

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

30/11/2020

Forschung für die Hochskalierung von flexiblen Dünnschichtsolarzellen

Projektnummer: 865050

Energieforschungsprogramm - 04. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	04. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/03/2018
Projektende	31/08/2020
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	30 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Sunplugged GmbH
AnsprechpartnerIn	Andreas Zimmermann
Postadresse	Mindelheimer Strasse 6, 6130 Schwaz
Telefon	+43-5364-20501
E-mail	andreas.zimmermann@sunplugged.at
Website	www.sunplugged.at

Scale-up

AutorInnen:

Martina Harnisch, Sunplugged GmbH

Slimane Ghodbane, Sunplugged GmbH

Daniel Huber, Sunplugged GmbH

David Stock, Universität Innsbruck

Nikolaus Weinberger, Universität Innsbruck

Marcus Rennhofer, Austrian Institute of Technology GmbH

Stefan Ponsold, Sunnybag GmbH

Andreas Zimmermann, Sunplugged GmbH

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
	Einleitung	5
2	Inhaltliche Darstellung	9
3	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	21
4	Ausblick und Empfehlungen	24
5	Kontaktdaten	25

Einleitung

Aufgabenstellung

Dünnschichtphotovoltaik gilt als vielversprechende Alternative zu konventioneller, auf Wafern basierender Photovoltaik (PV). Dünnschicht-Technologien ebnen den Weg für kostengünstige Produktionsverfahren und eröffnen neue Anwendungsgebiete der Photovoltaik. Im Hinblick auf die industrielle Verwertung gelten Dünnschichtsolarzellen auf Basis von Kupfer-Indium-Gallium-(Di)Selenid (CIGS) als ein vielversprechender Kandidat für zukünftige Photovoltaikanwendungen. Sie vereinen hohes Wirkungsgradpotenzial, gute Langzeitstabilität und können auf unterschiedlichen Substraten, wie Glas und Folien aufgebracht werden.

Das österreichische Unternehmen Sunplugged entwickelt seit 2010 eine grundlegend neue, flexible CIGS-Dünnschichtsolarzelle. Diese Solarzellen können „on-the-fly“ so verschaltet werden, dass dadurch unterschiedliche Geometrien und Modulspannungen einfach realisiert werden können.

Folgende Erfolge konnte Sunplugged in den letzten Jahren erzielen:

- Die Entwicklung einer CIGS-Solarzelle mit Spitzenwirkungsgraden von 15,2% im Labor und über 10% in der Rolle-zu-Rolle-Herstellung (Entwicklungsstand bei Projekteinreichung) auf dünnen Kunststofffolien.
- Entwicklung von Rolle-zu-Rolle Pilotanlagen für die Herstellung der flexiblen Solarzellen.
- Entwicklung einer druckbaren Modulverschaltung. Diese druckbare Verschaltung erlaubt es, ohne großen Rüstaufwand die Eigenschaften eines Photovoltaikmoduls (Größe, elektrische Spannung und Geometrie) zu bestimmen.

Trotz dieser Erfolge sind für die industrielle Verwertung reproduzierbare und stabile Prozesse notwendig. Gerade die Formation der CIGS-Schicht bei hohen Temperaturen und unter Selenatmosphäre führt zu zahlreichen Herausforderungen, wie beispielsweise die Vermeidung von auftretenden Mikrorissen im Schichtstapel.

Das Scale-up Projekt beantwortet Forschungsfragen, die für die industrielle Hochskalierung von flexiblen CIGS-Dünnschicht-Solarzellen entscheidend sind.

Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte:

- Entwicklung eines hochtemperaturstabilen, flexiblen Substrats für CIGS-Solarzellen
- Entwicklung eines stabilen, rissfreien Verbunds aus Substrat und Rückkontakt, der hochskalierte CIGS-Solarzellen mit geringen Wirkungsgradverlusten zulässt
- Optimierung eines neuen Beschichtungsprozesses (Hybrid-Prozess aus Verdampfung und Sputtering) zur Herstellung des CIGS-Absorbers auf hochtemperaturstabilen Substraten

- Sondierung von Verfahren, welche die kostengünstige Zugabe von Alkalimetallen ermöglichen
- Vergrößerung der Homogenität des neuen Hybridprozesses zur Rolle-zu-Rolle Herstellung von CIGS-Absorbern auf breiten Folien (300 mm und mehr)
- Konzeption und Entwicklung von Mess- und Prüfsystemen für anwendungsspezifisch herstellbare PV-Module (nach Zellprozess, nach Verschaltungsprozess)
- Konzeption von neuen, individualisierten Photovoltaikprodukten.

Einordnung in das Programm

Die Ergebnisse aus dem Scale-up Projekt leisten substantiellen Beitrag zum Erreichen der Programmziele der österreichischen Energieforschung.

Ziel 1: Grand Challenges: Energieforschung im Zentrum großer gesellschaftlicher Herausforderungen

Zur Deckung eines großen Anteils des weltweiten Energiebedarfs mit Photovoltaik werden R2R-Verfahren mit hohen Kapazitäten benötigt. Das Projekt trägt maßgeblich zur Entwicklung von effizienten Produktionslinien für Dünnschichtphotovoltaik bei.

Dünnschichttechnologien erlauben es den Materialverbrauch drastisch zu reduzieren (CIGS ist 100mal dünner als konventionelle Siliziumsolarzellen) und zudem ist der Energieaufwand bei der Produktion signifikant geringer.

Die ansprechende Ästhetik und die Flexibilität der CIGS Technologie fördert die Attraktivität der Nutzung von Photovoltaik in der Gesellschaft

Ziel 2: Österreichs Technologieführerschaft schafft Zugang zu internationalen Märkten

Einzigartige Verschaltungstechnologie ermöglicht maßgeschneiderte PV in Geometrie und Ausgangsspannung. Das Alleinstellungsmerkmal hat das Potenzial spezielle Anforderungen zu erfüllen und weckt dadurch international großes Interesse. Das geringe Gewicht der hocheffizienten CIGS-PV ermöglicht den Zugang zu hoch profitablen internationalen Märkten in Raum- und Luftfahrt.

Ziel 3: Energieforschung und Innovation als Beschäftigungsmotor für den Standort Österreich

Innovative Spezial-PV, die in Österreich entwickelt und produziert wird, findet Anwendung in unterschiedlichsten Produkten (z.B. autonome Sensorik, elektrifizierte Urban Furnitures, E-Mobilität...), was die internationale Wettbewerbsfähigkeit stärkt.

Das Scale-up Projekt adressierte prioritär den Ausschreibungsschwerpunkt Photovoltaik (TF 5/5.5).

Die **Material- und Technologieentwicklung** in diesem Projekt zielte darauf ab den Weg für die Produktion von robuster, effizienter und biegsamer CIGS-Dünnschicht-PV zu ebnen. Im Scale-up Projekt wurden kostengünstige **Fertigungstechnologien und Herstellungsprozesse für innovative PV-Module entwickelt. Besonderes Augenmerk der Entwicklung galt der Hochskalierung und Testproduktion dieser Technologien.** Die im Projekt entwickelten hochtemperaturstabilen Trägerfolien haben über den Einsatz bei CIGS-Solarzellen hinaus, Bedeutung für andere photovoltaische Dünnschichtmaterialien. Um hohe Wirkungsgrade der Module zu garantieren, wurde das Absorbermaterial

hinsichtlich seiner elektrischen Eigenschaften optimiert. Elektrische und elektro-optische Mess- und Prüfverfahren wurden für die Anforderungen einer kundenindividuellen Fertigung von Photovoltaikmodulen adaptiert.

Verwendete Methoden

Die Herstellung der flexiblen Dünnschichtsolarzellen und -module erfolgte in einer Pilotlinie bei Sunplugged.

Auf 300 mm breiten, gereinigten Kunststoff- und Metallfolien wurde zuerst mit verschiedenen Materialien (Titan, Molybdän, dotiertes Molybdän) in einer Rolle-zu-Rolle-PVD-Anlage (Physical Vapour Deposition) ein mehrschichtiger Rückkontakt aufgetragen. Danach wurde auf den mit dem Rückkontakt beschichteten Rollen der Cl(G)S -Absorber mittels eines Sputter-Verdampfungs-Hybrid-Prozesses aufgetragen. Anschließend wurden die Bänder in einzelne Segmente unterteilt, diese charakterisiert und weiterverarbeitet. Auf die Cl(G)S -Schichten wurde nasschemisch eine etwa 50-80 Nanometer dünne Pufferschicht abgeschieden.

Der Schwerpunkt der begleitenden Analysen lag in der Charakterisierung der Cl(G)S -Absorberschicht. Diese wurde laufend in Bezug auf die elementare Zusammensetzung, die Struktur und die Oberflächenbeschaffenheit untersucht. Diese Bänder werden anschließend wiederum in einer weiteren PVD-Anlage mit dem restlichen Schichtaufbau (transparente Fensterschicht) versehen. Ein Teil der Testsamples wurde mittels Kurzpulslaser strukturiert, mittels Inkjetdrucks mit leitfähiger Tinte seriell verschaltet und verkapselt. Für die folgende Charakterisierung und Modellierung wurden jeweils Muster aus den jeweiligen Produktionsschritten gezogen und den wissenschaftlichen Partnern zur weiteren Charakterisierung zur Verfügung gestellt (z.B. Muster nur mit Rückkontakt bis hin zu fertigen Solarmodulen mit Verschaltung und Verkapselung).

Verschiedene Materialcharakterisierungen und Analysemethoden wurden bei Sunplugged und den Projektpartnern an den Dünnschichten durchgeführt. Als erster Schritt bei jeder Versuchsreihe mit Cl(G)S -Schicht wurde die relative elementare Zusammensetzung mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF) bestimmt. Folglich wurden mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops (SEM) Oberflächen- und Schnittbilder der Absorber-Schicht aufgenommen, welche zur Analyse der kristallinen Mikrostruktur dienen.

Eine tiefenabhängige Elementanalyse wurde teilweise anschließend mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX), GDOES (Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy), Sekundärionenmassenspektroskopie (SIMS) oder Photoelektronen-Spektroskopie (XPS) durchgeführt. Diese Methoden dienten v.a. zum Vergleich mit anderen Methoden. Durch die Kombination von GDOES mit SIMS erhielt das Konsortium Konzentrationsprofile der Schichtelemente und zusätzliche Tiefenprofil von Alkalimetallen.

Aufbau der Arbeit

Es wurde ein Arbeitsplan strukturiert nach den einzelnen Aspekten der Projektziele erstellt. Daraus ergaben sich sechs Arbeitspakete, von denen Arbeitspaket 1 die Projektkoordination und die Arbeitspakete 2 bis 5 die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten umfassten. Das Arbeitspaket 6 umfasste Disseminierungsaktivitäten.

Im Arbeitspaket 2 „stabilisierter Unterbau“ wurde ein neues hochtemperaturstabiles und flexibles Substrat für CIGS-Dünnschichtsolarzellen entwickelt und der Nachweis der Funktionstüchtigkeit dieser Technologie für CIGS-Solarzellen erbracht. Ein zweiter Schwerpunkt von Arbeitspaket 2 war die Entwicklung eines Multischicht-Rückkontakts und die Hochskalierung der damit verbundenen Prozesse auf eine Rolle-zu-Rolle Beschichtungsmaschine, welche die großflächige Herstellung des Multischicht-Rückkontakts erlaubt.

Im Arbeitspaket 3 „Großflächiger CIGS Absorber“ wurde der proprietäre CIGS-Kristallisationsprozess von Sunplugged auf das, im Arbeitspaket 2 entwickelte, Substrat angepasst. Der CIGS-Prozess wurde in weiterer Folge in Bezug auf Wirkungsgrad und Homogenität über die Beschichtungsbreite optimiert und ein System zur kontinuierlichen Protokollierung aller relevanten Prozessparameter im CIGS-Prozess konzipiert.

Im Arbeitspaket 4 „Analytik für Hochskalierung“ wurden einerseits Methoden entwickelt, anhand welcher die Hochskalierung des Zellmaterials, insbesondere in Bezug auf bessere Flächenhomogenität, bewertet werden kann. Diese Analytik wurde laufend am von Sunplugged produzierten Zellmaterial getestet, um die Steigerung der Flächenhomogenität zu überprüfen. Über die gesamte Projektlaufzeit gelang es die Flächenhomogenität deutlich zu steigern und bei einigen Batches eine annähernd konstante (von der Zellfläche unabhängige) Stromdichte zu erlangen. Eine detaillierte Defektanalyse mittels REM führte zu einer Reduktion der Materialdefekte im Absorber und somit ebenfalls zu einer Homogenitätssteigerung. Darüber hinaus wurden im AP4 auch diverse Analysemethoden für die Modulverschaltung getestet und durchgeführt. Dabei konnte neben unsystematischen Verschaltungsdefekten, das systematische Problem der richtungsabhängigen Achsengeschwindigkeit, welches zu nicht perfekt isolierenden P1-Gräben bei jeder zweiten Zelle führte, behoben werden.

Im Arbeitspaket 5 Moduldesign wurden Produktkonzepte für unterschiedliche Anwendungen entwickelt und die Größe, Form und Modulspannung an die jeweilige Anwendung angepasst. Anschließend wurden für zwei der entwickelten Konzepte funktionsfähige Prototypen hergestellt.

2 Inhaltliche Darstellung

Die Herstellung von Photovoltaikmodulen wird seit Jahrzehnten durch kristalline Silizium-Solarzellen bestimmt. Daneben hat sich vor allem die Dünnschicht-Photovoltaik zu einer ernstzunehmenden Technologie für die industrielle Realisierung solarer Stromerzeugung entwickelt. Bei Dünnschichtsolarzellen werden auf Trägermaterialien (Glas, Kunststoff oder Metall) funktionale, dünne Schichten (50-2000 Nanometer) aufgetragen. Alle Dünnschicht-Technologien (z.B. amorphes Silizium, Cadmiumtellurid), zeichnen sich durch geringen Energie- und Materialverbrauch in der Produktion aus. Ein großes Verwertungspotenzial versprechen vor allem die sogenannten CIGS (Cu(In,Ga)Se_2)-Solarzellen. Bei diesen Solarzellen besteht die Absorptionsschicht aus Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (kurz "CIGS").

Die Wirkungsgrade von CIGS-Solarzellen wurden von der internationalen Forschungsgemeinschaft in den letzten Jahren kontinuierlich gesteigert. Mit einem **Rekordwirkungsgraden von über 23%** ist diese Technologie inzwischen nahe den Wirkungsgraden von konventionellen Siliziumsolarzellen.

Dünnschicht-CIGS-Solarmodule mit Wirkungsgraden von 16-17% sind bereits kommerziell verfügbar.

Die meisten von ihnen sind auf Glassubstraten abgeschieden, die hohen Temperaturen von 550°C standhalten, und damit die Herstellung von CIGS Dünnschichten hoher Qualität erlauben.

Im Gegensatz zu Glas ermöglichen flexible Substrate (Folien) den Einsatz von Rolle-zu-Rolle-Verfahren und führen dadurch zu höherem Produktionsdurchsatz und zu einem großen Kostensenkungspotenzial. Mit flexiblen Solarzellen können **neuartige Photovoltaikanwendungen** realisiert werden, bei denen geringes Gewicht oder die mechanische oder geometrische Anpassbarkeit wichtig sind.

CIGS-Kristallisation schränkt die Auswahl an brauchbaren Folien stark ein

Die derzeit kommerziell verfügbaren dünnen Folien eignen sich in der Praxis allerdings deutlich schlechter als Substrat für CIGS-Solarzellen als Flachglas. Die für hohe Wirkungsgrade notwendigen Abscheidetemperaturen im Bereich von 500–600°C sind für die meisten Polymerfolien zu hoch – allenfalls Polyimid kann kurzzeitig bis 450°C belastet werden. (Edel-)Stahlfolien erlauben hohe Prozesstemperaturen gegenüber Polyimidfolien

Bei Sunplugged wird der CIGS-Absorber mit einem innovativen Beschichtungsprozess (**Hybrid-Prozess aus Verdampfung und Sputtering**) hergestellt. Dabei werden reine Metalle (also keine teuren Legierungen) auf rotierende Trommeln mit Graphitstreifen gesputtert, die als lineare Verdampfungsquellen wirken.

Energieforschungsprogramm - 04. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

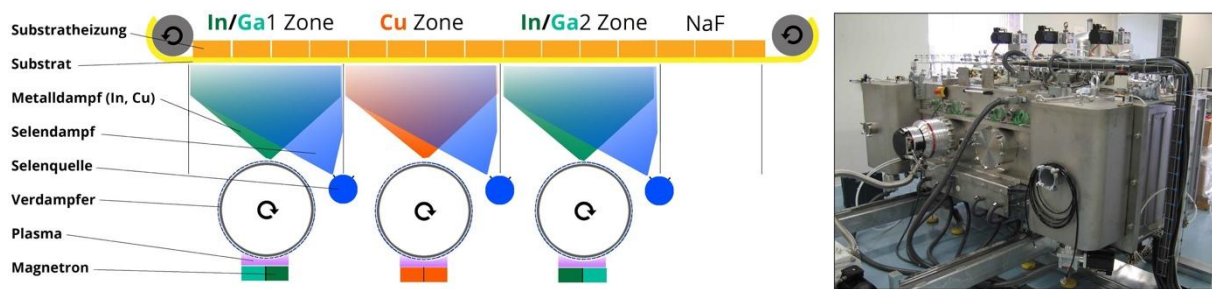


Abbildung 1: links: Diese modellhafte Darstellung zeigt die Aufsicht des Hybrid-CIGS-Prozesses bei Sunplugged, wobei die Sputter-Technologie mit Verdampfungs-Techniken kombiniert wird. Auf der Rückseite (unten im Bild) lagern sich die Metalle (Cu, In, (Ga mit Kühlung)) auf Trommeln aus mehreren Graphitstreifen ab. Unter gleichzeitiger Selen-Verdampfung werden die Metalle gezielt auf das Substrat verdampft. Rechts: Foto der CIGS-Pilotanlage.

Dieser Prozess ermöglicht durch die großflächige Verdampfung über die gesamte Folienbreite die Herstellung endloser, biegsamer CIGS-Solarzell-Schichtpakete mit guter Homogenität.

Eine große Schwierigkeit, die bei der Hochskalierung des CIGS-Beschichtungs-Prozesses von Sunplugged auftrat, war die **Bildung sehr feiner Mikrorisse im Schichtstapel**. Die Risse bildeten sich entweder zwischen dem Rückkontakt und dem Absorber (CIGS) oder zwischen dem Rückkontakt und dem Substrat aus. Diese breiten und tiefen Risse beeinflussen wesentlich die erzielbaren Wirkungsgrade und die industrielle Verwertbarkeit (hohe Ausschussraten) und die realisierbaren Modulgrößen.

Durch sehr hohen prozesstechnischen Aufwand (starkes Vorheizen der Folien im Vakuum, geringe Kontaktflächen der Folie im Kristallisationsprozess, fein regulierbarer Rolle-zu-Rolle-Mechanismus) konnte der Bildung von Mikrorissen zum Teil entgegengewirkt werden. Eine wirtschaftliche Rolle-zu-Rolle-Produktion mit geringem Ausschuss schien jedoch sehr schwer realisierbar zu sein.

Da auch die CIGS-Abscheidetemperaturen im Sunplugged-Prozess durch die verwendeten Kunststofffolien auf maximal 450°C begrenzt waren, sahen wir das **Effizienz- und Hochskalierungspotenzial von flexiblen CIGS-Solarzellen bei weitem nicht ausgeschöpft**.

Es gab bereits zu Beginn der 2010er Jahre zahlreiche Anstrengungen von namhaften Chemie- und Stahlproduzenten (z.B. Dupont, Sandvik, Nippon Steel, Toyo Kohan) hochtemperaturstabile Metallsubstrate mit speziellen dielektrischen Beschichtungen für flexible CIGS-Solarzellen auf den Markt zu bringen.

So waren z.B. die ersten flexiblen Solarzellen die Sunplugged 2012/13 entwickelt hatte, auf einem Stahlsubstrat mit dielektrischer Schicht, welches von der Fa. Dupont bereitgestellt wurde.

Aufgrund der Turbulenzen in der Photovoltaikbranche und den technischen Herausforderungen bei Entwicklung von rissfreien, dielektrischen Schichten wurden aber die Entwicklungen eingestellt.

Deshalb sind die Hersteller von flexiblen CIGS-Photovoltaikmodulen entweder gezwungen Polyimidfolien zu verwenden oder auf Stahl abzuscheiden. Mit der Konsequenz, dabei aber auf den großen Vorteil von integrierten Verschaltungskonzepten verzichten zu müssen.

Aufgrund der anhaltenden Probleme mit Kunststoffsubstraten wurde nach einer Lösung gesucht, welche das Polyimid langfristig als Trägermaterial substituieren kann.

Hochtemperaturesubstrat

Ein wesentliches Ziel des Projekts war die Entwicklung einer **neuen dielektrischen, flexiblen Folie**, welche **für die Hochtemperaturanwendung** unter Selenatmosphäre geeignet ist. Eine dielektrische, flexible Isolationsschicht verhindert die Diffusion von unerwünschten Atomen und Ionen aus dem metallischen Substrat, eignet sich für schnelle Rolle-zu-Rolle-Prozesse und erlaubt dadurch die integrierte Verschaltung von Dünnschichtsolarzellen. Industriell existiert eine Vielzahl von Möglichkeiten dielektrische Schichten auf Metallfolien abzuscheiden. Beispielsweise machen, mittels Physical Vapour Deposition (PVD) abgeschiedene, dünne dielektrische Schichten zahlreiche Metalloberflächen verschleißfester oder korrosionsbeständiger.

Aufgrund von Vorversuchen, den erreichbaren Schichtstärken und den verbundenen Herstellkosten wurde im Scale-up Projekt der Fokus auf **Sol-Gel-basierte, glasartige Schichten** gelegt, welche mittels Schlitzdüsenbeschichtung (Slot-Dye coating) kostengünstig auf Folienmaterial aufgebracht werden können.

Ausgangspunkt für die Entwicklung der glasartige Dünnschichten waren Beschichtungssole. Beim Sol-Gel-Prozess werden mit Polyhydrolyse- und -kondensations-Reaktionen aus diskreten, oft organischen Molekülen zuerst kolloidale Dispersionen (Sole) und aus diesen über Aggregationsprozesse makroskopische Netzwerke (Gele) erzeugt. Das für die Versuche verwendete Sol wurde vom deutschen Forschungsinstitut Leibniz INM Saarbrücken bezogen.

Sol-Gele können über industriell relevante Verfahren, wie Tauch- oder Sprühverfahren, die physikalische oder chemische Gasphasenabscheidung, oder Schlitzdüsenbeschichtung abgeschieden werden.

Sunplugged hat sich Schlitzdüsenbeschichtung entschieden, da Ende 2018 durchgeführte Vorversuche sehr erfolgsversprechend waren. Positiv ist auch, dass mit Schlitzdüsenbeschichtung (Slot dye coating) die gewünschten Schichtstärken mit großer Geschwindigkeit und mit relativ geringen Investitionskosten erreichbar sind.

Die Versuche wurden mit einem einfachen Schlitzdüsenbeschichtungswerkzeug und mit Gelen durchgeführt, welche vom Leibniz Institut in Saarbrücken bezogen wurden. Die bei Sunplugged durchgeführten Tests führten zu folgenden Schlussfolgerungen:

Die Haftung von Solgelschichten wird hauptsächlich durch die Dicke des Nassfilms gesteuert. Eine gute Haftung wird für Dicken unter 6 µm erzielt.

Die Morphologie der Glasschichten kann sehr gut über die Trocknungs- und Sintergeschwindigkeiten bzw. dabei verwendeten Temperaturen beeinflusst werden.

Nadellöcher bis zu einer Größe von 20 µm oder Mikrorisse sind bei Einzelschichten kaum zu vermeiden.

Da zu große Einzelschichtdicken zu verschlechterter Haftung auf der Stahlfolie bzw. zu erhöhter Rissbildung führen, werden mehrere Einzelschichten mit geringerer Schichtdicke übereinander aufgetragen. Ziel dabei ist es, zuerst dichte und mesoporöse Einzelschichten zu entwickeln. Die Ermittlung der maximalen Dicke pro Schicht war Gegenstand des Projekts, ebenso wie die Entwicklung eines reproduzierbaren Schlitzdüsenprozesses, bei dem glasartige Schichten auf Edelstahl mit den gewünschten Eigenschaften (Schichtdicke, Morphologie) auf einer Mindestbreite von 300 mm reproduzierbar abgeschieden werden können. Dabei war die **Verdichtung** (Trocknen und Sintern) **der hergestellten Grünschichten** Gegenstand umfangreicher Entwicklungsaktivitäten, weil dadurch die Eigenschaften der glasartigen Schichten im Beschichtungsprozess am effektivsten beeinflusst wurden.

Von der Einzelschicht zur optimierten Multischicht

Ein weiterer Vorteil des Multischicht-Ansatzes ist die Abdeckung von Nadellöchern (pin-holes) die in einer Schicht entstehen, durch die darüber liegende Schicht. Schon bei zwei Schichten, geht die Wahrscheinlichkeit von durchgängigen Nadellöchern gegen Null. Ähnlich können auch beim Beschichtungsvorgang entstandene Risse durch darüberliegende Schichten komplett aufgefüllt werden. Trotzdem sollte das Entstehen von Rissen, durch eine angemessene Schichtdicke von vorn herein vermieden werden, da das Vorhandensein von Rissen die Homogenität der Schicht negativ beeinflussen kann.

Entwicklung einer geeigneten Rolle-zu-Rolle Versuchsanlage

Zur Beschichtung von Foliensubstraten wurde zu Beginn des Projekts eine einfache Versuchsanlage aufgebaut, mit der bis zu 500 mm breite Folien mit einer Bahngeschwindigkeit von 0,1 bis 5 m/min kontinuierlich von Rolle zu Rolle beschichtet werden können.

Neben der Konstruktion und des Baus der Rolle-zu-Rolle-Mechanismen wurde ein Durchlaufofen adaptiert, damit sowohl Trocknungs- als Sinterversuche in der Versuchsanlage durchgeführt werden können. Die Anlage wurde mit einer einfachen Schlitzdüse ausgestattet und ab Sommer 2018 konnten erste Schlitzdüsenbeschichtungen durchgeführt werden.

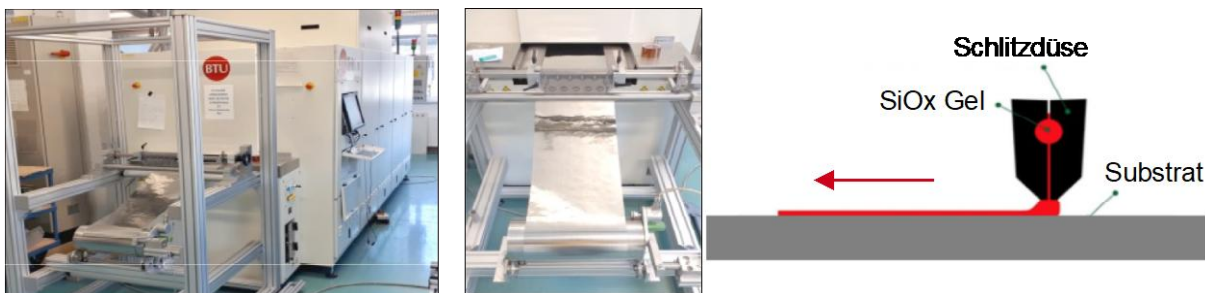


Abbildung 2: Prinzip der Schlitzdüsenbeschichtung. Die präzise Justierung von Schlitzdüsenköpfen ist eine wichtige Voraussetzung für das Hochskalieren des Depositionsprozesses im Rolle-zu-Rolle-Betrieb.

Rückkontakt

Der Aufbau des Rückkontaktes hat speziell für Solarzellen, die auf metallischen Substraten aufgebracht werden, zahlreiche Aufgaben zu erfüllen. Neben einer möglichst hohen elektrischen Leitfähigkeit müssen Barrierewirkungen gegen Alkalidiffusion sowie die Haftfestigkeit der Dünnschichtsolarzelle auf dem Substrat gewährleistet werden. Dies erforderte einen Mehrschichtaufbau des Rückkontakts mit genau

abgestimmten Schichtdicken. Die direkt auf der Metallfolie abgeschiedene SiO_x -Isolationsbarriere dient sowohl als elektrische Trennung zwischen Substrat und Solarzelle, um die monolithische Verschaltung zu Modulen zu ermöglichen, als auch als Barriere gegen Eisen-Diffusion aus dem Stahlsubstrat, das negative Auswirkungen auf den CIGS-Absorber hat. Die durch DC-Sputtering auf der glasbeschichteten Folie abgeschiedene Titan-Schicht verbessert als Haftvermittler die Stabilität des Gesamtaufbaus und verhindert zusätzlich die unkontrollierte Diffusion von Kalium aus der SiO_x -Schicht. Prinzipiell ist Kalium für die CIGS-Schicht zwar wünschenswert, jedoch ist die Mengendosierung aus der mittels Sol-Gel-Verfahren hergestellten SiO_x -Schicht schwer möglich. Die Alkali-Versorgung der CIGS-Schicht erfolgt daher aus der dotierten Na:Mo-Schicht, die unterhalb der hochleitfähigen reinen Mo-Schicht aufgebracht wird. Die Diffusion von Natrium aus der Na:Mo-Schicht in Richtung SiO_x -Schicht/Substrat wird zusätzlich durch die Titan-Schicht unterbunden.

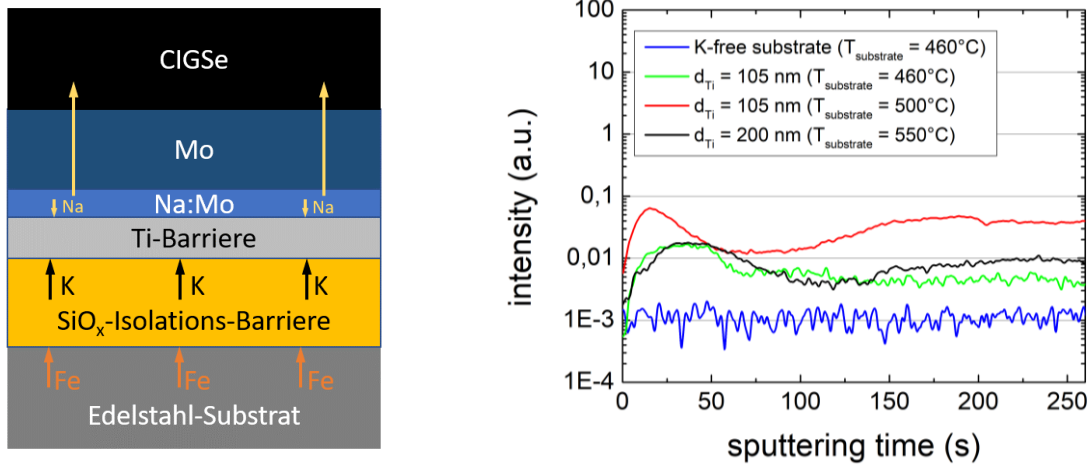


Abbildung 3: Links: Schematische Darstellung des Schichtaufbaus bis zur CIGS-Absorberschicht; Rechts: GDOES-Tiefenprofil von Kalium in der CIGS-Schicht

Hinsichtlich der Titan-Schicht wurde vor allem die Schichtdicke variiert, um eine ausreichende Barrierewirkung zu erreichen. Die Haftung der Titanschicht auf der SiO_x -Schicht war für verschiedene Prozessdrücke und Sputter-Leistungsdichten sehr gut (Bewertung mittels Scotch-Tape-Test). Für eine verbesserte Barriere-Funktionalität wurde die Schichtdicke von ca. 100 nm auf 200 nm erhöht. Dadurch konnte die Alkali-Diffusion auch bei hohen Prozesstemperaturen von 550°C auf einem niedrigen Niveau gehalten werden (siehe Abbildung 3 rechts).

Alkali

Mit Hilfe von Alkalimetallen, wie Natrium und Kalium, kann das Kristallwachstum bei CIGS-Absorbern verbessert werden. Dabei ist die Dosierung von großer Wichtigkeit, da sich ab einer gewissen Menge die Zell-Performance wieder verschlechtert. Die Versorgung der CIGS-Schicht mit dem Alkalimetall Natrium erfolgt standardmäßig bei Sunplugged aus einer dünnen Schicht Natrium-dotierten Molybdäns. Die Sputtertargets enthalten 10at% Natrium, sodass bereits relativ dünne Schichten für eine entsprechende Menge ausreichen. Abbildung 4 zeigt das GDOES-Tiefenprofil der Natrium-Konzentration in der CIGS-Schicht für verschiedene Schichtdicken der Na-dotierten Mo-Schicht. Die niedrigste Schichtdicke von 53 nm lieferte die besten Ergebnisse und wurde als Standardeinstellung definiert.

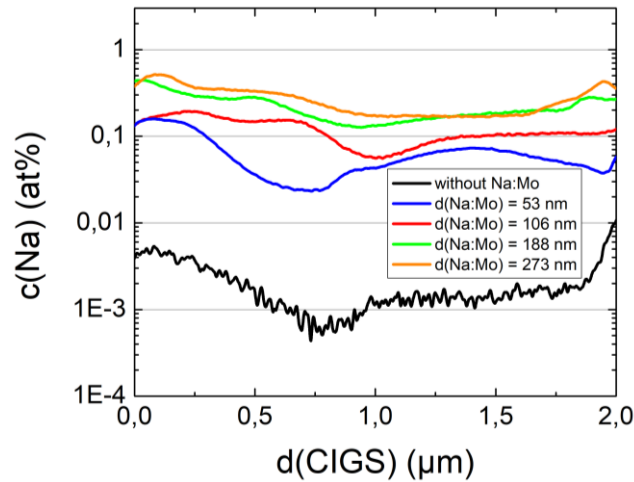


Abbildung 4: Natrium-Konzentration in der CIGS-Schicht im GDOES-Tiefenprofil

Da in der isolierenden SiO_x -Schicht auch geringe Anteile von Kalium vorkommen, wurde versucht, durch Weglassen der Na:Mo-Schicht, CIGS-Absorber mit Kalium herzustellen. In Abbildung 5 sind beispielhaft einige Kennlinien dargestellt. Anhand der direkten Vergleiche der Hell-Kennlinien zeigt sich eine deutlich bessere Performance bei Verwendung von Natrium im Vergleich mit Kalium. Jedoch muss angemerkt werden, dass die Kalium-Menge durch die Versorgung über die Isolierschicht nicht optimiert werden konnte. Durch die obengenannten Nachteile von K:Mo-Targets und die Möglichkeit geringe Kalium-Mengen zusätzlich zum Natrium einzubringen (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4), wurde die Zell-Effizienz mit einem Rückkontaktstandard bestehend aus 200 nm Titan, 53 nm Na:Mo und 300 nm reinem Mo festgelegt und darauf die Optimierung des CIGS-Absorbers fortgesetzt.

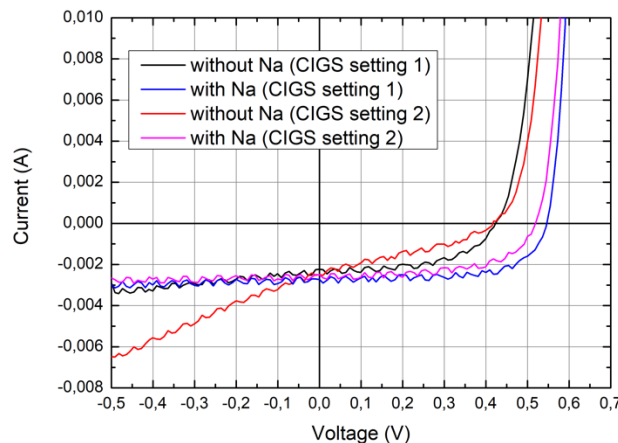


Abbildung 5: IV-Hell-Kennlinien von zwei verschiedenen Absorbieren. Die ohne Natrium hergestellten Schichten wurden mit Kalium aus der SiO_x -Isolierschicht versorgt. Die Schwankungen der Kurven sind auf die 50-Hz-Wechselstromversorgung der verwendeten Lampe zurückzuführen.

Großflächiger CIGS-Absorber

Der Ansatz basiert auf einer CIGS-Dünnschicht-Solarzelle, hergestellt mit einem eigens entwickelten kostengünstigen Rolle-zu-Rolle (R2R)-Verfahren. Der CIGS-Absorber wird mit einem neu entwickelten Beschichtungsprozess (Hybrid-Prozess aus Verdampfung und Sputtering) hergestellt. Dabei werden reine

Metalle auf rotierende Trommeln mit Graphitstreifen gesputtert, die als lineare Verdampfungsquellen fungieren.

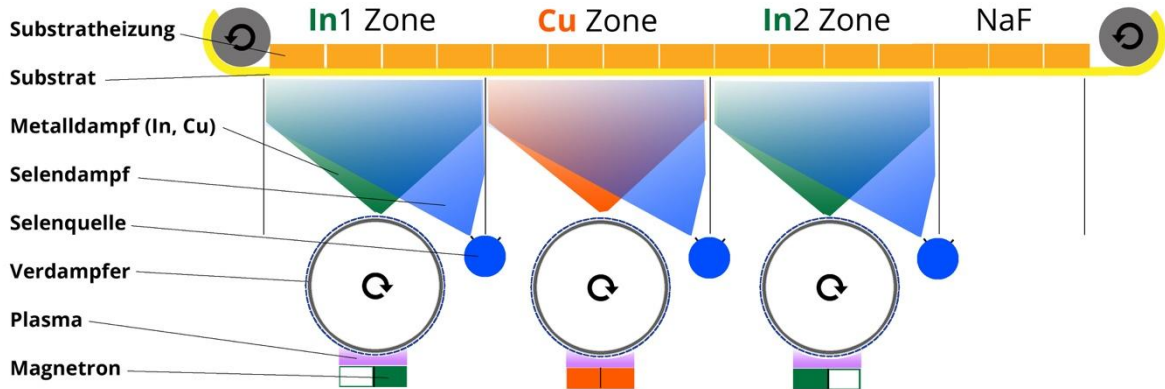


Abbildung 6: Schema des Hybrid-Beschichtungsprozess bei Sunplugged - Die Elemente Kupfer, Indium und Gallium werden auf langsam rotierende Graphitstreifen (Verdampfertrommeln) gesputtert (Kathodenzerstäubung). Erreichen die Graphitstreifen die Position vor dem zu beschichtenden Substrat (welches endlos durchgezogen wird), werden die Metalle abgedampft. Zusammen mit dem gleichzeitig verdampften Selen bilden sich je nach Zone unterschiedliche Phasen, welche letztendlich zum CIGS-Halbleiter führen.

Dieser Prozess ermöglicht die Herstellung quasi-endloser flexibler CIGS-Solarzellen mit guter Homogenität über die gesamte Breite der Folie (durch großflächige Verdampfung) und ausgezeichneter Adhäsion, aufgrund der hohen kinetischen Energie der gesputterten Partikel.

Um das hergestellte Zellmaterial möglichst effektiv nutzen zu können und die Ausschussrate gering zu halten, ist es unerlässlich die Homogenität der CIGS-Absorberschicht zu optimieren. Das betrifft einerseits die Stabilität des Beschichtungsprozesses über längere Zeiträume (mindestens die Dauer einer Rollenbeschichtung) und andererseits die Gleichmäßigkeit der aufgedampften Materialien über die Breite der Substratfolie (30 cm). Die Anlage ist so konzipiert, dass die Metalle Kupfer, Indium und Gallium über die spezielle Sputterquellen-Verdampfer-Konfiguration quasi linearverdampft werden. Zunächst wird über 40 cm breite planare Sputtertargets auf schmale Graphitstreifen beschichtet, von denen das Material anschließend durch schnelles Aufheizen wieder flächig in Richtung der Substratfolie wegverdampft wird. Dadurch kann eine gleichmäßige Verteilung der Metalle sichergestellt werden. Für die Verdampfung von Selen wird das Material zunächst in einem Reservoir-Tiegel thermisch verdampft und anschließend über jeweils zwei Düsen in den Prozessraum eingelassen. Wie Detailanalysen der Verdampfungscharakteristik zeigten, ergibt sich in der Mitte des Substrates eine höhere Intensität von Selenpartikeln als an den Rändern der Folie. Auf das Wachstum der CIGS-Schicht wirkt sich dies weniger stark aus, da Selen nicht direkt auf das Substrat abgeschieden wird, sondern durch Reaktion mit den Metallen (Cu, In, Ga) in die Schichtstruktur integriert wird. Im Prozess wird deutlich mehr Selen angeboten als tatsächlich in die CIGS-Schicht eingebaut wird, um stöchiometrische Schichten abscheiden zu können und um die Bildung bestimmter schädlicher Phasen (z.B. bestimmte Kupferselenide) zu verhindern. Dadurch bildet sich die

Inhomogenität der Verdampferquellen nicht direkt in der CIGS-Schicht ab, sondern wird deutlich abgemindert.

In Abbildung 7 ist der Querschnitt des CIGS-Absorbers für drei Messpositionen über die Folienbreite dargestellt. Die Mikrostruktur ist in allen Fällen sehr ähnlich – mit einem feinkörnigeren unteren Teil und größeren Kristalliten im oberen Teil. Diese Bereiche sind vermutlich auf die unterschiedliche chemische Zusammensetzung zurückzuführen, da in der ersten Phase des Herstellungsprozesses deutlich mehr Gallium abgeschieden wird als in der letzten. Auf diese Weise wird ein Gallium-Tiefenprofil („Grading“) im Absorber erzeugt, das die Ausnutzung der generierten freien Ladungsträger verbessert, indem deren Austritt in die Kontaktschichten erleichtert wird und gleichzeitig die Rekombination reduziert wird. Gallium-reiche Schichten wachsen mit der verwendeten Prozesstechnik im Vergleich zu Gallium-armen Schichten mit deutlich kleineren Kristalliten auf. Für die chemische Zusammensetzung über die Folienbreite ergaben sich teilweise leichte Abweichungen, die jedoch keine Systematik aufwiesen. Abgesehen von der Schichtdicke ergaben sich also keine klaren Diskrepanzen über die Folienbreite. Wichtig ist, in einem stabilen Prozessfenster zu arbeiten, d.h. die Schichtabscheidung – insbesondere was die chemische Zusammensetzung betrifft – so zu gestalten, dass geringe Schwankungen der Abscheidebedingungen keine oder nur sehr geringe Auswirkungen auf die Zellperformance haben.

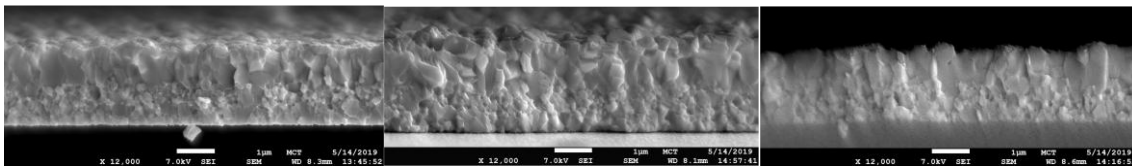


Abbildung 7: REM-Bilder von drei verschiedenen Messpositionen über die Folienbreite einer Probe

Zur Optimierung der Cl(G)S-Solarzellen in ihren verschiedenen Ausprägungen stehen zahlreiche Parameter zur Verfügung. Neben den Materialien und verwendeten Mengen, spielen Dotierung, Fenster- und Zwischenschichten, Art der Deposition, Struktur, usw. wichtige Rollen.

Optimierter CIGS Prozess für Glas-/Stahlsubstrat

Aufgrund der höheren Abscheidetemperatur kommt es zu einer besseren Morphologie des Absorbers. Abbildung 8 zeigt deutliche Unterschiede zwischen den CIGS-Morphologien der beiden unterschiedlichen Substratmaterialien. Die auf dem Stahlsubstrat produzierte CIGS-Schicht weist sehr scharfe Kristall-Facetten auf, was ein Indikator für eine geringe Konzentration an Defekten ist. Im Gegensatz dazu ist die auf Polyimid erzeugte CIGS-Schicht von geringerer kristalliner Qualität, mit einer höheren Defekt-Dichte. Aufgrund der besseren kristallinen Eigenschaften, die auf die höheren Abscheidetemperaturen zurückzuführen sind, können bei stahlbasierten Solarzellen höhere Wirkungsgrade erwartet werden.

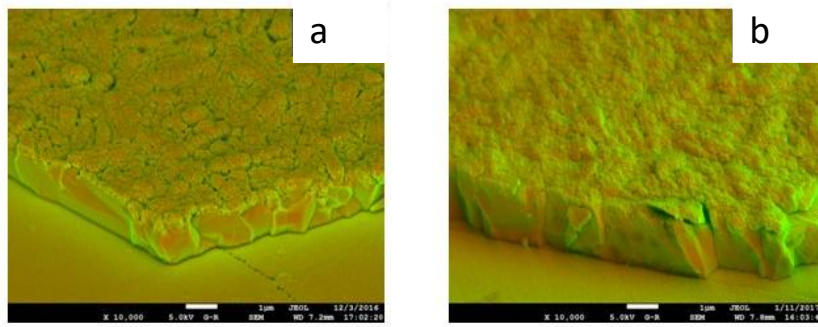


Abbildung 8: REM-Aufnahmen die die Oberflächenmorphologie von auf (a) Polyimid- und (b) Stahl-Substraten abgeschiedene CIS-Schichten vergleichen.

Durch Optimierung von Substrat (SiO_x -Schicht), Rückkontaktbeschichtung sowie der CIGS-Prozessparameter – speziell betreffend Selentemperaturen und Sputterleistungen – konnte die Schichtzusammensetzung, die Kristallstruktur und die Verteilung der Elemente in der Absorberschicht (speziell Ga/In-Verteilung) dahingehend verbessert werden, **Solarzellen Zellen mit 14,3% Effizienz hergestellt** werden konnten. Die Strom-Spannungs-Kennlinien dieser Zelle sind in Abbildung 9 dargestellt. Durch weitere Optimierung und Verbesserung der Strukturierung und Kontaktierung der Zellen konnten im Frühjahr 2020 **Wirkungsgradwerte von über 14,3 %** erzielt werden.

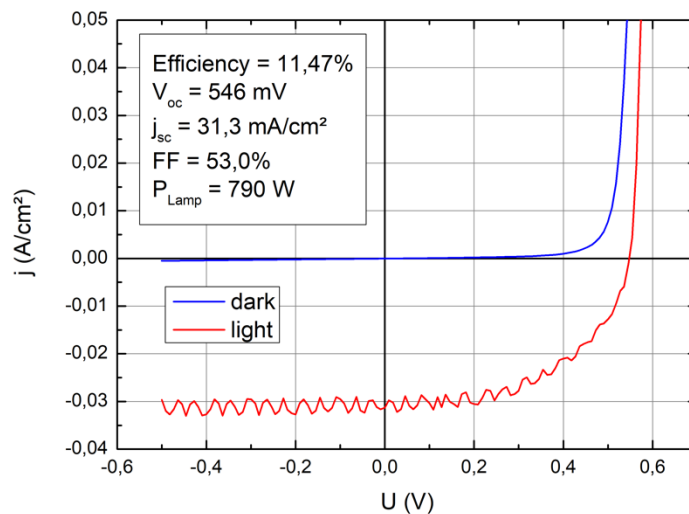


Abbildung 9: Kennlinien einer unter optimierten Bedingungen hergestellten Zelle; Zellgröße: 0,2 cm², eingestrahlte Lampenleistung: 790 W; Die Schwankungen der Hell-Kurve sind auf die 50-Hz-Wechselstromversorgung der verwendeten Lichtquelle zurückzuführen.

Die zeitliche Konstanz der Prozessparameter wurde durch Integration einer Logdatenerfassung in die Maschinensoftware realisiert. In den folgenden Abbildungen sind einige der wichtigen Parameter über die Dauer eines gesamten Beschichtungsprozesses (inkl. Aufheiz- und Abkühlvorgang) dargestellt. Das Foliensubstrat durchläuft während des Beschichtungsprozesses 14 Temperaturzonen, die Temperaturschwankungen von wenigen °C aufweisen (Abbildung 10 links).

Die Selenquellentemperaturen sind deutlich träger und können so mit Schwankungen von +/- 1°C betrieben werden (Abbildung 10 rechts). Die Verläufe der Sputterleistungen sind in Abbildung 11

dargestellt. Um Proben verschiedener Zusammensetzungen in einem Testlauf herstellen zu können, wurden die Leistungen immer wieder angepasst (Sprünge in den Kurven). Da die Proben kontinuierlich durch die drei Beschichtungszonen laufen, müssen die Leistungen entsprechend der jeweiligen Zonen zeitversetzt angepasst werden. Die Leistungen sind im Normalfall sehr stabil (Schwankungen < 1W). Insgesamt kann anhand der geloggtten Daten auf einen sehr stabilen Beschichtungsprozess geschlossen werden. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass durch Abtrag der Sputtertargets während deren Lebensdauer der Targets sich die Sputterraten geringfügig ändern können (vermindern können). Aus diesem Grund ist eine zusätzliche Kontrolle der Beschichtungsraten wünschenswert.

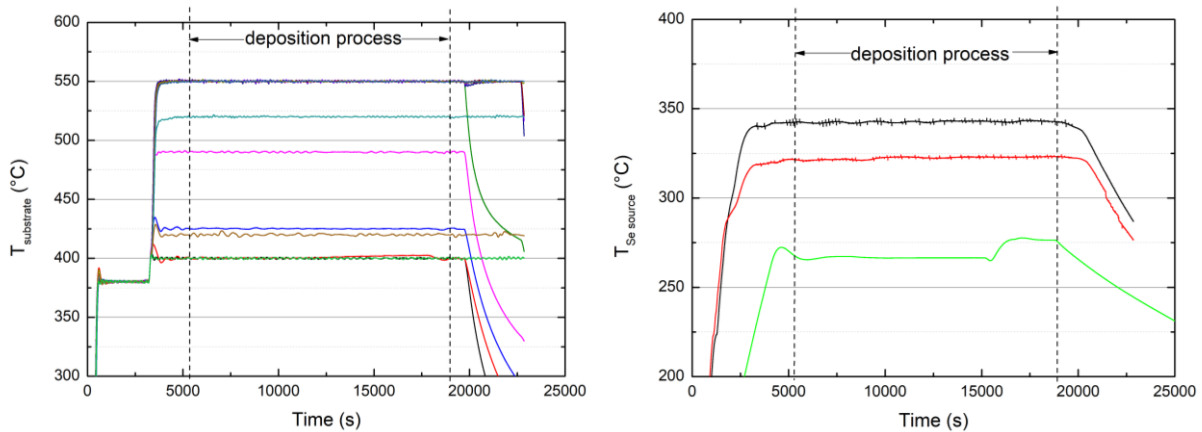


Abbildung 10: Links: Temperaturverlauf der 14 Substrat-Temperaturzonen im Verlauf eines CIGSe-Beschichtungsprozesses; Rechts: Temperaturverlauf der drei Selenquellen; Die Temperatur der dritten Quelle (grün) wurde während des Prozesses geändert (Sprung bei etwa 15500s);

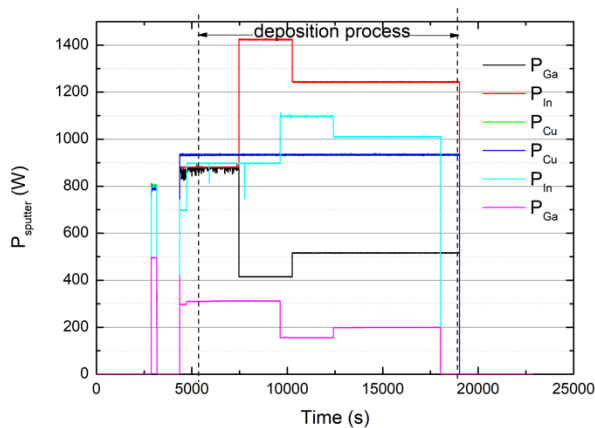


Abbildung 11: Stabilität der Sputterleistungen der sechs Metalltargets über einen gesamten Beschichtungsprozess; Zur Herstellung verschiedener Samples mit unterschiedlichen Zusammensetzungen wurden die Leistungen im Verlauf immer wieder verändert (Sprünge in den Kurven).

Hochskalierung

Um die Zelleffizienz aber auch insbesondere die Homogenität des Zellmaterials über die gesamte Substratbreite zu optimieren, ist es zuallererst notwendig die Defekte und Fehlerquellen zu identifizieren welche zu den Inhomogenitäten führen. Dazu wurden einerseits einzelne Defekte in der Absorberschicht

mittels REM- und EDX-Analysen genauer untersucht. Auftretende kreisförmige Abplatzungen konnten auf Lösungsmittelrückstände zurückgeführt werden und durch zusätzliche Trocknungsphasen der Sol-Gel-Schicht größtenteils eliminiert werden. Weiters wurden unterschiedliche Cu-Se-Defekte (vgl. Abbildung 12) genauer untersucht und analysiert. Es wird angenommen, dass die auftretenden Defekte einerseits durch geringes Selen-Angebot in der dritten Beschichtungszone und andererseits durch ursprüngliche SiO_2 -Defekte verursacht werden.

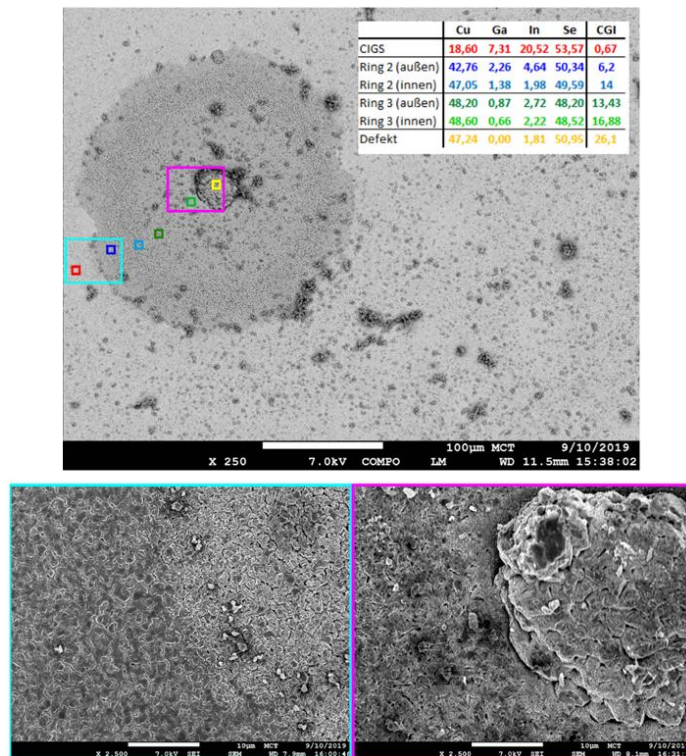


Abbildung 12: Oberflächensensitive REM-Aufnahmen (7keV) der Kupferselenid-Defekte. Die Tabelle gibt die jeweiligen elementaren Zusammensetzungen wider. Unten sind Detail-Aufnahmen sichtbar.

Neben den Defektanalysen wurden zusätzlich IV-Messungen an unterschiedlich großen Zellen (Fläche: 20-100 mm^2) durchgeführt und die Abhängigkeit der Stromdichte von der Zellfläche analysiert. Bei guter Flächenhomogenität sollte die Stromdichte unabhängig von der Zellfläche sein. Während dies im ersten Projektabschnitt noch nicht gegeben war, konnten im zweiten Projektabschnitt Proben hergestellt werden, bei denen nur mehr eine vernachlässigbare Abhängigkeit beobachtet werden konnte. Es muss zusätzlich erwähnt werden, dass die Zellen ohne zusätzliches, frontseitiges Metallgitter vermessen wurden, weswegen bei den größeren Zellen ein geringer zusätzlicher Widerstand aufgrund des nicht vernachlässigbaren Flächenwiderstands des Frontkontakts der Zelle auftritt.

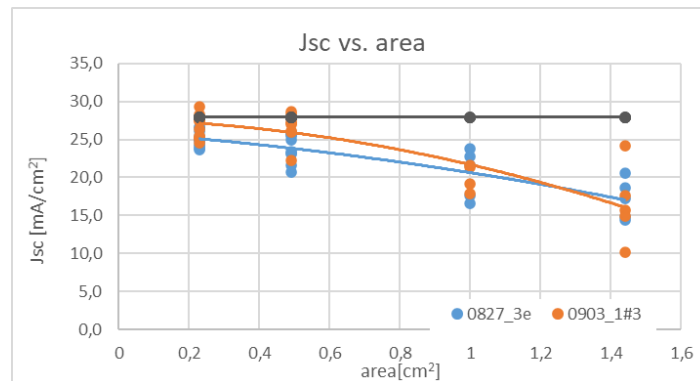


Abbildung 13: Abhängigkeit der Stromdichte (j_{sc}) von der Zellfläche für unterschiedliche bei Sunplugged produzierte Proben.

Photovoltaikmodule

Die gute Homogenität der produzierten CIGS-Solarzellen ist Voraussetzung für die Anwendung der **seriellen Verschaltung der Solarzellen zu Modulen**, die nach Fertigstellung des CIGS-Solarzellenmaterials angewendet wird.

Der von Sunplugged entwickelte Verschaltungsprozess bietet **volle Gestaltungsfreiheit in Bezug auf Geometrie, Größe und Ausgangsspannung** eines Photovoltaikmoduls.

Die monolithische Verschaltung der Fa. Sunplugged die aus der Kombination eines Laser-Strukturierungsprozesses und zweier Tintenstrahldruckprozesse besteht, ist für Polyimid bereits gut reproduzierbar und mit tolerierbaren Verlusten möglich. Die Hauptverluste treten hierbei zu einem geringen Teil im Laserprozess und zu einem großen Teil im, dem Druckprozess nachfolgenden, Sinterprozess (thermisches Aushärten der leitfähigen Tinte) auf.

Der Laserprozess ist bei Polyimidfolien bereits gut unter Kontrolle und benötigt nur mehr geringe Optimierung der Laserparameter, um die durch lokal hohen Temperatureintrag entstehenden Defekte zu eliminieren. Allerdings stellt dieser bei Stahlfolien eine zusätzliche Herausforderung dar, da **bei zu hohen Laserleistungen die Gefahr besteht, die isolierende „Glasschicht“ zu zerstören**, was zu Kurzschlüssen führt.

Es wurden im Projekt zahlreiche Laser-Tests von CIGS-Solarzellen auf Glas/Stahlsubstraten durchgeführt. Bei den ersten konnte der Einfluss des Laserprozesses auf die Glasschicht nicht beurteilt werden, da pinhole-freie Glasschichten erst im zweiten Projektabschnitt zur Verfügung standen.

Im zweiten Projektabschnitt konnten dann erfolgreiche Lasertests auf Stahlsubstraten durchgeführt werden. Während die Verschaltung von funktionsfähigen Modulen im Projektzeitraum nicht mehr möglich war, konnten alle drei unterschiedlichen Gräben (P1, P2, P3) in das CIGS-Material geschrieben werden. Der den gesamten Schichtstapel durchtrennende P1-Graben stelle dabei die größte Herausforderung dar, da durch die Ablation des Rückkontaktes auch die darunterliegende Glasschicht zerstört werden kann, was zu Kurzschlüssen zwischen Stahlsubstrat und Molybdän-Rückkontakt führen kann. Trotzdem konnte ein Prozessfenster gefunden werden, bei dem der gesamte Rückkontakt entfernt wird, ohne dabei einen

Kurzschluss zwischen Substrat und Rückkontakt zu verursachen. Das beste Prozessfenster konnte bei einer Wellenlänge von 514 nm bei Pulsenergien von 82-88 μJ gefunden werden (siehe Abbildung 14).

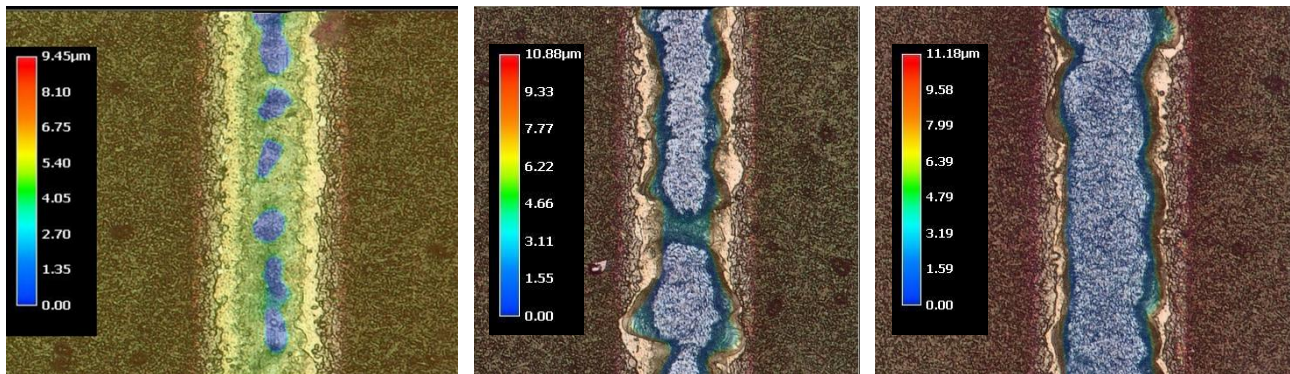


Abbildung 14: Mikroskopbilder von Lasergräben ($\lambda=514\text{ nm}$) im kompletten Schichtstapel (Rückkontakt, Absorberlayer, Frontkontakt) auf Glas-beschichtetem Stahl bei unterschiedlichen Pulsenergien (links: 44 μJ ; mitte: 60 μJ ; rechts: 82 μJ)

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Mit dem Scale-up Projekt wurde eine Lösung für eines der größten Probleme gefunden, welches Sunplugged bei der bisherigen Herstellung von flexiblen CIGS Solarzellen herausforderte.

Es konnte eine passende Folie entwickelt werden, die flexibel ist, hohe Prozesstemperaturen aushält (>500 Grad Celsius) und trotzdem eine integrierte, serielle Modulverschaltung erlaubt.

Mit diesem neuen Trägermaterial konnte der Technologie-Reifegrad der Dünnschicht-Photovoltaik von Sunplugged weiter gesteigert und die Basis für eine reproduzierbare, kostengünstige Rolle-zu-Rollefertigung von CIGS-Solarzellen gelegt werden.

Die wesentlichen Ergebnisse des Projekts zusammengefasst sind:

1. Entwicklung von temperaturstabilen, dielektrischen Folien für die Herstellung von flexiblen Dünnschichtsolarzellen.

Im Projekt wurden multifunktionale dielektrische Beschichtungen für Metallfolien entwickelt, die als Substrat für Rolle-zu-Rolle produzierte, flexible Photovoltaik-Module dienen.

Die Hauptanforderungen an die entwickelte Schicht sind einerseits eine komplette elektrische Isolation des Stahlsubstrats von der Dünnschicht-Solarzelle und andererseits eine Barriere für die Diffusion von Ionen (insbesondere Eisenionen) vom Substrat in die Dünnschicht zu bilden. Diese Beschichtung ist

notwendig, um die monolithische Zellverschaltung, welche eine effiziente Rolle-zu-Rolle-Produktion von flexiblen Solarmodulen erlaubt, mit dem Vorteil eines Hochtemperaturprozesses (bei der Absorberherstellung) zu verbinden, welcher die Steigerung der Zellwirkungsgrade erlaubt. Da bisher keine solche Beschichtung existiert, die allen Anforderungen der Dünnschicht-Solarzellen-Produktion entspricht, waren monolithisch verschaltete Solarmodule bisher nur auf Kunststofffolien erhältlich.

2. Aufbau einer Rolle-zu-Rolle Versuchsanlage für die großflächige Abscheidung von Multischicht-Rückkontakten, mit der stabile, rissfreie CIGS-Solarzellen mit geringen Wirkungsgradverlusten möglich sind.

3. Herstellung von CIGS-Solarzellen mit Wirkungsgraden von 14,3% und verbesserter Homogenität über die gesamte Beschichtungsbreite im Rolle-zu-Rolle-Verfahren auf Metallfolien mit multifunktionaler dielektrischer Barrierschicht.

4. Aufbau einer Rolle-zu-Rolle Messplattform für CIGS Solarzellen

5. Entwicklung von innovativen Produktkonzepten

Durch Variation von Form, Größe und elektrische Eigenschaften ist es mit der gedruckten Verschaltung von Sunplugged möglich, die Spezifikation eines Photovoltaikmoduls je nach Anwendungsbedarf anzupassen. Im Projekt wurden daher mehrere Produktkonzepte entwickelt, welche die Vorzüge dieser Flexibilität demonstrieren sollen.

Aus mehreren Produktkonzepten wurden dann zwei Klassen an Anwendungen definiert, für die Demonstratoren gebaut wurden. Der erste Demonstrator ist ein gewölbtes Photovoltaikmodul mit hoher Modulspannung bei begrenzten Abmessungen. Ein Anwendungsfall der z.B. bei Dachziegeln vorkommt. Die zweite Kategorie an Demonstratoren sind folienartige, längliche Photovoltaikmodule. Solche PV-Module können z.B. in Beschattungssystemen, Fassaden und Zäunen eingesetzt werden.

Da der notwendige Laserprozess erst kurz vor Projektende auf das neue Substrat übertragen werden konnte (vgl. *Abschnitt 3, Module*), wurden die Demonstratoren mit CIGS-Solarzellen auf Polyimidfolie hergestellt.

In einem ersten Schritt wurden die großflächigen Solarzellen zu einem seriell verschalteten „Photovoltaikhalbzeug“ verarbeitet. Dazu wurden die großflächigen Solarzellenmuster zuerst mittels Kurzpuls-Laser entsprechend den definierten Modulgeometrien als auch der erforderlichen Modulspannung mit Mikrostrukturen versehen. In diese Mikrostrukturen wurden sowohl dielektrische als auch elektrisch leitfähige Materialien gedruckt und die damit die gewünschte serielle Solarzellenverschaltung realisiert. Eine Herausforderung stellte die Einkapselung der Module dar. Aufgrund der gekrümmten Form bzw. der Vorgabe möglichst biegsam zu sein, musste die volle Flexibilität der Module ausgenutzt werden. In mehreren Versuchsreihen wurden die idealen Laminationsbedingungen ermittelt.

Energieforschungsprogramm - 04. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

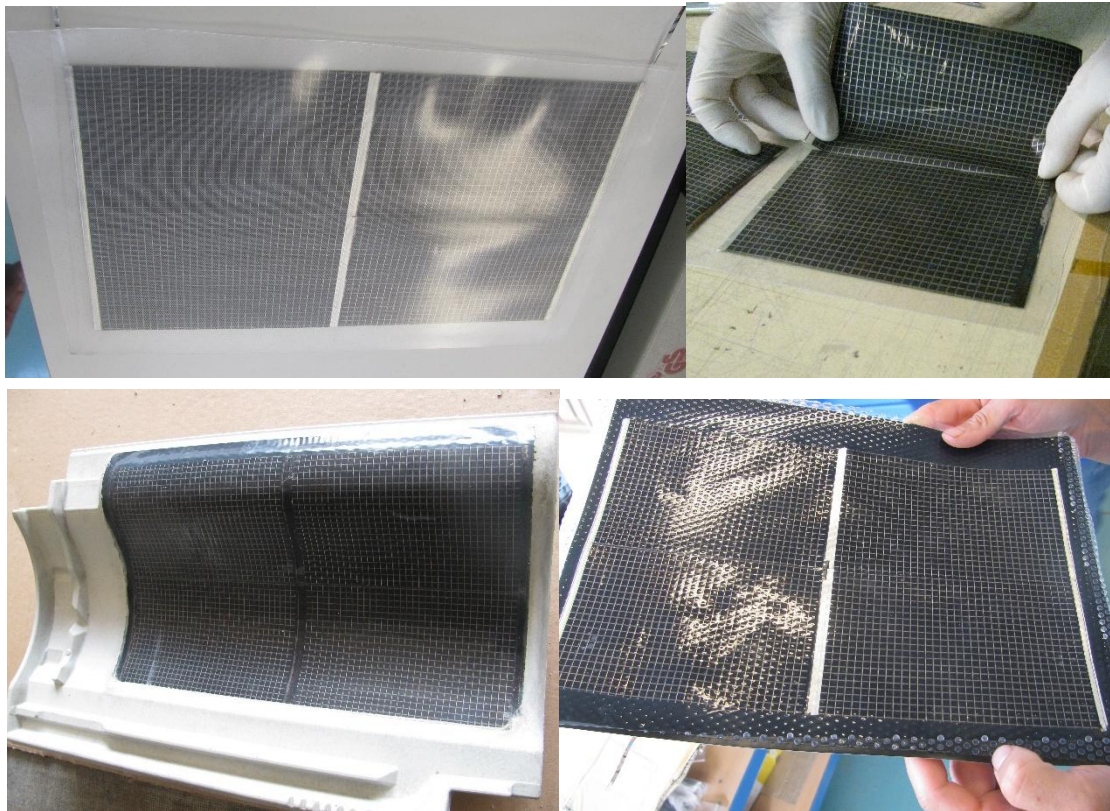


Abbildung 15: Produktion der Module inklusive Parallelverschaltung und Lamination für die Dachziegel.



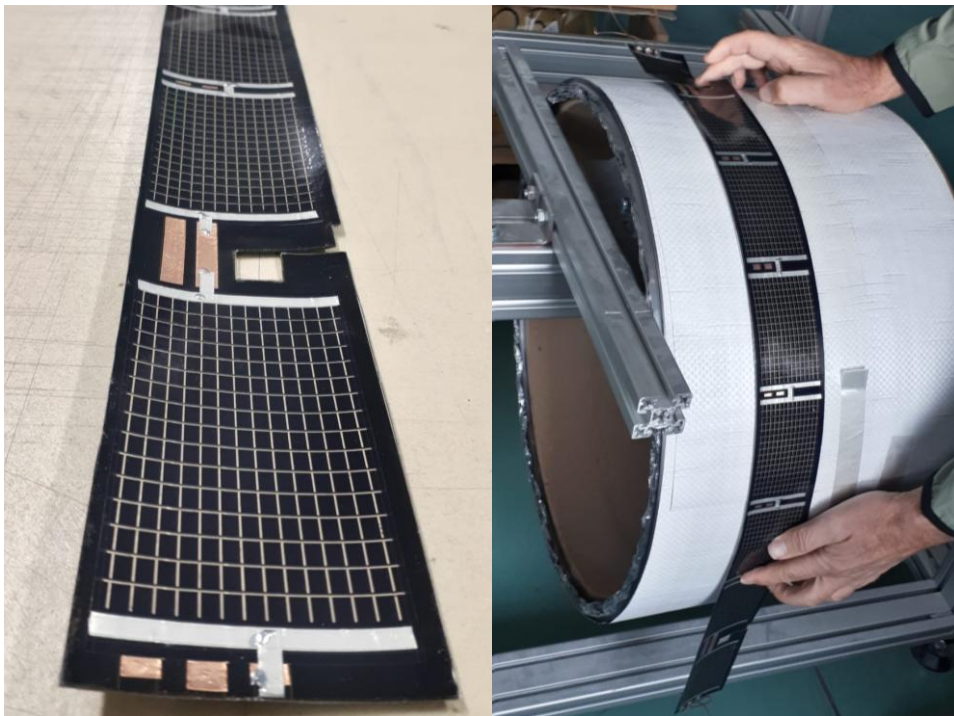


Abbildung 16: Fertige längliche PV Module mit unterschiedlichen Dimensionen, Modulspannungen, Formen (z.B. mit und ohne Aussparungen).

Schlussfolgerungen

Mit der flexiblen Photovoltaikfolie von Sunplugged wird in Österreich ein global vermarktbare Produkt geschaffen, welches den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energieträger in bisher nicht realisierbaren Bereichen ermöglicht. Das Projekt schaffte und festigte qualifizierte Arbeitsplätze in Tirol und stärkte das Know-how in der Entwicklung von energierelevanten Hochtechnologien, sowie in Mikro- und Nanotechnologien (Dünnschichtprozesse, R2R Fertigung, Laserstrukturierung...).

Basierend auf den Ergebnissen des Projekts wurde ein Produktionskonzept entwickelt, mit dem die Herstellung von kundenindividuellen Photovoltaikmodulen von der Rolle in Österreich realisiert werden kann.

4 Ausblick und Empfehlungen

Der erfolgreiche Abschluss des Projektes ermöglicht es, den CIGS-Prozess für eine Produktion von mindestens 5 MW_{peak} in Österreich hochzuskalieren. Mit der flexiblen Photovoltaikfolie von Sunplugged wird ein global vermarktbare Produkt geschaffen, welches den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energieträger in bisher nicht realisierbaren Anwendungen ermöglicht. Sunplugged kann auf eine Eigenentwicklung in Form eines hochoberflächentemporal stabilen Substrats für seine Dünnschichtsolarzellen setzen.

In Planung ist eine Produktionsstätte für individuell an die Kundenwünsche angepasste, gefertigte Photovoltaikmodule mit einer Jahreskapazität von 5 Megawatt.

Das geplante Werk soll erste Pilotkunden beliefern können und gleichzeitig als Blaupause für Anlagen dienen, um flexible Solarmodule im industriellen Maßstab kostengünstig herzustellen.

Sunplugged kann die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse in die Planung und den Aufbau der Produktion einfließen lassen.

Aufbauend auf den hier erzielten Ergebnissen sind zwei Nachfolge- F+E Projekte bei Sunplugged in Arbeit. Im NoFrontiers Projekt (Energieforschung 5. Ausschreibung) werden die Effizienzverbesserung durch die Optimierung des CIGS-Absorbers weiter vorangetrieben, wobei neben der Effizienzsteigerung die Entwicklung einer Prozesskontrolle für den CIGS Prozess einen wesentlichen Schwerpunkt bildet. Um das Kostenpotenzial von CIGS Solarzellen weiter auszuschöpfen, wird die Entwicklung und Optimierung von gesputterten, cadmiumfreien Frontschichten forciert. Die Verminderung der Verschaltungsverluste von derzeit 40 % auf 20 % soll durch verbesserte Laserstrukturierung mithilfe eines Femtosekunden-KurzpulsLasers und die Minimierung der inaktiven Flächen mittels alternativen Druckverfahren reduziert werden.

Bezüglich der Entwicklung des Glas/Stahlsubstrats werden im Projekt InnoSteel4CIGS (Produktion der Zukunft 32. Ausschreibung) die Multischicht-Struktur aus isolierenden Oxiddünnschichten weiterentwickelt und die Barriereigenschaften weiter verbessert. Darüber hinaus wird eine schnelle und präzise Prüfmethode entwickelt, um mögliche Nadellöcher (Pinholes) oder Mikrorisse in den Isolationsschichten zu identifizieren.

5 Kontaktdaten

ProjektleiterIn
Mag. Andreas Zimmermann
Sunplugged Solare Energiesysteme GmbH
Mindelheimer Strasse 6
A-6130 Schwaz
Tel: +43.5264-20501
e-mail: andreas.zimmermann@sunplugged.at
Web: www.sunplugged.at

Auflistung der weiteren Projekt- bzw. KooperationspartnerInnen

Austrian Institute of Technology GmbH
Sunnybag GmbH
Universität Innsbruck- Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, A-6020 Innsbruck