweilige Produktions-equipment angepasst werden. Von der jeweiligen Umsetzung würde dann auch die Bruchrate einer industriellen Fertigung abhängen.

Der Trend zu zahlreicheren Verbindern mit kleinerem Querschnitt ist günstig für eine zukünftige Anwendung des überlappenden Lötens, da die Verbinderdicke einen deutlichen Einfluss auf das Bruchverhalten hat.

5 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Es war im Projektverlauf möglich die wesentlichen Herausforderungen beim überlappenden Lötens erfolgreich anzugehen und Module, ohne hieraus resultierenden Bruch, herzustellen. Potenzielle Lösungsansätze wurden evaluiert, sowie erfolgreiche Optionen identifiziert und verifiziert.

Aufgrund der geringen Menge an Modulen, die im Rahmen eines solchen Projekts hergestellt werden können, ist keine belastbare Aussage über das zu erwartende Bruchverhalten von Modulen aus einer industriellen Produktion möglich. Dies gilt insbesondere auch, weil die angewandten Ansätze zur Bruchreduktion auch in einer industrietauglichen, automatisierten Form umgesetzt werden müssten, die sich jeweils unterscheiden wird.

Die Relevanz von Untersuchungen zum Themenbereich überlappendes Lötens hängt insbesondere davon ab wie sich das Interesse in dieser Hinsicht generell entwickelt. Zu Projektbeginn kündigten mehrere grosse und renommierte Modulhersteller an überlappendes Lötens in sich jeweils etwas unterscheidenden Varianten für Hochleistungsmodule einzusetzen. In der Zwischenzeit rückten einige dieser Hersteller jedoch wieder von dieser Technik ab, wobei zum Teil sogar offen gesagt wurde, dass die Nachteile gegenüber den Vorteilen überwiegen. Es ist naheliegend anzunehmen, dass die Nachteile in Form von Schädigungen und Komplikationen beim Modulbau auftreten.

Andererseits ist die Tendenz in Richtung zunehmender Busbaranzahl mit immer kleineren Verbinder- querschnitten günstig für den Ansatz. Dies gilt insbesondere auch für Ansätze wie SmartWire, bei welchem das Einbringen von Materialzwischenlagen einfach erfolgen kann. Insofern kann das Interesse am überlappenden Lötens durchaus auch stark zunehmen.

Die Entwicklung dieser Technologie lag bisher bei den einzelnen umsetzenden Firmen und führte zu jeweils spezifischen Lösungen, welche nur durch die Firmen selbst genutzt werden. Es sind derzeit somit keine auf das überlappende Lötens angepassten Produktionsprozesse, Materialien oder Anlagen verfügbar, welche potenziellen Interessenten eine einfache Umsetzung ermöglichen würden. Der vorliegende Bericht kann, als Zusammenstellung von Informationen zum Thema, Interessenten bei der möglichen Umsetzung unterstützen.



6 Nationale und internationale Zusammenarbeit

In diesem Bericht liegt der Fokus auf Aktivitäten im Hinblick auf das «überlappende Lötten», da dieses Thema den Schwerpunkt des nationalen Schweizer Teilprojekts im Rahmen des europäischen Solar-era.net Projekts darstellt. Die Arbeiten welche überwiegend in den Teilprojekten der anderen Projektpartner bearbeitet wurden, werden im transnationalen Abschlussbericht zusammengefasst dargestellt.

Die Arbeit auf dem Projekt ermöglichte es der ZHAW ihr Know-how im Bereich der Zell- und Modultechnologie weiter auszubauen. Dadurch bleibt die ZHAW als Kooperationspartner für nationale und internationale Institutionen und Firmen interessant und kann die Schweiz im Bereich der angewandten Forschung in diesem Segment vertreten.

Die internationale Zusammenarbeit mit Bezug auf das Schweizer Teilprojekt war insbesondere mit dem ISC Konstanz sehr intensiv. Dort stand ein Stringer nach dem Stand der Technik zur Verfügung, auf welchem Strings durch überlappendem Lötten in gemeinsamen Experimenten hergestellt werden konnten. Der Stringer ermöglicht kontaktloses Lötten auf einer produktionstauglichen Anlage, bei welcher sich auch ein «negativer Gap», entsprechend dem Überlapp, einstellen lässt. Die Zusammenarbeit umfasste aber auch die Experimentplanung, das Zellenlayout, sowie die eigentliche Herstellung und Charakterisierung der Module.

Gleich zu Beginn des Projekts wurden zusammen mit Zellenhersteller SolAround (ISR) und dem ISC Konstanz (D) geeignete Zellenlayouts diskutiert. Entsprechende Solarzellen wurden in geringer Stückzahl noch von SolAround geliefert, zu einer Lieferung im grösseren Umfang kam es jedoch nicht mehr. Vom PCCL in Leoben (A) wurde POE-Material erhalten, welches sich im Überlappbereich als vorteilhaft im Vergleich zu EVA erwies. Mit dem PCCL konnten für das Teilprojekt relevante Materialfragen diskutiert werden. Insbesondere das PCCL, mit dem übergreifenden Themenbereich der Materialien und Simulation, verfasste in Erstautorenschaft unter Einbindung der Partner eine grosse Zahl von Veröffentlichungen.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass trotz der vollkommenen Umarbeitung des Projektplans, aufgrund der unter 5. beschriebenen Gegebenheiten, die internationale Zusammenarbeit ein wesentlicher Faktor war, ohne welche die gesetzten Ziele nicht erreicht worden wären.

7 Publikationen

Peer reviewed conference paper

Margit Lang, Gernot Oreski, Eric Helfer, Andreas Halm, Markus Klenk and Peter Fuchs. "FEM simulation of deformations and stresses in strings of shingled solar cells under mechanical and thermal loading" AIP Conference Proceedings 2709, 020008 (2022), <https://doi.org/10.1063/5.0126221> [16]

Presentation

M. Lang: FEM simulation of deformations and stresses in strings of shingled solar cells under mechanical and thermal loading, Metallization Interconnection Workshop 2021, 39th EUPVSEC, 2022, Session 4AV.2.27



Poster Presentations

M. Lang, G. Oreski, P. Fuchs, E. Helfer, A. Halm, M. Klenk, "FEM Simulation of Influence of Different Polymeric Encapsulation Materials and Backsheets on Deformations in Strings of Shingled Solar Cells under Mechanical and Thermal Loading", 39th EUPVSEC, 2022, Session 3DV.3.21

E. Helfer, A. Macher, G. Oreski, M. Lang, P. Fuchs, "Properties of Transparent Backsheets Based on Polypropylene", 39th EUPVSEC, 2022, Session 3DV.3.10

R. Hildebrand, M. Klenk, H. Nussbaumer, "Bifacial activities at the ZHAW", Bifi PV 2022, 20-22.Oktober 2022, Ankara

T. Messmer, H. Chu, V.D. Mihailitchi, R. Roescu, J. Libal, A. Halm, "Interconnection Approach for Busbar-Less IBC Cells Based on Printed Solder Paste", 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2022, Paper DOI: 10.4229/WCPEC-82022-3DV.1.21 [17]

M. Lang, G. Oreski, P. Fuchs, E. Helfer, M. Klenk, A. Halm, "FEM Simulation of Deformations in Strings of Shingled Solar Cells under Mechanical and Thermal Loading", 38th EUPVSEC, 2021, Session 4AV.2.27

Upcoming conferences

EuroSIME-4th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, 16-19 April 2023, Graz, Austria

Poster Contribution: M. Lang et al., "FEM simulations of influence of different polymeric module materials and layouts on thermomechanical deformations in strings of shingled solar cells"

EU PVSEC 2023

18-22 September 2023, Lisbon, Portugal

Poster contribution :E.Helfer, M. Lang, G. Oreski, J. Petro, M. Klenk, A. Halm, "Long-term stability of transparent polypropylene backsheets

Additional dissemination activities

International dissemination activities IEA Task 13

Additional working period from 2022 to 2025: New subtask on degradation modes of new PV module technologies

8 Literaturverzeichnis

- [1] H. Schulte-Huxel, S. Blankemeyer, A. Morlier, R. Brendel, und M. Köntges, „Interconnect-shingling: Maximizing the active module area with conventional module processes“, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Bd. 200, S. 109991, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.solmat.2019.109991.



- [2] Imprint, A. us, T. and Conditions, und P. and C. Policy, „A True Tiger | TaiyangNews“. <http://taiyangnews.info/opinion/a-true-tiger/> (zugegriffen 28. Oktober 2021).
- [3] K. Pickerel, „What are shingled solar modules?“, *Solar Power World*, 6. Juli 2020. <https://www.solarpowerworldonline.com/2020/07/what-are-shingled-solar-modules/> (zugegriffen 28. Oktober 2021).
- [4] „Longi solar’s p-type mono bifacial shingled cell module sets 20.66% efficiency record“, *PV Tech*. <https://www.pv-tech.org/news/longi-solars-p-type-mono-bifacial-shingled-cell-module-sets-20.66-efficienc>
- [5] K. Pickerel, „LONGi Solar jumps on ‚tiling‘ module train with new seamless soldering technology“, *Solar Power World*, 31. Mai 2019. <https://www.solarpowerworldonline.com/2019/05/longi-solar-jumps-on-shingled-module-train-with-new-seamless-soldering-technology/> (zugegriffen 20. Oktober 2021).
- [6] Imprint, A. us, T. and Conditions, und P. and C. Policy, „TaiyangNews 500W+ Conference: LONGi Solar | TaiyangNews“. <http://taiyangnews.info/technology/taiyangnews-500w-conference-longi-solar/> (zugegriffen 20. Oktober 2021).
- [7] M. Osborne, „Jolywood’s bifacial ‘paving’ module boasts front power of 430W, efficiency of 20.5%“, *PV Tech*, 8. Januar 2019. <https://www.pv-tech.org/jolywoods-bifacial-paving-module-boasts-front-power-of-430w-efficiency-of-2/> (zugegriffen 28. Oktober 2021).
- [8] L. Stoker, „Bridging the gap to 550W+: The technologies inside Trina Solar’s Vertex product range“, *PV Tech*, 12. August 2020. <https://www.pv-tech.org/bridging-the-gap-to-550w-the-technologies-inside-trina-solars-vertex-roduc/> (zugegriffen 28. Oktober 2021).
- [9] L. Podlowski, „Solar module having shingled solar cells“, US20160163902A1, 9. Juni 2016 Zugegriffen: 28. Oktober 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://patents.google.com/patent/US20160163902A1/en>
- [10] „Staggered and Arrayed: M10 Industries AG and Fraunhofer ISE Develop Matrix Shingle Technology to Industrial Maturity - Fraunhofer ISE“, *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE*. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2021/staggered-and-arrayed-m10-and-fraunhofer-ise-develop-matrix-shingle-technology-to-industrial-maturity.html> (zugegriffen 28. Oktober 2021).
- [11] Imprint, A. us, T. and Conditions, und P. and C. Policy, „Jolywood To Produce Solar Cells & Modules In Indonesia | TaiyangNews“. <http://taiyangnews.info/business/jolywood-to-produce-solar-cells-modules-in-indonesia/> (zugegriffen 28. Oktober 2021).
- [12] Ralph Diermann, „LG Electronics launches 370 W ‘paving’ panel with 21.4% efficiency“, *pv magazine International*, 23. Juli 2020. <https://www.pv-magazine.com/2020/07/23/lg-electronics-launches-370-w-paving-panel-with-21-4-efficiency/> (zugegriffen 28. Oktober 2021).
- [13] B. Strahm, P. Papet, R. Grischke, und W. Frammelsberger, „Improved solar cell string for use in a photovoltaic module“, EP3905341A1, 3. November 2021 Zugegriffen: 10. Januar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://patents.google.com/patent/EP3905341A1/en>
- [14] M. Osborne, „LONGi Solar’s Hi-MO 5 Series module offers gallium-doped wafers and ‘Smart Soldering’ for 540Wp“, *PV Tech*, 29. Juni 2020. <https://www.pv-tech.org/longi-solars-hi-mo-5-series-module-offers-gallium-doped-wafers-and-smart-so/> (zugegriffen 20. Oktober 2021).
- [15] Ma. Osborne, „LONGi Solar’s P-type mono bifacial shingled cell module sets 20.66% efficiency record“, *PV Tech*, 26. Mai 2018. <https://www.pv-tech.org/longi-solars-p-type-mono-bifacial-shingled-cell-module-sets-20-66-efficienc/> (zugegriffen 20. Oktober 2021).
- [16] M. Lang, G. Oreski, P. Fuchs, E. Helfer, A. Halm, und M. Klenk, „FEM Simulation of Deformations in Strings of Shingled Solar Cells under Mechanical and Thermal Loading“, München, 2021. Zugegriffen: 10. Dezember 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.eupvsec-proceedings.com/proceedings/dvd.html>
- [17] T. Messmer, H. Chu, V. D. Mihailtchi, R. Roescu, J. Libal, und A. Halm, „Interconnection Approach for Busbar-Less IBC Cells Based on Printed Solder Paste“, *8th World Conf. Photovolt. Energy Convers.* 837-841, S. 5 pages, 3266 kb, 2022, doi: 10.4229/WCPEC-82022-3DV.1.21.