

Forschungsvorhaben: 0325725B

Verbundvorhaben: Bleifreie Module mit niedrigem Silbergehalt und innovativem busbarlosem Zeldesign (InnoModu)

Teilvorhaben: Entwicklung eines elektrisch leitfähigen Klebstoffes (ECA) zur verlässlichen Kontaktierung von galvanisch abgeschiedenen Metallstrukturen auf busbarlosen kristallinen Solarzellen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des **Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie** unter dem **Förderkennzeichen 0325725B** gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Schlussbericht zu Nr. 8.2 NKBF 98 / Anlage 2

## I. Kurze Darstellung zu:

### 1. Aufgabenstellung

Als generelles Ziel wurde die Überprüfung des Konzepts „innovative neue PV-Module mit reduziertem Silberanteil, reduziertem Bleianteil und erhöhter Lichtausbeute“ im Projekt vereinbart. Dies wurde gemäß Antrag in zwei Schritten durchgeführt. Auf Minimoduleebene (1-Zell Module) wurden verschiedene Konzepte getestet und im zweiten Schritt die daraus gewonnenen Erkenntnisse auf reale 60-Zelle Module übertragen. Diese Studie wurde erfolgreich durchgeführt und das Ziel des Ausbaus der Modul-Kompetenz bei den Partnern erreicht.

Die qualitative Reife der neuentwickelten bleifreien, silberarmen und lichtreflektierenden Module konnte nur teilweise nachgewiesen werden. Die PV-Qualitätsnorm wird nur knapp erreicht. Die Schwachstellen wurden teilweise erkannt und können bei Neuentwicklungen berücksichtigt werden.

### **2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Die größte Schwierigkeit bereitete das Ausscheiden der Firma RENA aus dem Projektkonsortium noch vor dem Projektstart. Dies erschwerte die Beschaffung von Zellen mit galvanischer Frontseitenmetallisierung erheblich. Im Laufe des Projektes konnte jedoch zusätzlich ein Hersteller gefunden werden, welcher galvanisierte und gleichzeitig unter industriellen Rahmenbedingungen hergestellte Zellen bereitstellen konnte.

### **3. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Vorhaben ist im Wesentlichen planmäßig durchgeführt worden. Es gab an einigen Stellen Verzögerungen z.B. bei der Beschaffung von Zellen für die galvanische Frontseitenmetallisierung bzw. deren Qualität, welche jedoch an anderer Stelle kompensiert werden konnten.

### **4. wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere**

- Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden,
- Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste,

Ausgehend von im Bereich der Dünnschicht-PV verwendeten elektrisch leitfähigen Klebstoffen (ECA) wurden Varianten mit weiterer Reduzierung des Silberanteils entwickelt. Die Auftragstechnik musste jedoch für die kristalline PV angepasst werden. Dabei wurde auf Erfahrungen im Bereich der Siebdrucktechnologie zurückgegriffen.

### **5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Zusammenarbeit mit den beteiligten Firmen und wissenschaftlichen Instituten, teamtechnik Maschinen und Anlagen GmbH, Ulbrich of Austria GmbH, Kioto Photovoltaics GmbH, Energetica Industries GmbH sowie dem AIT (Austrian Institute of Technology) bzw. dem CTR (Carinthian Tech Research AG) war äußerst angenehm. Es wurden insgesamt 5 Projekttreffen sowie ein Arbeitstreffen bei der Firma Teamtechnik durchgeführt.

### II. Eingehende Darstellung:

#### **1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele**

Das Projekt InnoModu wurde in fünf Arbeitspakete unterteilt, die im nachfolgenden hier im Hinblick auf die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten näher beleuchtet werden.

##### AP1: "Projekt-Management und Dissemination"

Laut Antrag: "Project management: -general organisation, project lead, financial organisation, organisation of content oriented administration"

Das Projektmanagement wurde in Form einer Zeit- und Ressourcenplanung durchgeführt. In regelmäßigen Meetings, zum Teil als Telefonkonferenzen, wurden alle Themen abgesprochen und in einem Protokoll festgehalten. Alle offenen Punkte wurden so systematisch verfolgt.

Alle wichtigen Unterlagen wurden auf einem für alle Partner zugänglichen SFTP-Server gespeichert. In den Forschungsinstituten wurde je eine InnoModu-Webseite mit den Eckpunkten des Projekts eingerichtet, die leicht öffentlich durch Eingabe des Worts „innomodul“ in einer Suchmaschine zugänglich ist.

Projektergebnisse in Form von Veröffentlichungen wurden auf Konferenzen oder in Zeitschriften präsentiert. Eine Masterarbeit („Biomimetic optimization of the grid design on silicon solar cells“, L. Neumaier) wurde am CTR betreut und mit Erfolg absolviert. Das Projekt wurde insgesamt erfolgreich durchgeführt, trotz größerer zeitlicher Verschiebungen wegen der Lieferungen von Galvanikzellen durch die Firma RENA. Es konnten im Berichtszeitraum 16 Präsentationen und Veröffentlichungen über das Projekt durchgeführt werden (siehe Liste im Kapitel 6.).

##### AP2: "Galvanik Prozess und Finger-Design"

Laut Antrag: "The next generation of silicon solar cells with galvanic metallization of copper will be developed. Find optimal galvanic stack and finger design"

Im AP2 „Galvanik Prozess und Finger-Design“ konnte mit der Firma RENA ein Galvanik Design gefunden werden, welches eine höhere Effizienz bei Solarzellen verspricht als bei Standard-Siebdruck-Solarzellen. Ein optimiertes Fingerdesign auf Basis bionischer Ansätze konnte im Rahmen der Masterarbeit entwickelt werden. Unterstützende Simulationen mittels Finite Elemente Software zeigten den Vorteil der Galvaniktechnik. Für Standard Siebdruck Solarzellen wurden verschiedene Fingerdesigns untersucht, um in Kombination mit Busbarvarianten leistungssteigernde Designs und Solarzellenhersteller zu identifizieren.

Im Arbeitspaket 2 stand die galvanische Metallisierung sowohl auf Kupfer- als auch Silberbasis im Vordergrund. Das Solarzellen Design sollte so verändert werden, dass die Finger und Busbars viel Leitfähigkeit bei wenig Zellflächenverschattung bieten. Um das Lötten der Verbinderbänder auf den Busbars zu vermeiden und Silber einzusparen, sollten sowohl die Galvanik Zellen als auch die elektrisch leitfähigen Klebstoffe möglichst wenig Silbergehalt aufweisen. Das Schema der Galvanisierung ist in Bild 1 und die Galvanisierungsanlage in Bild 2 zu sehen. In Bildern 3 bis 6 sieht man das Ergebnis der Prozessierung.

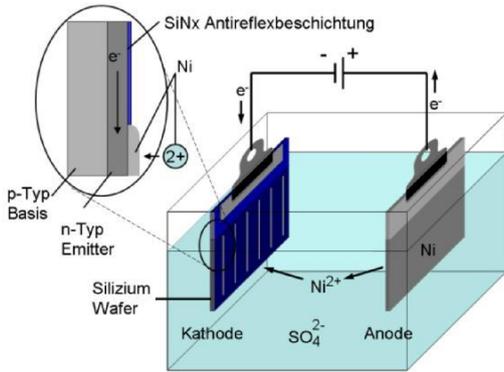


Bild 1: Galvanisierungsschema



Bild 2: Galvanisierung von Solarzellen

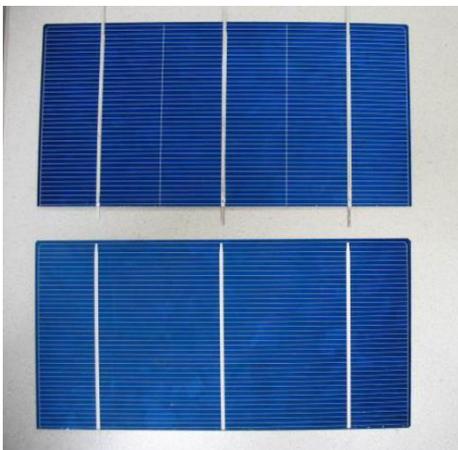


Bild 3: Siebdruck Halbzellen 156 x 78 mm<sup>2</sup>



Bild 4: Galvanik Zelle 156 x 156 mm<sup>2</sup>



Bild 5: Galvanik Zelle mit „Finger Busbar“



Bild 6: Galvanik Zelle mit zwei „Finger Busbar“

Zu Beginn gab es die Schwierigkeit, dass der Galvanikprozess noch nicht konstante Ergebnisse lieferte, was sich an schlecht haftender und / oder fehlerhaft abgeschiedener Galvanik bemerkbar machte (siehe Bild 7 und 8). Nach Prozessumstellung / -optimierung wurden die Probleme auf Seiten des Lieferanten beseitigt.



Bild 7: Sich lösende Kupfer Galvanik Finger



Bild 8: Abscheidungsprobleme Galvanik

Sowohl Galvanik Zellen mit Kupferoberflächen als auch Kupfer-Silber-Oberflächen wurden hergestellt, um Unterschiede und Kosteneinsparpotenziale zu identifizieren. Da reine Kupfergalvanikzellen ein stärkeres Potenzial hinsichtlich Oxidation besitzen als eine Kupfergalvanik mit dünner Silberschicht, sind Zellen mit Silberschicht vorerst besser für eine elektrische Kontaktierung mittels Klebstoff geeignet.

Wissenschaftliche Unterstützung in der Simulation des Zell-Griddesigns wurde mit Hilfe der Simulationssoftware „Griddler2“ vom SERIS („Solar Energy Research Institute of Singapore“) angeboten (siehe Bild 9 und 10).

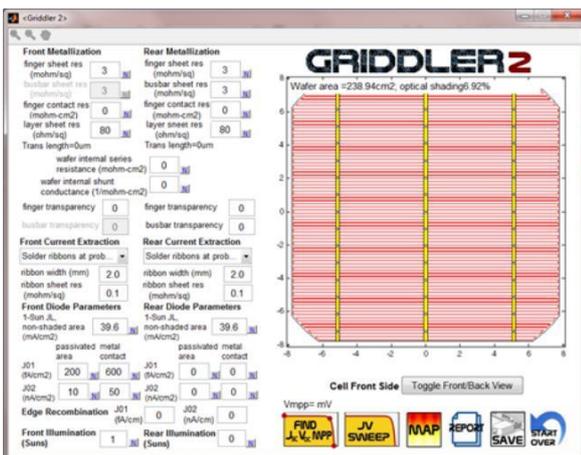


Bild 9: Finite Elemente Software „Griddler2“

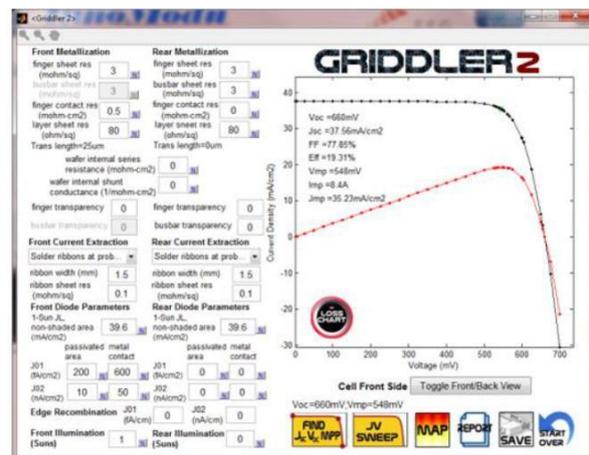


Bild 10: Parametereingabe Feld „Griddler2“

Bei den Zellen der Firma RENA wurde festgestellt, dass diese bereits im Zelldesign optimiert sind, was durch die Berechnung in der Simulationssoftware bestätigt wurde.

In weiterer Folge wurde mit der Firma RENA ein Entwurf eines bionischen Zelldesigns hergestellt. Diese Aufgabe wurde in einer Masterarbeit am CTR bearbeitet und zum bestehenden Standard, den Siebdrucksolarzellen, als auch mit der neuen Technologie „Galvaniksolarzellen“ verglichen.

Die Idee hinter der Arbeit war ein Zellgrid zu entwickeln, welches nicht aus Längs- und Querlinien besteht, sondern sich die Natur als Vorbild nimmt und z.B. die Form einer Blattstruktur mit vielen Verzweigungen aufweist. Das Ergebnis der Arbeit war, dass das galvanisierte Bionik Design besser als das Standard Siebdruck Design ist, aber nicht besser als das Galvanik Standard Design (siehe Bild 11 und 12).

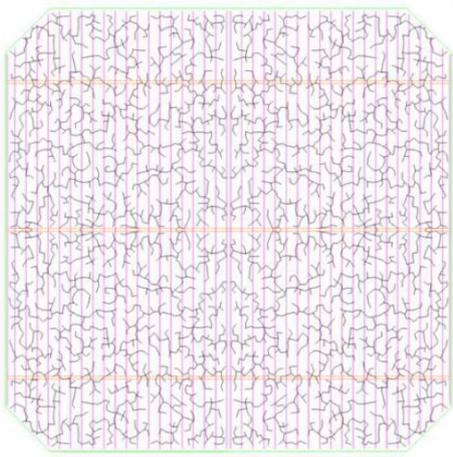


Bild 11: Bionik Galvanik Design

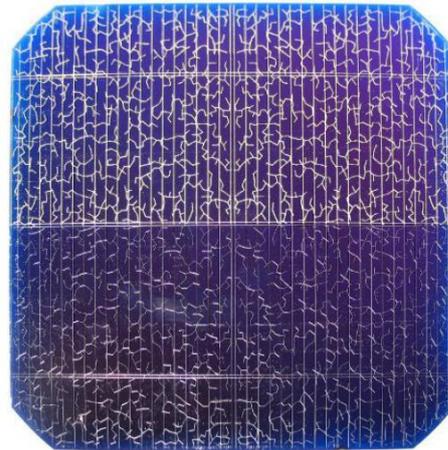


Bild 12: Ink-Jet gedruckte /galvanisierte Zelle

Bei der Präsentation der Arbeit bei der 13. Österreichischen PV Tagung 2015 wurde sie mit dem Publikumspreis belohnt (Bild 13).



Bild 13: Publikumspreis für das bionische Zell-Galvanikdesign

Die Reports „D2.1 Report on galvanic process“ und “D2.2 Report on finger design” wurden erstellt und den Projektpartnern bereitgestellt.

#### AP3: „Entwicklung und Herstellung elektrisch leitfähiger Klebstoffe für PV Anwendung“

Laut Antrag: "In this work package an innovative electrically conductive gluing process will be performed to get the cells lead-free with a high conductivity"

In AP3 wurde an einer verbesserten Formulierung für elektrisch leitfähige Klebstoffe für die Verwendung im Bereich der kristallinen PV geforscht. Das Ziel bestand darin den Silberanteil in vorhandenen Klebstoffen zu reduzieren um einerseits den Preis zu senken aber andererseits noch genügend elektrische Leitfähigkeit aufzuweisen.

Eine Neuentwicklung für einen elektrisch leitfähigen Klebstoff nur auf Kupferbasis wurde erprobt, um ein PV Modul sowohl bleifrei durch Vermeidung bleihaltiger Lote als auch silberfrei durch Vermeidung silberhaltiger Pasten und Verbinderbänder herzustellen. Für die Klebstofftests und Materialauswahl wurden Einzell-Mini-Module hergestellt und untersucht. Dabei wurden Standard Klimatests (85°C / 85% rel. Feuchte) als geeignete Testprozeduren herangezogen, um mögliche Korrosionen an der Grenzfläche Zelle (Galvanik) - Klebstoff bzw. Klebstoff - Zellverbinder sowie innerhalb des Klebstoffes zeitnah zu überprüfen.

Das oberste Ziel war die Herstellung von bleifreien PV Modulen mit niedrigem Silbergehalt und innovativem busbarlosen Zelldesign. Realisiert wurde dies durch die Entwicklung eines elektrisch leitfähigen Klebstoffes (ECA) zur verlässlichen Kontaktierung von Verbinderbändern auf galvanisch abgeschiedenen Metallstrukturen auf busbarlosen kristallinen Solarzellen. Der Klebstoff musste in seiner Eigenschaft so aufgebaut sein, dass dieser die industriell geforderte Taktzeit ( $\leq 2,5\text{sec}$ ) während der Versträngung von kristallinen Zellen hinsichtlich Aushärtung und Auftragstechnik gewährleistet. Als geeignete Auftragstechnik wurde die bereits in der kristallinen PV-Industrie etablierte Siebdrucktechnik angewendet. Der Klebstoff wurde so angepasst, dass eine Topfzeit von mindestens 24h bei Raumtemperatur möglich ist. Diese Zeit ist das Ergebnis einer Überschlagsrechnung für einen Klebstoffverbrauch von ca. 50gr/h bei 1440 Takten pro Stunde und bei einer gedruckten Klebstoffmenge von ca. 0,035gr/Zelle. Eine weitere Anforderung an das Klebstoffsystem war eine Härtungstemperatur  $\leq 180^\circ\text{C}$  innerhalb der gegebenen Härtungsstrecke auf dem ECA-Stringer der Firma Teamtechnik. Besonders die Anforderungen hinsichtlich Topfzeit und erforderliche Härtungsgeschwindigkeit schränken die zur Verfügung stehenden Härter-Systeme für den elektrisch leitfähigen Klebstoff drastisch ein.

Durch den Ersatz des Lötprozesses durch eine bleifreie Klebetechnologie auf Basis von Epoxid-Leitklebstoffen, sowie durch die Verwendung von kristallinen Zellen mit galvanisch abgeschiedenen Metallstrukturen (Ni/Cu/Ag; Ni/Cu; Ni/Cu + OSP) ist die Herstellung von bleifreien und damit RoHS kompatiblen Modulen möglich. Zur Versträngung der Zellen wurden dabei Zellverbinder (LCR™) der Firma Ulbrich verwendet, die keine Lotbeschichtung und damit auch kein Blei enthalten. Ausgehend von dem Silber-Leitklebstoff SB1242 wurde versucht, den Silbergehalt im Klebstoff signifikant zu reduzieren bzw. auf alternative leitfähige Füllstoffe auszuweichen. Hierzu wurde der Silbergehalt zuerst einmal systematisch reduziert (SB1242.1 –

SB1242.10), und dessen Auswirkung im Hinblick auf Kontaktwiderstand, gedruckte Klebstoffmenge, Peelkraft und Glasübergangstemperatur (DSC-Messung) untersucht. Zur Bestimmung des elektr. Kontaktwiderstands, der Klebstoffmenge und der Abzugskräfte wurden die Klebstoffvarianten im Abstand von 52mm direkt auf das Finger-Grid der Vorderseite von kristallinen „Standard-Zellen“ gedruckt und flache Zellverbinder mit Ag-Coating (1,5mm x 0,2mm) der Firma Ulbrich mittels eines Teamtechnik Niederhalters und einer Teamtechnik Heizplatte manuell verklebt (siehe Bild 14 bis 17).



Bild 14: Siebdruckvorrichtung zur Auftragung



Bild 15: Niederhalter für Verbinderbändchen

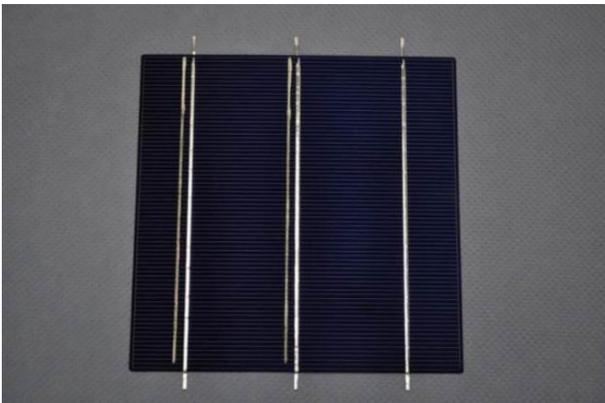


Bild 16: Klebstoff nach Abzugstest



Bild 17: neben gelöteten Zellverbindern

Die Klebstoffmenge, die Abzugskraft sowie der Spannungsabfall in Abhängigkeit von dem sinkenden Ag-Gehalt im Klebstoff wurden ermittelt (siehe Bild 18 bis 20).

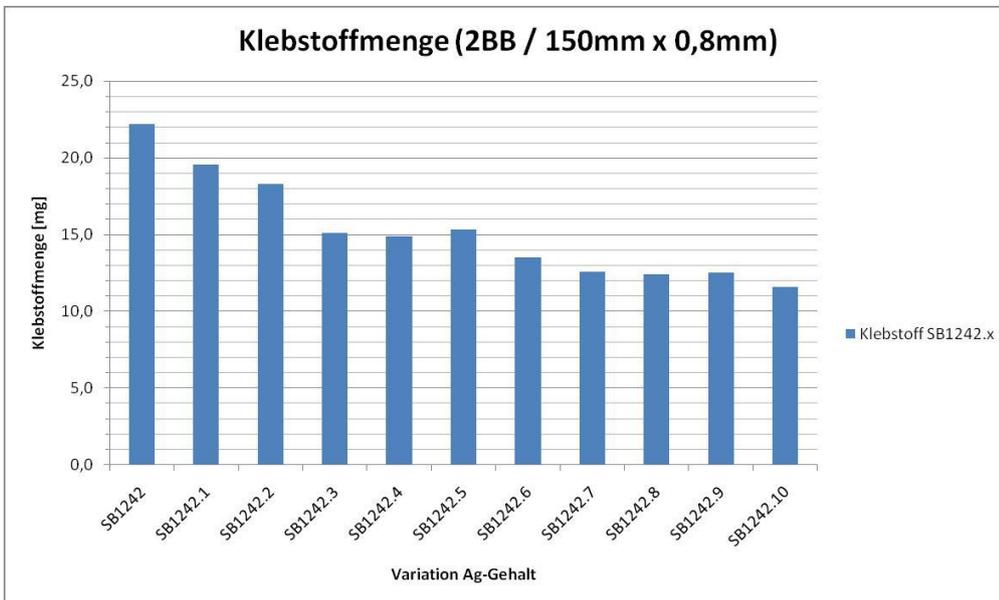


Bild 18: Klebstoffmengenvariation



Bild 19: Abzugskraft in Abhängigkeit der Klebstoffvariation

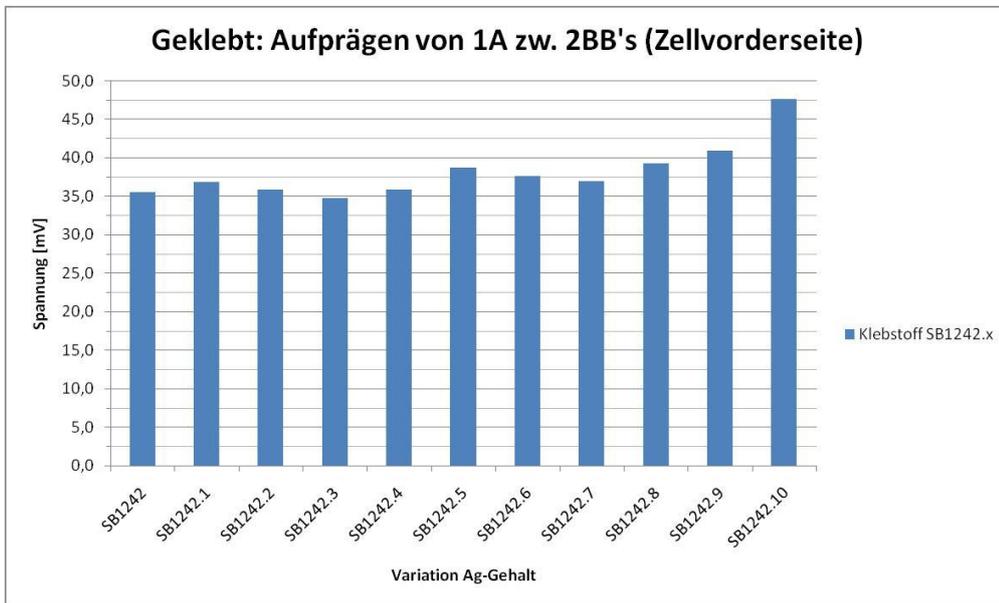


Bild 20: Gemessene Spannung in Abhängigkeit der Klebstoffvariation

Die abnehmende gedruckte Klebstoffmenge (Drucklayout: 2x 150mm Länge x 0,8mm Breite) ist die Folge einer abnehmenden Klebstoffdichte auf Grund reduzierten Ag-Gehalts. Überrascht hat jedoch die mit Reduktion des Ag-Gehalts verbundene abnehmende Abzugskraft. Dies begründet sich in der niedrigeren „Nasshaltekräft“ des Klebstoffes während und vor der Härtung auf Grund des niedrigviskosen Charakters der stark Füllstoff reduzierten Varianten. Diese zeigen gegenüber dem SB1242 nur noch bedingt ein pastöses Verhalten. Zudem wird erst bei starker Ag Reduktion (Varianten SB1242.8 – SB1242.10) ein Anstieg des elektrischen Widerstands erkennbar. Für diese Messanordnung lag der Widerstand typischerweise im Bereich von 35 – 41mOhm. Auf Grund dieser Ergebnisse wurde eine Klebstoffformulierung mit einer Ag Reduktion um mehr als 50% gegenüber dem SB1242 mit in die Versuchsmatrix zum Aufbau von 1-Zell-Modulen aufgenommen.

Nachdem die geklebten Zellen einem Peelttest unterzogen wurden, wurden die identischen Zellen auf einem Löt-Stringer der Firma Teamtechnik verlötet, wobei Zellverbinder der Firma Ulbrich mit einer Lotbeschichtung zum Einsatz kamen. Hierbei wurden beim Aufprägen von 1A ein dem Kleben vergleichbarer elektrischer Widerstand von 35 – 39mOhm gemessen. Der Spannungsabfall der einzelnen Varianten ist in Bild 21 dargestellt.

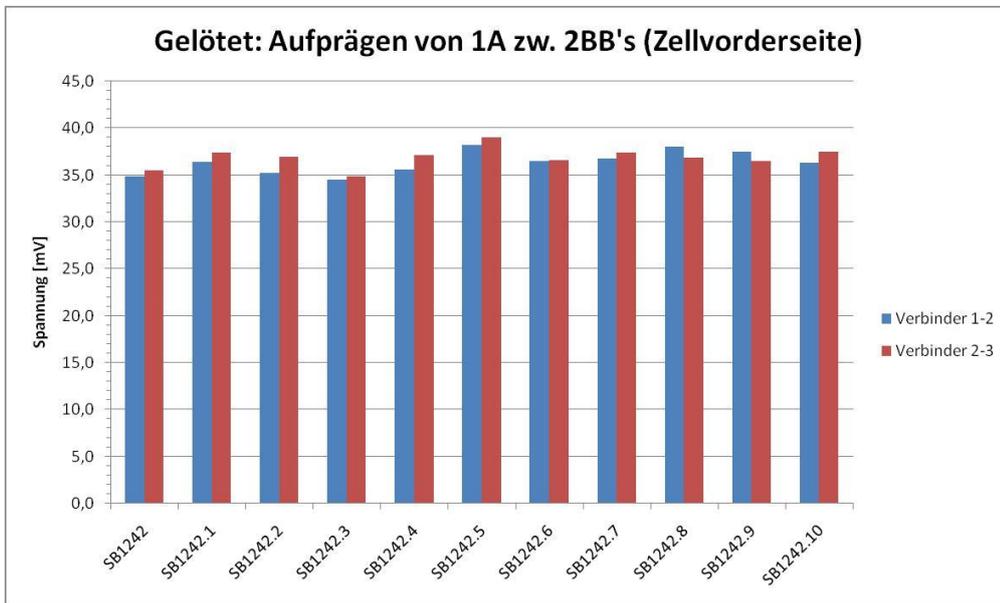


Bild 21: Spannungsabfall in Abhängigkeit der Klebstoffvariation bei Minimodulen

Des Weiteren wurden verklebte und gelötete Zellen einem Alterungstest in einer Klimakammer (1000h; 85°C/85% rel. Feuchte) unterzogen. Hierzu wurden Standardzellen mit flachen Cu-Zellverbindern bzw. mit flachen Ag beschichteten Zellverbindern verklebt und „offen“, d.h. ohne Lamination (Deckglas + EVA-Folie) in der Klimakammer eingelagert. Dabei wurde der Standardsilberklebstoff SB1242 sowie ein kupferhaltiger Epoxid-Klebstoff VP1243-1 mit den o.g. Zellverbindern kombiniert. Das Ergebnis im Spannungsabfall ist im Bild 22 zu sehen.

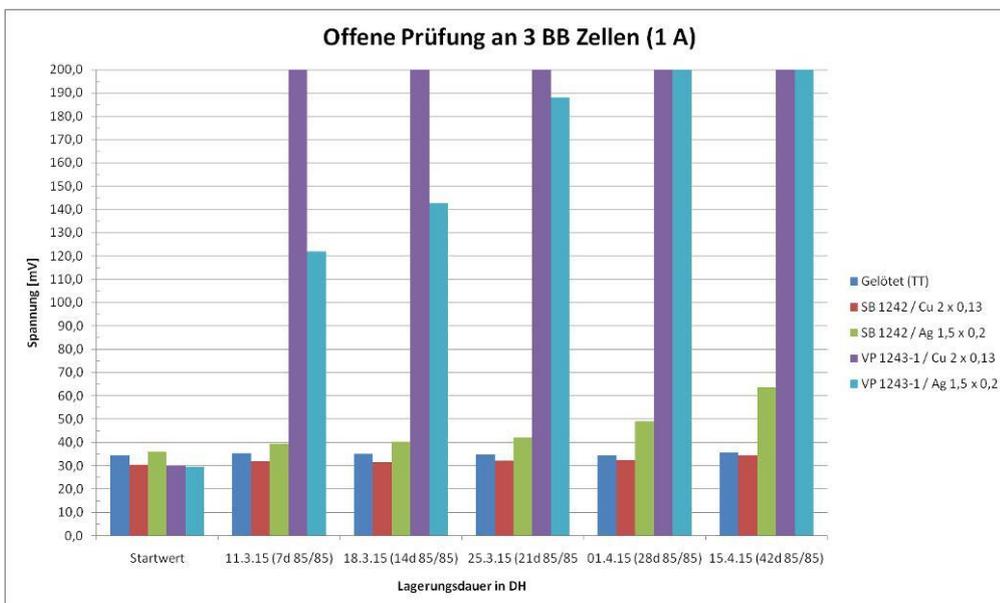


Bild 22: Spannungsabfall in Abhängigkeit der Klebstoffvariation

Die Kombination Ag-Leitklebstoff SB1242 mit einem reinen Cu-Zellverbinder (roter Balken) ist absolut vergleichbar mit gelöteten Zellen (dunkelblaue Balken). Prinzipiell scheint auch eine

„Kreuzkombination“ Ag-Klebstoff + Cu-Verbinder bzw. Cu-Klebstoff + Ag beschichteter Verbinder vorteilhaft gegenüber einer Ag/Ag bzw. Cu/Cu Kombination zu sein. VP1243-1 zeigt jedoch bei diesem unverkapselten Alterungstest, vermutlich durch Korrosion der im Klebstoff enthaltenen Kupferpartikel, eine sehr schnelle Degradation, d.h. Verschlechterung des elektrischen Widerstands.

Im weiteren Verlauf des Projektes wurden Ein-Zell-Minimodule mit drei unterschiedlich galvanisierten Zellen (Ni/Cu/Ag; Ni/Cu; Ni/Cu + OSP) manuell bei Polytec PT aufgebaut. Hierbei kamen als Referenz der Standardsilberklebstoff SB1242, eine daraus entwickelte Ag-reduzierte Variante (SB1242.18) sowie ein komplett silberfreier kupferhaltiger Klebstoff (VP SB1243-5) zum Einsatz. Die Galvanikzellen wiesen dabei als Ersatz für den herkömmlichen Ag-Pasten Busbar zwei durchgehende Linien im Abstand von einem Millimeter als Begrenzung für den siebgedruckten Klebstoff auf. Solche Zellen sind in Bild 23 und 24 zu sehen.

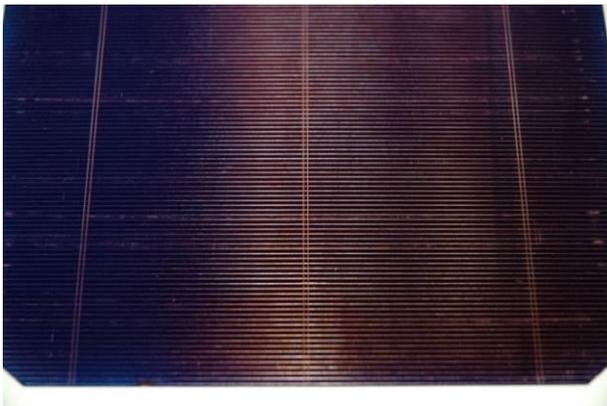


Bild 23: optimiertes Galvanik Design für ECA



Bild 24: fehlerfreie prozessierte Galvanikzelle

Folgende Kombinationen von Galvanikzellen, LCR™ Zellverbindern und Klebstoffen wurden innerhalb dieser Versuchsmatrix aufgebaut. Dabei wurde immer eine Ni/Cu/Ag-Galvanik mit Ag beschichtetem LCR™, eine Ni/Cu-Galvanik mit LCR™ des Typs Cu-P und eine Ni/Cu+OSP-Galvanik mit LCR™ des Typs Cu-F kombiniert. Die Versuchsmatrix ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Klebstoff-Galvanikzellen Matrix 1-Zell-Module

Bezeichnung	Gruppe	Galvanik	Kleber	Bändchen
A1	A	Ni-Cu-Ag	SB1242	LCR + Ag (1,5mm x 0,2mm)
B1	B	Ni-Cu-Ag	VP SB1242.18 (Ag-reduziert)	LCR + Ag (1,5mm x 0,2mm)
C1	C	Ni-Cu-Ag	VP SB1243-5 (Cu-basiert)	LCR + Ag (1,5mm x 0,2mm)
A2	D	Ni-Cu	SB1242	LCR / Kupfer Version: Cu-P (1,5mm x 0,2mm)
B2	E	Ni-Cu	VP SB1242.18 (Ag-reduziert)	LCR / Kupfer Version: Cu-P (1,5mm x 0,2mm)
C2	F	Ni-Cu	VP SB1243-5 (Cu-basiert)	LCR / Kupfer Version: Cu-P (1,5mm x 0,2mm)
A3	G	Ni-Cu + OSP	SB1242	LCR / Kupfer Version: Cu-F (1,5mm x 0,2mm)
B3	H	Ni-Cu + OSP	VP SB1242.18 (Ag-reduziert)	LCR / Kupfer Version: Cu-F (1,5mm x 0,2mm)
C3	I	Ni-Cu + OSP	VP SB1243-5 (Cu-basiert)	LCR / Kupfer Version: Cu-F (1,5mm x 0,2mm)

Die Ergebnisse (Pmpp) der Messungen beim AIT nach 1000h Damp Heat (DH) Test (85 °C/ 85 % r.F.) zeigten, dass ein Kupfer basierter Klebstoff mit dieser Rezeptur zu einer stärkeren Degradation in Bezug auf die Leitfähigkeit neigt, und sich damit auch die Leistung der Minimodule verschlechtert (siehe Bild 25).

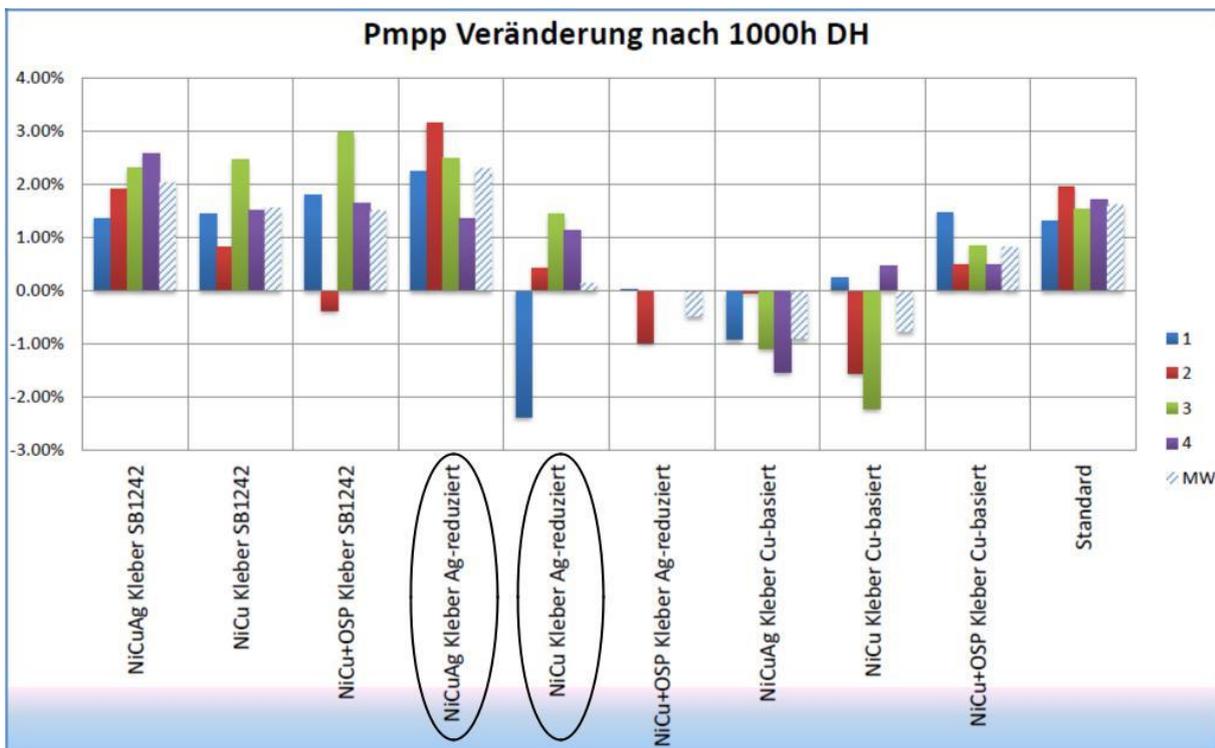


Bild 25: Versuchsmatrix mit Zellgalvanik-, Klebstoff- und Verbinderbändervariation

Der Report „D3.1 Report on conductive glue formulation“ wurde erstellt und den Projektpartnern bereitgestellt.

### AP4: "Stringeigenschaften und Verstringungsprozess"

Laut Antrag: "In this work package the existing stringing process technology will be modified to be able to handle the glue. Furthermore the necessary string features like materials (cells, ribbon), number of busbars, cell thickness, geometry of ribbon, geometry of string, definition of the variation of the materials, etc. have to be defined and evaluated"

In Arbeitspaket 4 soll die Herstellung einer elektrischen Verbindung von einzelnen Solarzellen zu einem String realisiert werden. Die hauptsächliche Aufgabe bestand darin den Standard Lötprozess so zu modifizieren, dass ein standardisierter Klebprozess entstand. Um diese Technologie einsatzbereit zu machen, mussten der Klebstoff und die verklebten zusammenhängenden Solarzellen mit Verbinderbändern auch per Robotergreifer transportierbar sein. Ein solcher String ist in Bild 26 und die Dosiereinheit in Bild 27 zu sehen.

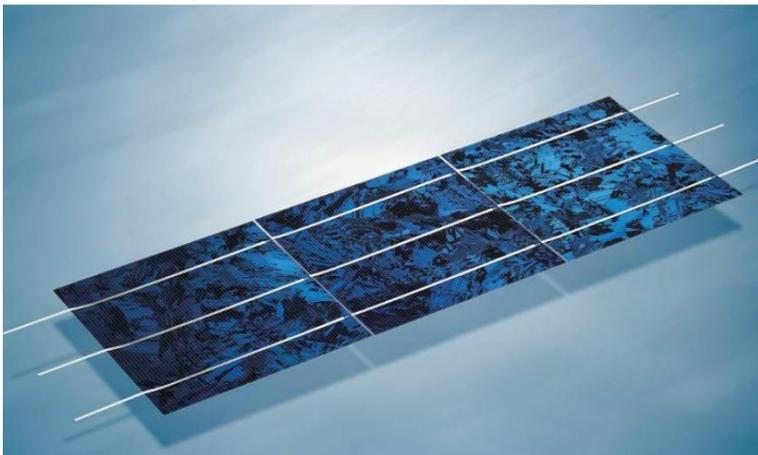


Bild 26: Verstringte Solarzellen mit 3 Busbars



Bild 27: Klebstoffdosiereinheit

Die Abfolge für den Aufbau eines Zellstrings ist für den Lötprozess folgender:

- Verbinder abspulen
- Verbinder schneiden
- Solarzellen per Robotergreifer nehmen, ablegen und verlöten
- Greifen und Transportieren des gesamten Zellstrings

Um den Klebprozess durchführen zu können, ist nach dem Auflegen der Zellen, der Klebstoff aufzutragen und nach dem anschließenden Auflegen des Verbinders, der String zu erhitzen, um den Klebstoff auszuhärten und so die Verbindung zwischen Zelle und Zellverbinder herzustellen. Eine Skizze des Zellstrings, der Prinzipaufbau der Anlage und der Siebdruck sind im Folgenden zu sehen (Bild 28 bis 30).

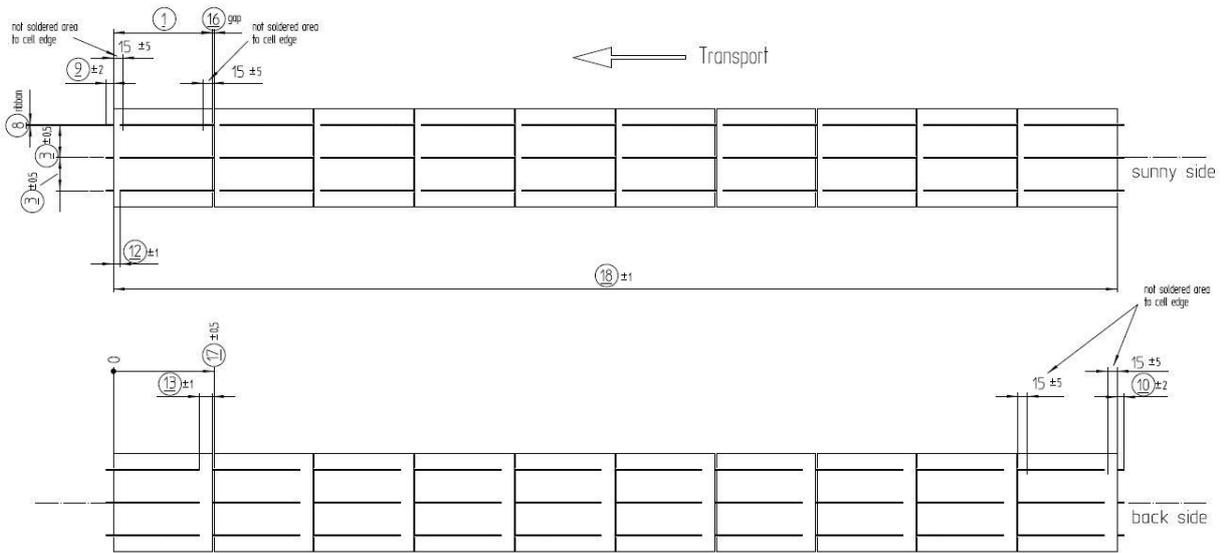


Bild 28: Skizze eines Zellstrings

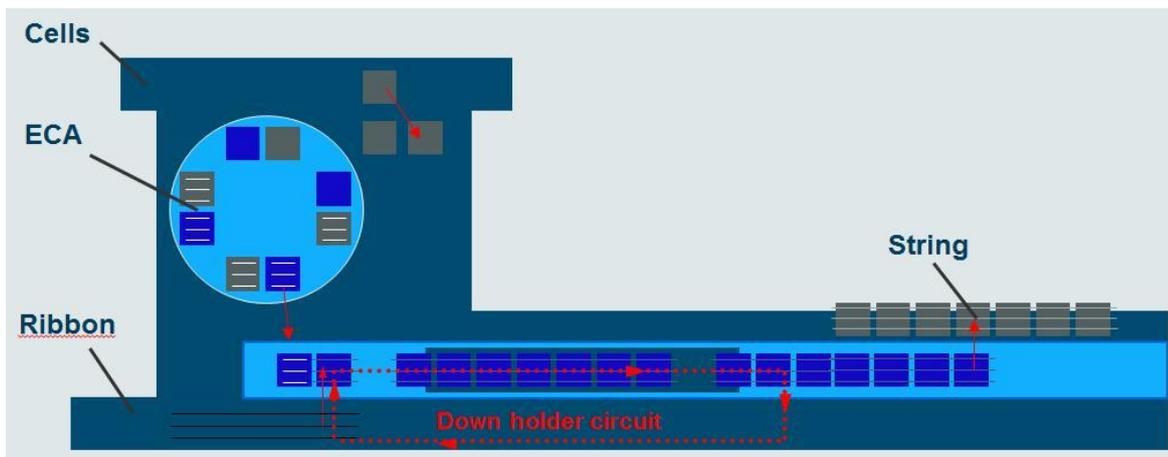


Bild 29: Prinzipaufbau zur Verklebung von Solarzellenstrings



Bild 30: Siebdruck des elektrisch leitfähigen Klebstoffes

Die Reports „D4.1 Report on string features“ und „D4.2 Report on stringing process“ wurden erstellt und den Projektpartnern bereitgestellt.

### AP5: „Vollständige Prozessoptimierung“

Laut Antrag: “The objective of this work package is to combine all new designed and developed components (ribbons, adhesives etc.) and processes (galvanic, gluing and stringing process) in order to concept engineering samples. The functionality and long term stability of these innovations will be analysed and tested”

In AP5 wurden die Erkenntnisse aus Einzell-Mini-Modulen und separaten Klebstofftests genutzt um geklebte 10er-Zellstrings zu 60 Zell Standard PV Modulen zu verbauen. Der Vorteil der geklebten strukturierten Verbinderbändchen „Light Capturing Ribbons“ (LCR™) zeigte sich sowohl bei den Einzell-Mini-Modulen als auch bei den 60 Zell Modulen am Teststand. Durch Winkelabhängigkeitsmessungen der LCR Bänder konnte die Wirkung unter unterschiedlichem Lichteinfall gemessen werden. Die am Außenteststand durchgeführten Ertragsmessungen an PV Modulen unter realen Bedingungen zeigten, dass knapp 2% Ertragsgewinn durch die neue Technologie in unseren Breitengraden möglich ist.

Eine Untersuchung mittels Ramanstreuung zur Ermittlung von mechanischem Stress wurde gemacht, um die Auswirkung von Lötten und Kleben der Verbinderbänder auf die Zelle zu evaluieren. Des Weiteren wurden die zwei besonders kritischen Qualitätstests Damp Heat und Temperaturzykeln nach PV-Norm 61215 durchgeführt.

Speziell für die tiefstrukturierten Verbinderbänder sind winkelabhängige Messungen durchgeführt worden, um nicht nur den Leistungsgewinn, sondern auch den Ertragsgewinn zu ermitteln. Der Aufbau ist in Bild 31 und 34 und die Ergebnisse in Bild 32, 33 und 35 zu sehen.



Bild 31: Vergleich LCR zu Standard Verbinder

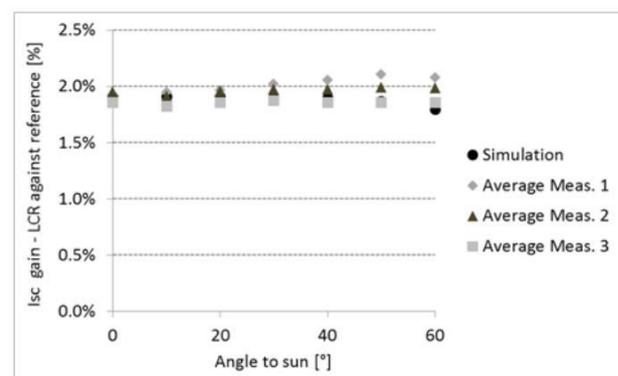


Bild 32: Winkelabhängige Messung

Es hat sich gezeigt, dass der LCR Verbinder, welcher in Kombination mit elektrisch leitfähigen Klebstoffen verbaut werden kann, eine Winkelabhängigkeit aufweist, wenn die Verbinderbänder

nicht horizontal sondern vertikal zur Sonne stehen. Da ein standardmäßig installiertes PV Modul beide Fälle abdeckt, ist ein Mischwert für den Ertragsgewinn zu erwarten.

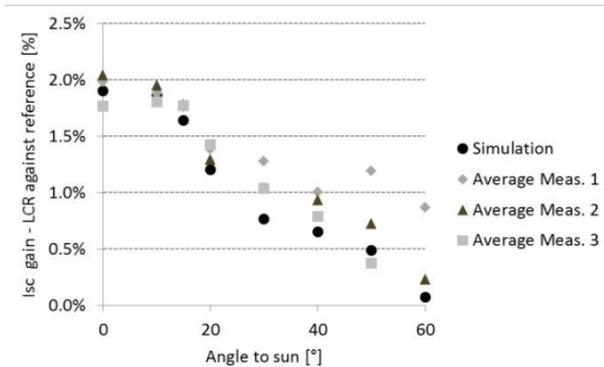


Bild 33: Winkelabhängigkeit

Bild 34: LCR- vs. Standardmodul

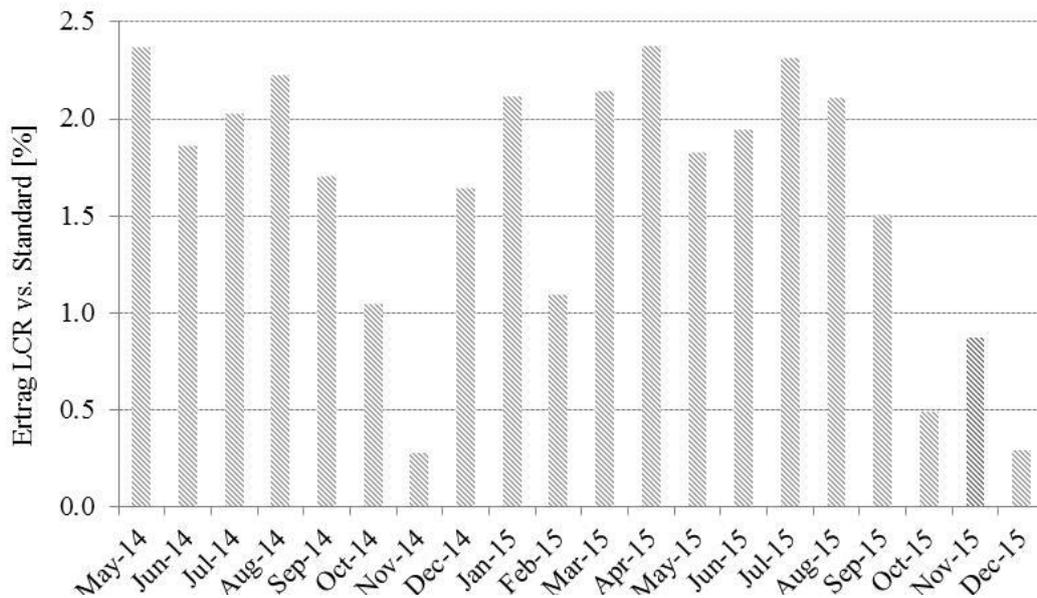


Bild 35: Auswertung des Ertragsgewinns in Abhängigkeit der Monate

Festgestellt wurde, dass die neue Verbindertechnologie (LCR™ geklebt) einen mittleren Gewinn im Ertrag gemessen in Kilowattstunden [kWh] von etwa 1,7% erzielt.

Des Weiteren wurden Versuche mit verschiedenen Zelldesignvarianten ausgewertet. Die Frage wie viele Busbars auf einer Solarzelle die Leistung erhöhen und ob Halbformate zusätzlich einen Gewinn verursachen können wurde geklärt. In einem Experiment mittels Messproben sowie Simulationen konnte gezeigt werden, dass vier Busbars besser als drei Busbars sind. Außerdem erzielen halbe Solarzellen mehr Leistung als ganze Zellen bei gleich betrachteter Fläche. Proben mit 3 bis 6 Busbars sind in Bild 36 und die Ergebnisse in Bild 37 zu sehen.



Pro Variation 4-5 Proben als Statistik

Bild 36: Auswertung der Zelleistung in Abhängigkeit der Anzahl der Busbars

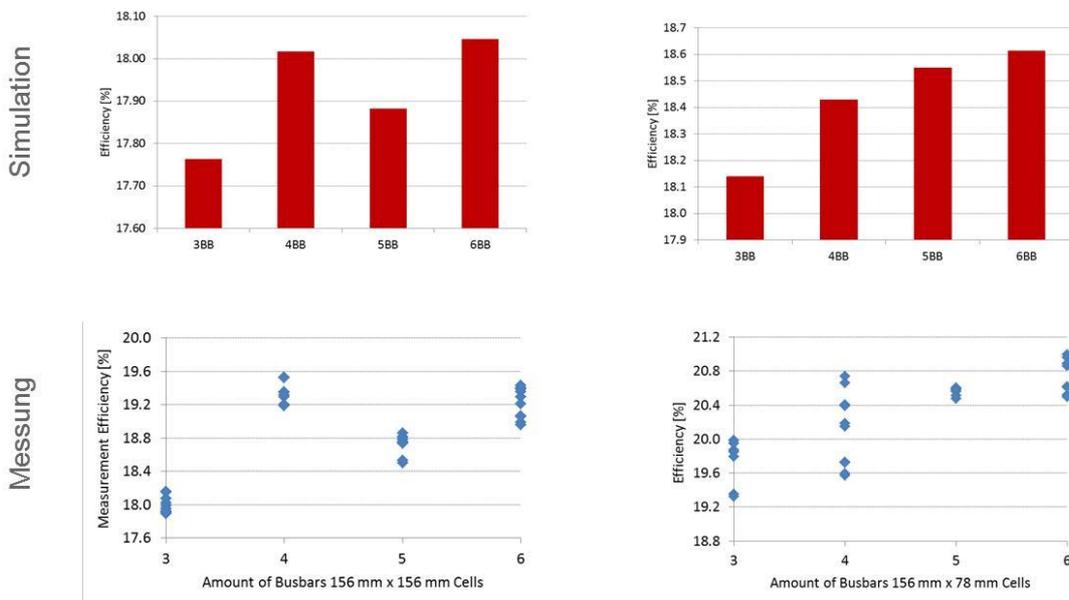


Bild 37: Auswertung der Zelleistung in Abhängigkeit der Anzahl der Busbars

Sowohl die Simulation als auch die Messung hat gezeigt, dass ein Design gut optimiert sein muss, wenn die einfache Regel, umso mehr Busbars desto mehr Leistungsausbeute, gelten soll. Prinzipiell wurde ermittelt, dass eine vier Busbar Halbzelle am Wirtschaftlichsten ist, wenn die Halbzelle zum halben Preis einer vollen Zelle hergestellt werden kann. Ansonsten ist die 156mm x 156mm Vollzelle mit vier Busbars momentan 2016 am Wirtschaftlichsten.

In einem weiteren Experiment wurde untersucht, ob Löten oder Kleben mehr mechanische Spannung in einer Solarzelle verursacht. Mittels Raman-Messung konnte die mechanische Spannung in Silizium ermittelt werden (Bild 38 bis 41).

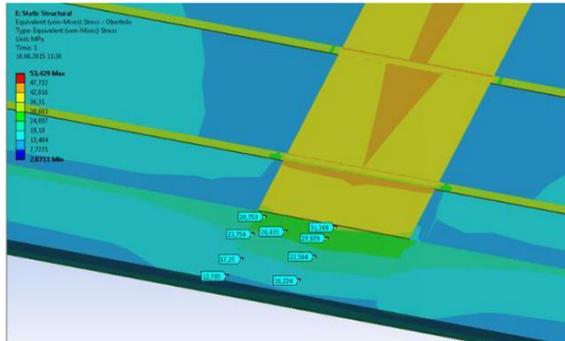


Bild 38: Simulation in FEM Programm

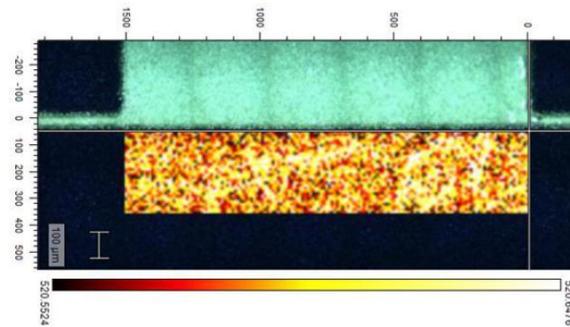


Bild 39: Messung mittels Raman-System

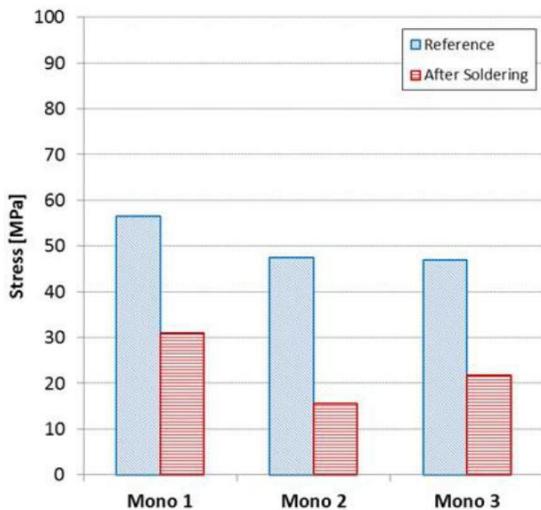


Bild 40: Stressmessung in Silizium

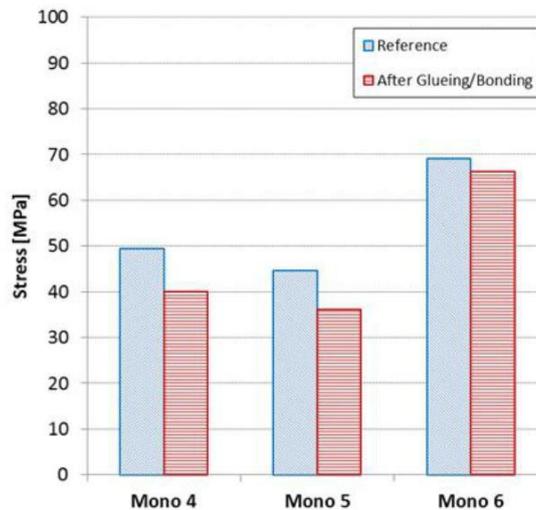


Bild 41: Stressmessung in Silizium Kleben

Das Fazit aus diesem Versuch ist, dass die Raman-Messmethode sehr gut reproduzierbar ist und mit den Ergebnissen der FEM Simulationen korreliert. Zu der Frage, ob Kleben oder Löten mehr mechanische Spannung in einer kontaktierten Solarzelle verursacht, zeigen die Messungen an präparierten Proben keine signifikanten Unterschiede im Experiment. Somit kann aus diesen bisherigen Messungen auf keinen Vorteil bzw. Nachteil für beide Verbindungstechnologien geschlossen werden.

**60-Zell Module**

Die Erkenntnisse der Minimodul-Charge wurden genutzt um gezielt 60-Zell Module aufzubauen. Die Galvanikzellen wurden mit einem Ag-reduziertem Klebstoff (VP SB1242.18-2) kontaktiert und zusätzlich 5 Module eines alternativen Galvanikherstellers zum Vergleich mit dem im Vorprojekt bewährten Klebstoff (SB1242) produziert. Letzterer hat einen deutlich höheren Silbergehalt und damit auch eine höhere Viskosität. Dabei wurden Galvanikzellen mit einer Ni/Cu/Ag Galvanik mit Ag beschichtetem LCR™ und Zellen mit einer Ni/Cu Galvanik mit LCR™ des Typs Cu-P verstringt. Die Versuchsmatrix ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Klebstoff Galvanikzellen Matrix 60-Zell-Modulen

Modul	Zellhersteller	Galvanik*	Kleber	LCR Bändchen	Belastung
A1	Alternative	Silber	SB 1242	2,0x0,2mm Ag	Referenz
A2	Alternative	Silber	VP SB 1242.18-2	2,0x0,2mm Ag	Referenz
A3	Alternative	Silber	SB 1242	2,0x0,2mm Ag	DH
A4	Alternative	Silber	SB 1242	2,0x0,2mm Ag	DH
A5	Alternative	Silber	VP SB 1242.18-2	2,0x0,2mm Ag	DH
A6	Alternative	Silber	VP SB 1242.18-2	2,0x0,2mm Ag	DH
A7	Alternative	Silber	SB 1242	2,0x0,2mm Ag	TC
A8	Alternative	Silber	SB 1242	2,0x0,2mm Ag	TC
A9	Alternative	Silber	VP SB 1242.18-2	2,0x0,2mm Ag	TC
A10	Alternative	Silber	VP SB 1242.18-2	2,0x0,2mm Ag	TC
A11	Alternative	Silber	Gemischt	2,0x0,2mm Ag	TC
R1	Rena	Silber	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Ag	Referenz
R2	Rena	Silber	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Ag	TC
R3	Rena	Silber	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Ag	DH
R4	Rena	Silber	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Ag	DH
R5	Rena	Silber	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Ag	DH
R6	Rena	Silber	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Ag	DH
R7	Rena	Silber	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Ag	TC
R8	Rena	Silber	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Ag	TC
R9	Rena	Silber	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Ag	TC
R11	Rena	Kupfer	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Cu	Referenz
R12	Rena	Kupfer	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Cu	TC
R13	Rena	Kupfer	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Cu	DH
R14	Rena	Kupfer	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Cu	DH
R15	Rena	Kupfer	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Cu	DH
R16	Rena	Kupfer	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Cu	DH
R17	Rena	Kupfer	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Cu	TC
R18	Rena	Kupfer	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Cu	TC
R19	Rena	Kupfer	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Cu	TC

\*Galvanik oberste Schicht

Variiert wurden:

- Zellhersteller: RENA und Alternativhersteller
- Galvanik-Oberfläche: Silber und Kupfer
- Klebstoff: SB 1242 bzw. VP SB 1242.18-2 (reduzierter Silbergehalt)

Bei der Voralterung der Module gab es ein sehr unterschiedliches Bild welches auf das unterschiedliche Zellmaterial zurückzuführen ist (siehe Diagramm 1).

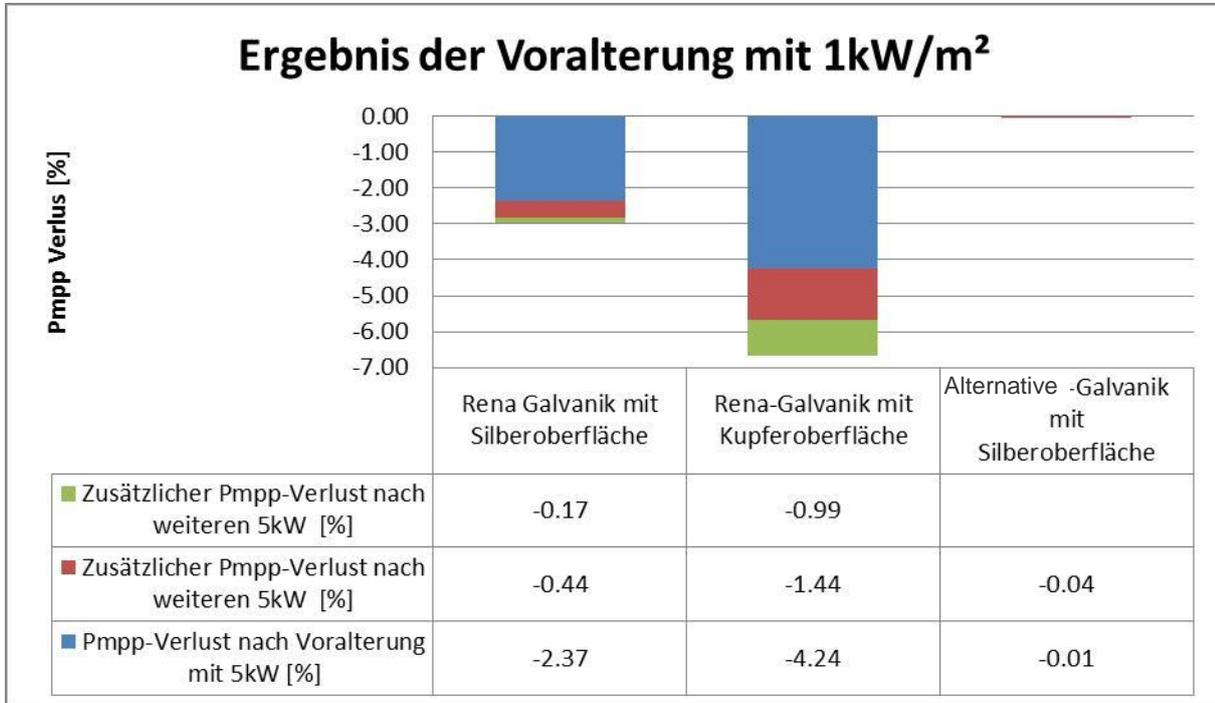


Diagramm 1: Ergebnis der Voralterung mit 5kW Einstrahlung

Das Ergebnis der Damp Heat Belastung ist im folgenden Diagramm 2 abgebildet:

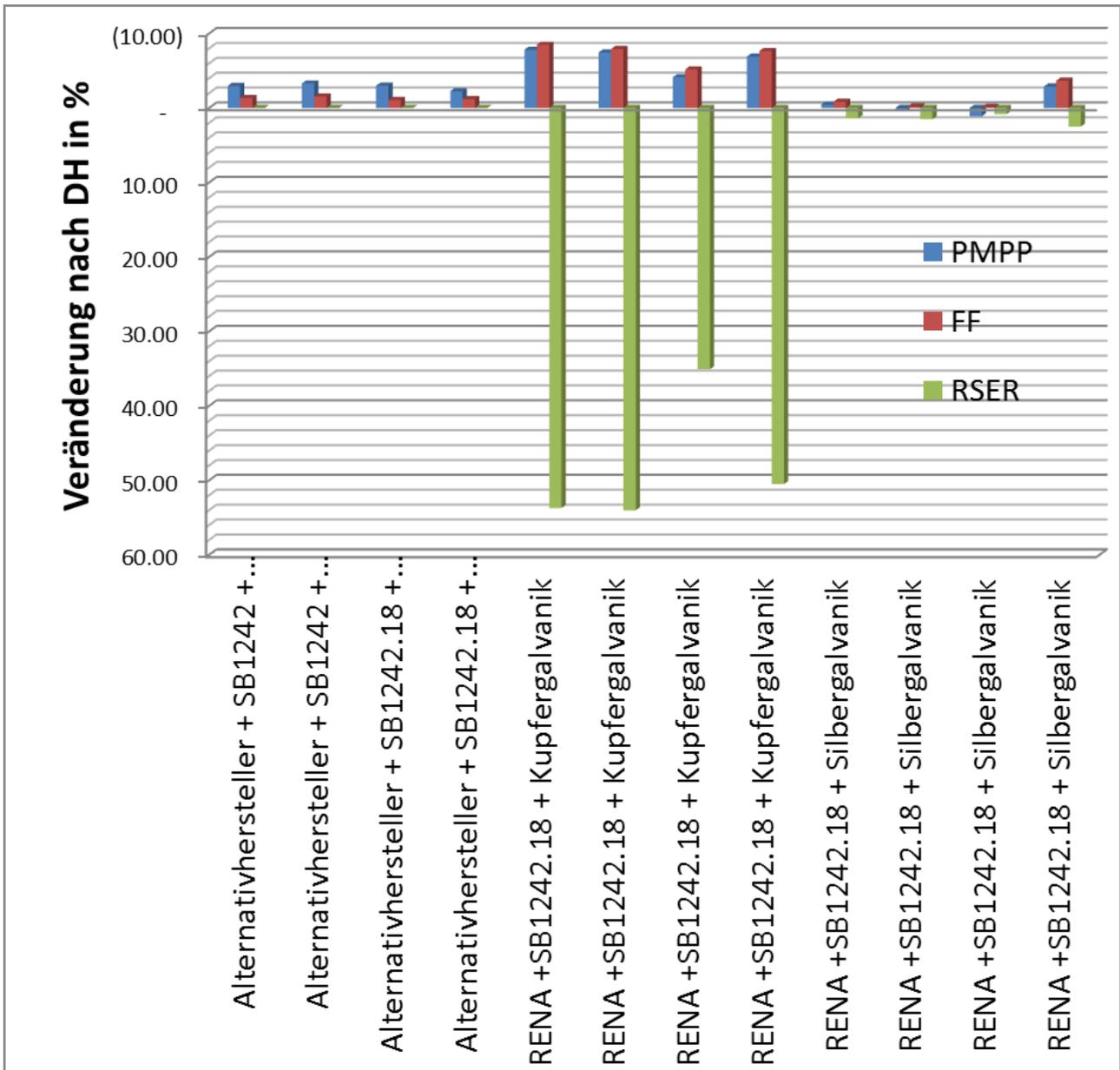


Diagramm 2: Veränderungen nach Dampf Heat für PMPP (Leistung im Punkt der maximalen Leistung), FF (Füllfaktor) und RSER (Serienwiderstand)

In Diagramm 2 sieht man, dass die Kupferoberfläche eine Erhöhung des Serienwiderstands nach DH bewirkt und so die Leistung im Pmpp-Punkt um etwa 7% sinken lässt. Dies ist außerhalb der zulässigen Grenze von 5%. Es wird eine Korrosion des Kupfers vermutet. Die anderen Varianten haben den Test bestanden.

Im Temperaturzyklustest schafften nur zwei Varianten den Test (TC 200: -40°C / +85°C):

Tabelle 3: TC-Versuchsmatrix:

Modul- Bezeichnung	Zell- hersteller	Oberste Galvanik	Klebstoff	LCR- Bändchen	TC Ausfall	Bemerkung
A7	Alternative	Silber	SB 1242	2,0x0,2mm Ag	ohne	
A8	Alternative	Silber	SB 1242	2,0x0,2mm Ag	ohne	
R2	RENA	Silber	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Ag	183 TC	
R7	RENA	Silber	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Ag	183 TC	
R8	RENA	Silber	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Ag	183 TC	
R9	RENA	Silber	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Ag	183 TC	
R18	RENA	Kupfer	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Cu	50 TC	
R19	RENA	Kupfer	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Cu	50 TC	
R12	RENA	Kupfer	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Cu	40 TC	
R17	RENA	Kupfer	VP SB 1242.18-2	1,5x0,2mm Cu	40 TC	
A9	Alternative	Silber	VP SB 1242.18-2	2,0x0,2mm Ag	6 - 26 TC	
A10	Alternative	Silber	VP SB 1242.18-2	2,0x0,2mm Ag	6 - 26 TC	
A11	Alternative	Silber	SB 1242 + VP SB 1242.18-2	2,0x0,2mm Ag	6 - 26 TC	Verbrennungen nur an einer Zelle mit SB 1242.

In Tabelle 3 sieht man sowohl einen Einfluss des Klebstoffes wie auch der Galvanik-Oberfläche. Der niedrig viskosere Klebstoff (VP SB 1242.18-2) mit weniger Silber war ungünstig wie auch die Kupferoberfläche. Alle Module wurden auch mit Elektrolumineszenz analysiert. Ein Beispiel ist in Bild 42 zusehen.

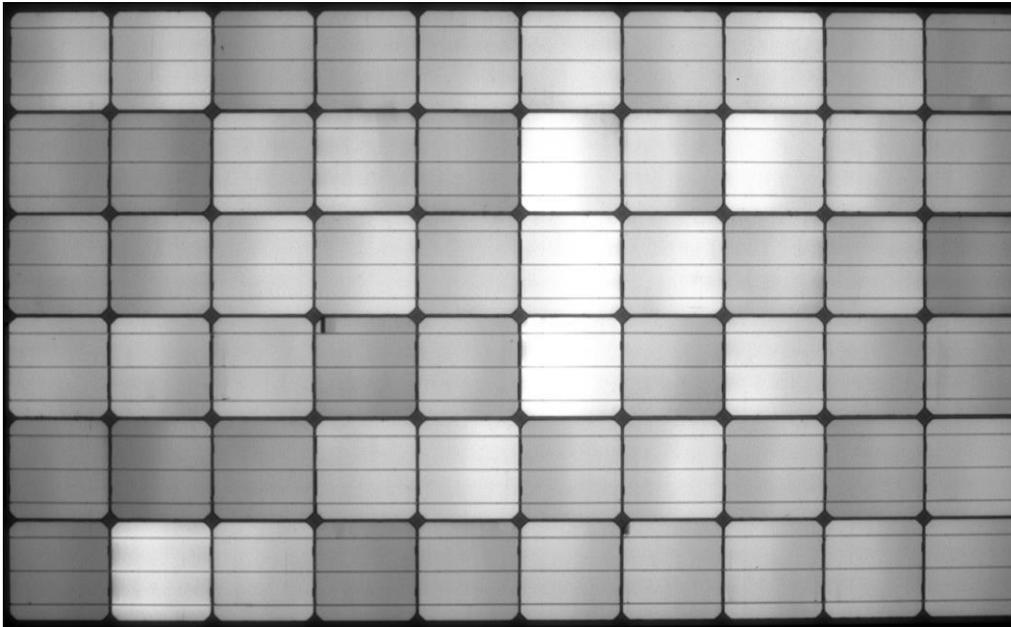


Bild 42: EL-Bild des Moduls A8 nach 200TC bei einem Strom von 0.9 A

## 2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Rahmen des Projektes betrug die Gesamtvorkalkulation seitens Polytec PT 140.192.-€. Diese Summe verteilte sich wie folgt auf die drei Budget-Positionen Material (ca. 16%), Personalkosten (ca. 80%) und Reisekosten (ca. 4%). Während der Projektlaufzeit von 18 Monaten wurden insgesamt von vier Polytec PT Mitarbeitern 1312 Projektstunden abgerechnet, was mit Personalkosten von ca. 103.000.-€ zu Buche schlug. Der Hauptposten im Budget Materialkosten waren die Kosten für die Galvanisierung von 1200 kristallinen Zellen bei der Firma RENA. Des Weiteren sind hier die Kosten für die Beschaffung des Füllstoffes (z.B. Silber-Partikel) für die Formulierung von elektrisch leitfähigen Klebstoffen (ECA) zu nennen. Die Reisekosten sind hauptsächlich durch die Kosten für die Projekttreffen in Österreich (Ulbrich, AIT, CTR) begründet. Insgesamt wurden fünf Projekttreffen bei den Projektpartnern in Österreich abgehalten.

## 3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit,

Durch die Weiterentwicklung der elektrisch leitfähigen Klebstoffe, ist es gelungen unter industriellen Rahmenbedingungen (z.B. Taktzeit) bleifreie und bezgl. des Silbergehaltes stark reduzierte 60-Zell Module aufzubauen und zu testen. Diese Arbeiten sind vor allem im Hinblick auf eine evtl. zukünftige RoHS-Kompatibilität (z.B. Bleifreiheit) erforderlich. Neben der Entwicklung entsprechend formulierter elektrisch leitfähiger Epoxid-Klebstoffe war weiterhin eine Optimierung des Siebdruckprozesses z.B. hinsichtlich des Siebdrucklayouts respektive der gedruckten Klebstoffmenge notwendig, um den Prozess neben technologischen Gesichtspunkten auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten konkurrenzfähig zu gestalten.

**4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans,**

Die im Projekt erzielten Ergebnisse zeigen deutlich die Möglichkeit bleifreie und silberreduzierte kristalline Solarmodule mit heutigen Technologien wirtschaftlich herzustellen. Die Verwertung der Ergebnisse seitens Polytec PT wird in erster Linie davon abhängen inwieweit sich galvanisierte und auf Kupfer basierte Zellen im Bereich der kristallinen PV Technologie durchsetzen werden bzw. inwieweit zukünftig seitens des Gesetzgebers die Anforderung nach einer RoHS-Kompatibilität, insbesondere Bleifreiheit, gefordert wird.

Die Businessdeveloper von AIT und CTR kennen die Ergebnisse von InnoModu und verwenden sie bei der Akquirierung neuer Projekte. Die Firmen können nun eine Vorserienproduktion von bleifreien Modulen starten und falls sie einen geeigneten Galvanik-Zelllieferanten finden, silberarme Module entwickeln, qualifizieren und produzieren. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen in einem Pilotprojekt „Bleifreie Module“ der Stadt Villach einfließen. Dort soll eine Pilotanlage in der Größe von 5kWp mit Modulen des Konsortialpartners KIOTO auf Basis eines hier getesteten elektrisch leitfähigen Klebstoffes errichtet werden. Einige Erkenntnisse aus dem Projekt werden im österreichischen Leitprojekt Projekt Infinity zu weiteren klimaspezifischen Untersuchungen und Weiterentwicklungen verwertet.

**5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen,**

Während der Durchführung des Vorhabens zeigte sich, dass seitens des Herstellers von bereits industriell gefertigten kristallinen Solarzellen mit einer galvanisch abgeschiedenen Metallisierung auf Basis von Kupfer / Silber Interesse an einer Kontaktierung dieser Zellen mit einem „light capturing ribbon“ (LCR™) mittels elektrisch leitfähigem Klebstoff bestand. Ausgehend von diesem Zelltyp wurden ebenfalls 60-Zell Module aufgebaut.

**6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11.**

Geplante Veröffentlichung (Schlussbericht) siehe Berichtsblatt  
Folgende Publikationen sind im Rahmen des Projektes entstanden.

Tabelle 4: Übersicht Publikationen

<i>Conferences and Articles</i>			
<i>Titel</i>	<i>Author</i>	<i>Place</i>	<i>Presentation</i>
Neue Generation Zellverbinder zur Leistungsoptimierung im PV Modul	W. Mühleisen et all.	12. Österr. PV-Tagung 3.-5.Nov.2014 Linz	Poster
Comparison of output power for solar cells with standard and structured ribbons	W. Mühleisen et all.	12. Österr. PV-Tagung 3.-5.Nov.2014 Linz	Poster
Bionische Optimierung der Metallisierungsstruktur von Silizium Solarzellen	L. Neumaier et all.	13. Österr. PV-Tagung 2015 Schwaz	Poster+ Report
Ein Weg zur bleifreien und silberarmen PV-Anlage	M. Schwark et all.	13. Österr. PV-Tagung 2015 Schwaz	Poster+ Report

Neuartige Zellverbinder zur Leistungssteigerung im Solarmodul	W. Mühleisen et all.	30. Symposium Photovoltaische Solarenergie, 4. bis 6.3.2015, Bad Staffelstein	Poster+ Report
Ein Weg zu bleifreien und silberarmen Modulen	M. Schwark et all.	31. Symposium Photovoltaische Solarenergie, 9. bis 11.3.2016, Bad Staffelstein	Poster+ Report
Forschung: Nachhaltiges PV-Modul		<a href="http://www.energie-bau.at/">http://www.energie-bau.at/</a>	Zeitungsartikel
Nachhaltiges Photovoltaik-Modul made in Austria		Das österreichische Gesundheitswesen-ÖKZ, 57. Jg. (2016), 01-02   <a href="http://www.schaffler-verlag.com">www.schaffler-verlag.com</a>	Zeitungsartikel
InnoModu:Lead-free modules with low silver content and innovative buslesscell grid	J.Scheurer	SOLAR-ERA.NET - Information and Match Making Event, 24th+ 25thFebruary 2016, Düsseldorf	Präsentation
Ein Weg zu bleifreien und silberarmen Modulen	M. Schwark	Österreichischen Technologieplattform PHOTOVOLTAIK (TPPV), 24-2-2016, Villach	Präsentation
Biomimetic optimization of the grid design on silicon solar cells	L. Neumaier et all.	31th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (30th EU PVSEC)	Poster+Paper
Stress measurements in interconnected solar cells with Raman spectroscopy	W. Mühleisen et all.	31th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (30th EU PVSEC)	Poster+Paper
Entwicklung eines neuartigen Lichttransmissionsensors	W. Mühleisen et all.	4. Tagung Innovation Messtechnik	Vortrag+Paper
Leistungssteigerung von kristallinen Modulen durch den Einsatz von neuen Modulkomponenten	R. Ebner et.all.	30. Symposium Photovoltaische Solarenergie, 4. bis 06.3.2015, Bad Staffelstein	Poster+Paper
New Promising c-Si solar cell and busbar concepts for industry application	W. Mühleisen et all.	32th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (30th EU PVSEC)	Poster+Paper
<b>Finished Master Thesis</b>			
Biomimetic optimization of the grid design on silicon solar cells	L. Neumaier	Carinthian University of Applied Science / FH Kärnten, 1st, Oct. 2015	Master Thesis

Waldbronn, den 12.10.2016

Jörg Scheurer (Leiter Anwendungstechnik Polytec PT)