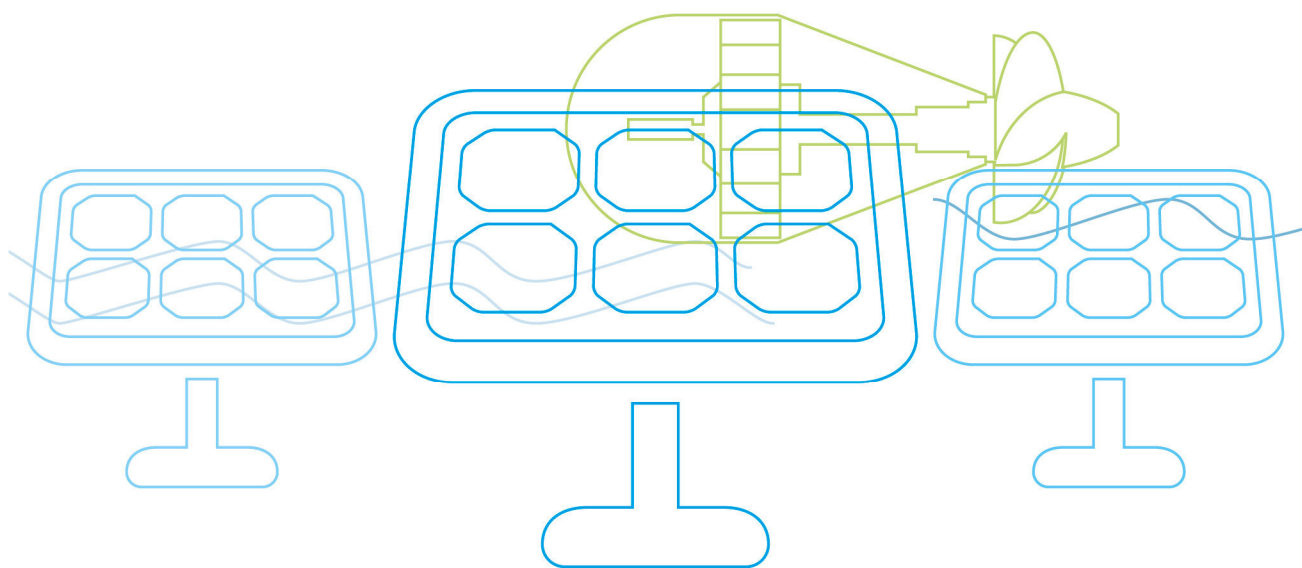




SimpliCIS

Flexible Dünnschichtsolarzelle für die
Gebäude- und Fahrzeugintegration



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A handwritten signature in black ink, reading 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, reading 'Ingmar Höbarth'.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Abstract	3
1 Einleitung	4
2 Inhaltliche Darstellung	5
3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen	19
4 Ausblick und Empfehlungen	21

Kurzfassung

Im Zuge des SimpliCIS-Projekts wurde eine flexible Dünnschichtsolarzelle auf Basis von CIS/CIGS Verbundhalbleitern entwickelt.

Aufgrund des entwickelten Solarzellendesigns sind SimpliCIS-Photovoltaikmodule besonders geeignet für integrative solare Lösungen und zeichnen sich weiters durch ihr hohes Wirkungsgradpotenzial aus. Um die gesteckten Ziele zu erreichen, wurden grundlegende Entwicklungen im Bereich der Solarzellenforschung und der damit verbundenen Dünnschichtprozesse durchgeführt.

Die SimpliCIS-Solarzelle enthält keine toxischen Stoffe, kann in einem endlosen Fertigungs-verfahren hergestellt werden und erlaubt aufgrund des Schichtaufbaus, eine völlig neue, druckbare Zellverschaltung.

Neben der Solarzellenforschung selbst, zielt daher der zweite Innovationskreis auf die Entwicklung der flexiblen Verschaltung von Dünnschichtsolarzellen. Mit dieser flexiblen Kontaktierung, basierend auf einer Kombination aus selektiver Laserablation und flexibler Drucktechnik, können die elektrischen und geometrischen Spezifikationen von Photovoltaikmodulen „on-the-fly“ eingestellt werden.

Weiters kann durch diese Innovation der Wirkungsgrad auf Modulebene gesteigert werden und es werden aufwändige Strukturierungsprozesse in der Fertigung eingespart.

Aufgrund der angestrebten hohen Wirkungsgrade und der anpassbaren Modulspezifikationen ist die SimpliCIS- Solarzelle prädestiniert für den Einsatz

- in der gebäudeintegrierten Photovoltaik
- bei der Integration in Fahrzeugen (v.a. Hybrid-und Elektrolandfahrzeuge, Boote) und
- in der Integration von Solarmodulen in elektronischen Geräten.

Abstract

The main objective of this project is the development of a flexible thin film solar cell based on CIS/CIGS semiconductor compound materials. Due to their special design SimpliCIS solar cells are particularly suitable for integrated solar power applications and possess high efficiency potential.

Within the research project all functional layers of the thin-film solar cell and all corresponding thin-film processes have been developed.

SimpliCIS solar cells contain no toxic materials, can be produced in an endless production process and enable a novel printable interconnection of photovoltaic modules due to their special layer composition. Furthermore this flexible interconnection scheme for thin-film solar cells has been explored and developed.

The novel interconnection is based on a short-puls laser scribing process and a flexible printing technology that allows the adjustment of the size, shape and voltage of the photovoltaic module on the fly.

Moreover this novel approach increases the efficiencies of photovoltaic modules and eliminates costly fabrication steps.

On the basis of its high-efficiency, flexibility and customisability SimpliCIS solar cells are ideal candidates for the use in Building Integrated Photovoltaics and for the integration of solar power into vehicles and devices.

1 Einleitung

Zielsetzungen des Projekts

Die Photovoltaik gilt als eine Schlüsseltechnologie für die zukünftige Energieversorgung. Sie zeichnet sich als einzige regenerative Energiequelle dadurch aus, dass sie sich einfach in Objekte und Baukörper integrieren lässt. Trotz dieser Einzigartigkeit fristet die Integration der Photovoltaik in Gebäudehüllen oder Geräten aber noch ein Nischendasein.

Im Zuge des SimpliCIS-Projekts wurde eine flexible Dünnschichtsolarzelle auf Basis von CIGS Verbundhalbleitern erforscht und entwickelt, welche sich vor allem für die Integration in Gebäudehüllen, Geräten und Fahrzeugen eignet.

Von allen derzeit bekannten Dünnschicht-Photovoltaikansätzen verfügen Solarzellen auf Basis von CIGS –Halbleitern (Copper, Indium, Gallium, Sulphur, Selenium) über das höchste Potenzial in Bezug auf Wirkungsgradsteigerungen unter wirtschaftlich akzeptablen Bedingungen. Diese flexible Dünnschichtsolarzelle kann im Rolle-zu-Rolle Verfahren endlos hergestellt werden und in einer nachfolgenden Fertigungssequenz zu Photovoltaikmodulen verarbeitet werden. Diese Fertigungssequenz besteht aus einem Kurzpuls-Laserprozeß zum Anbringen von Mikrogräben kombiniert mit einem hochpräzisen Siebdruck-Prozeß. Dieser einmalige Ansatz, der im Zuge des SimpliCIS-Projekts konzipiert und entwickelt wurde, erlaubt eine kundenorientierte Spezifikation der Solarmodule und reduziert die Herstellkosten.

Dadurch wird die Fertigung von kleineren Losgrößen wirtschaftlich möglich und erschließt neue Anwendungen für die Photovoltaik, v.a. bei der Integration von maßgeschneiderten Solarzellen in Baukomponenten (Dachziegel, Jalousien, etc.), Fahrzeugen und Geräten.

Aufbau und Methodik des Projektes

Aufgrund der Anforderungen aus den anvisierten Anwendungsbereichen (Integrative Photovoltaik-Lösungen) wurde ein grundlegend neues Solarzellen- und Solarmodulkonzept entwickelt. Die Anforderungen an die Dünnschichtsolarmodule wurden mittels Interviews mit potenziellen Kunden und Experten erhoben.

Ausgehend von den anvisierten Anwendungen wurden die Konsequenzen für die Dünnschichtsolarzelle selbst und für das Photovoltaikmoduldesign erarbeitet. Aus diesem idealisierten Design wurden wiederum die Auswirkungen auf das Schichtsystem der Dünnschichtsolarzelle und aller damit verbundenen Herstellprozesse analysiert und bewertet (z.B. mechanische Stabilität, Durchschlagsspannungen, Rauigkeiten, optische Eigenschaften von bestimmten Grenzschichten für Laserablation, Prozessierbarkeit, etc.).

Für alle funktionalen Schichten wurden Material- und Prozesseigenschaften experimentell entwickelt. Für die Entwicklung und experimentellen Herstellung der Absorberschicht wurden zwei Laboranlagen basierend auf unterschiedlichen Kristallisationskonzepten gebaut (Diffusion und Kristallisation unter Vakuum bzw. unter Atmosphärendruck). Nach Entwicklung aller Einzelprozesse wurden erste komplette Dünnschichtsolarzellen hergestellt und charakterisiert. Diese Dünnschichtsolarzellen dienten weiters als Basismaterial zur Entwicklung eines Kurzpuls-Laserprozesses. Mit Hilfe dieses Kurzpuls-Laserprozesses werden die dünnen Schichten wieder selektiv abgetragen. In den dadurch entstehenden Mikrogräben kann gezielt eine elektrisch isolierende und eine elektrisch leitende Druckpaste zur seriellen Verschaltung aufgetragen werden. Diese völlig neue Art der integrativen Verschaltung von Photovoltaikmodulen wurde im Projekt auf Substratbreiten von bis zu 300 mm hochskaliert.

2 Inhaltliche Darstellung

Ausgangssituation/Motivation des Projektes

Die Photovoltaikindustrie konnte in den letzten zehn Jahren große Erfolge bei der Reduktion der Herstellkosten erzielen. Die Reduktion der Herstellkosten ist vor allem durch das Nutzen von Lerneffekten, einer starken Ausweitung der Produktionskapazitäten, weitgehender Automatisierung und Reduktion des Materialverbrauchs geprägt.

Der Nachteil dieser Bestrebungen ist eine stark eingeschränkte Flexibilität in Bezug auf die Anforderungen speziell bei integrativen, solaren Lösungen.

Gerade die Photovoltaik ist nämlich die erneuerbare Energietechnologie, welche grundsätzlich sehr gut direkt in Verbrauchern, wie Geräten, Fahrzeugen und Gebäudehüllen integrierbar ist. Der "Einheitsgrößen"-Ansatz der Solarindustrie schließt aber solche Anwendungen der Photovoltaik in zahlreichen, potenziellen Märkten aus.

Produkte mit integrierter Photovoltaik, wie Solardachziegel, Fassadenelemente oder photovoltaisch betriebene Geräte (Sensoren, Leuchten, Elektroautos) können mit dem Stand der Technik kaum oder nur suboptimal realisiert werden.

Entwicklung der SimpliCIS-Solarzelle

Schwerpunkt des industriellen Forschungsprojekts war die Entwicklung einer folienartigen CIGS - Dünnschichtsolarzelle, die für integrative Solaranwendungen geeignet ist. Diese Solarzelle sollte auch endlos in einem Rolle-zu-Rolle Verfahren herstellbar und monolithisch kontaktierbar sein. Weiters sollten Wirkungsgrade im Bereich von über 12 Prozent in der industriellen Umsetzung erreichbar sein. Photovoltaikmodule auf Basis von CIGS Halbleitern haben, nach aktuellem Wissensstand, das höchste Wirkungsgradpotenzial. Die Entwicklung und Hochskalierung von CIGS-Solarmodulen auf flexiblen Substraten ist jedoch eine technisch sehr anspruchsvolle Aufgabe, da zahlreiche prozess- und materialspezifische Faktoren interagieren.

Substrat

Die Wahl des Substrates einen entscheidenden Einfluss auf Wirkungsgradpotenzial, Prozessierbarkeit und Anwendbarkeit hat. Es wurden daher verschiedene Solarzellen auf verschiedenen Substraten (Polyimid, Edelstahl, Aluminium und für Vergleichsmessungen auch auf Glas) hergestellt.

Für die Herstellung flexibler Solarzellen bieten sich aus Kostengründen vor allem Stahl-oder Polyimid-Folien an. Im Falle von Stahl sind zusätzliche Prozessschritte nötig, um einerseits die Eindiffundierung von Eisen in die CIGS-Schicht zu verhindern und andererseits die elektrische Isolation zum Molybdän-Rückkontakt zu gewährleisten.

Außerdem können zusätzliche Zwischenschichten (z. B. Titan) zur Verbesserung der Haftung nötig sein. Bei der Verwendung einer Polyimid-Folie müssen Einschränkungen bei der Temperaturbehandlung beachtet werden. 400°C wird für Polyimid als Obergrenze für die nötigen Temperaturbehandlungen angesehen. Die Kristallisation der CIGS-Schicht sollte allerdings trotz dieser Limitierung erreicht werden können.

Aus einer Anzahl von mehreren dutzend möglichen Folien wurden sechs Varianten näher evaluiert, nämlich

- eine reinen Polyimidfolie (Kapton)
- eine Polyimidfolie mit Edelstahlfolie kombiniert
- eine Edelstahlfolie mit keramischer Zwischenschicht
- eine Edelstahlfolie mit Glasschicht
- eine Edelstahlfolie mit Diffusionsbarriere
- eine Edelstahlfolie mit Diffusionsbarriere und eigens entwickelter Zirkonoxid-Isolation

Die Substrate basierend auf Polyimidfolien zeigten sehr ungünstiges Verhalten hinsichtlich auftretender mechanischer Schichtspannungen. Aufgrund der Möglichkeit, höhere Prozesstemperaturen für die CIGS-Kristallisation zu nutzen, wurden die Varianten mit Edelstahlfolie (ohne Polyimid) letztlich bevorzugt. Temperaturen von 500 bis 550°C sind für die Herstellung hocheffizienter CIGS-Absorberschichten nach derzeitigem Wissensstand jedenfalls notwendig.

Herstellung des Schichtsystems

Das Basis-Schichtsystem der SimpliCIS-Solarzelle setzt sich aus vier Einzelschichten zusammen: (1) Molybdän-Rückkontakt, (2) CIGS-Absorber, (3) ZnMgO-Pufferschicht, (4) ITO-Frontkontakt.

Zusätzlich ist, aufgrund des spezifischen Weiterverarbeitung und der flexiblen Modulkontaktierung der SimpliCIS-Solarzelle, mindestens eine Barrierschicht zur Verhinderung der Eisendiffusion und eine elektrisch isolierende Schicht zwischen Edelstahlfolie und metallischen Rückkontakt notwendig.

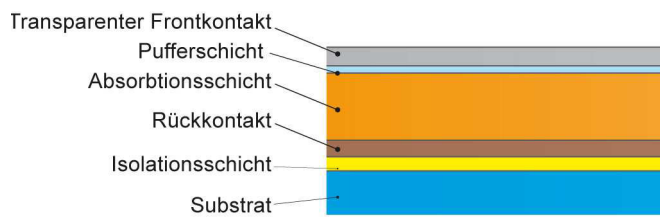


Abb1: Schichtaufbau der SimpliCIS Solarzelle

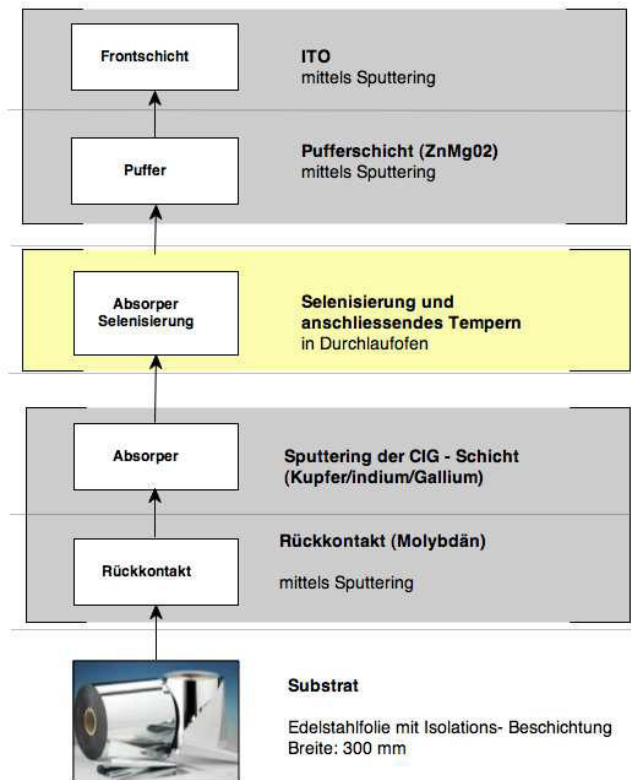


Abb 2: Beschichtungssequenzen zur Herstellung der Sunplugged Solarzelle.

In einem ersten Beschichtungsprozess werden eine elektrische Isolationsschicht und der Rückkontakt auf eine gereinigte Edelstahlfolie mittels DC-Sputtering aufgebracht. Die Isolationsschicht besteht aus Zirkonoxid und als Rückkontakt dient eine dünne Schicht aus Molybdän und natriumdotierten Molybdän. Auf den gesputterten Rückkontakt wird eine Legierung aus Kupfer, Indium und Gallium (Mischtarget) ebenfalls mittels Kathodenzerstäubung (Sputtering) aufgebracht. Anschließend werden die Schichten dann unter Selen-Atmosphäre bei erhöhten Substrattemperaturen kristallisiert. Dabei wird in einem Durchlaufofen Selen aufgebracht und anschließend wird das Metallband bei ca. 550 Grad Celsius wärmebehandelt. Nach der Wärmebehandlung werden die Pufferschicht aus Zinkmagnesiumoxid und die transparente Fensterschicht bestehend aus Indiumzinnoxid wiederum mittels Kathodenzerstäubung aufgebracht.

Die grundlegenden Erkenntnisse im Bereich der Beschichtungsprozesse aus dem ersten Projektjahr wurden auf die speziellen Erfordernisse der SimpliCIS-Solarzelle (Edelstahlsubstrat, keine toxischen Materialien, Möglichkeit der integrierten Kontaktierung) umgelegt und alle Sputterprozesse konnten auf 300 mm Breite Substrate hochskaliert werden.

Für die Aufskalierung der einzelnen Schichten wurden zwei Sputteranlagen adaptiert, mit denen vorerst jeweils zwei Schichtmaterialien aufgebracht werden:



Abb. 3: Modifizierte Anlage zur Herstellung der Rückkontakt und Precursor-Schicht für die Absorberherstellung



Abb. 4: Anlage zur Herstellung der Frontschichten

Die Anlage zur Herstellung des Rückkontakts und der Precursor-Schichten war ursprünglich für ebene Substrate der Dimension 56x42 cm ausgelegt und wurde für die Hochskalierung der SimpliCIS-Solarzelle modifiziert, um auf die flexiblen Folien beschichten zu können (bis zu 56x42 cm).

Rückkontakt (Molybdän)

Die bereits im ersten Projektjahr erfolgreich durchgeführte Prozessentwicklung wurde auf die große Sputteranlage übertragen, so dass Rückkontakt und CIG-Schicht in derselben Anlage hergestellt werden können. Abb. 5 zeigt die beiden Targets (Rechts: Mo, Mitte: CIG) neben einem weiteren verfügbaren Platz (links), der durch Belegung mit einem weiteren CIG-Target zu erhöhtem Durchsatz genutzt werden kann.

Durch Optimierung von Leistung und Druck im Mo-Sputterprozess konnte die elektrische Leitfähigkeit der Mo-Schichten verbessert werden, wobei sich mittels Vier-Punkt-Messung ein durchschnittlicher spezifischer Widerstand von 16 $\mu\Omega\text{cm}$ über die gesamte Folienbreite ergab.



Abb. 5: Targets der PVD Anlage zum Sputtern von Rückkontakt und CIG Precursor (rechts: Mo, Mitte: CIG)

CIGS-Absorberschicht

Die Erzeugung des CIGS-Absorbers erfolgt in zwei Einzelschritten: Zunächst wird eine CIG-Precursor-Schicht mittels DC-Magnetron-Sputter-Verfahren aufgebracht, die anschließend in einem Hochtemperaturprozess selenisiert wird.

(1) CIG-Absorber-Precursor

Der Einsatz des CIG-Targets (Dimension: 480x88x6mm) im Sputterprozess verlief erfolgreich. Der Prozess zeichnet sich durch ein stabiles Plasma und konstante Parameter aus – auch bei längerer Beschichtungsdauer (>2 Stunden). Zunächst wurden die Einstellungsgrößen Strom, Druck und das Magnetfeld variiert um ein stabiles Prozessfenster festzulegen. Aufgrund niedrigschmelzender Indiumphasen im CIG-Target muss die Leistungsdichte auf 2 W/cm^2 begrenzt bleiben (Angabe des Herstellers). Dies entspricht einer Maximalleistung von ca. 850 W bzw. einem Strom von $\sim 1,5 \text{ A}$ (je nach Einstellung). Bis zu diesem Strom traten im Prozess keinerlei Schwierigkeiten auf. Hinsichtlich Druck konnte ein Fenster von $\sim 2 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$ bis $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$ bestimmt werden, in dem ohne das Auftreten von Arcs gearbeitet werden kann.

Das Magnetsystem ist höhenverstellbar, wobei jene Position, die dem Target am nächsten liegt, sich durch die niedrigste Brennspannung auszeichnet und als Ausgangsposition verwendet wurde. Die Targetausnutzung kann durch zurücksetzen der Magneten optimiert werden, da hier ein diffuseres, weniger auf den Racetrack fokussiertes Plasma entsteht. Dies ist jedoch mit einer höheren Brennspannung und damit Leistungseinspeisung verbunden.

Ein wesentlicher Aspekt in der Sputterabscheidung der CIG-Schicht ist die Homogenität dieser Schicht über die gesamte Folienbreite von 30 cm. Zur Bestimmung der CIG-Dicke in Abhängigkeit von der Position unter dem Sputtertarget wurden Folienstücke von $5 \times 5 \text{ cm}^2$ beschichtet (siehe Abb. 6) und anschließend über Wiegetechnik auf die jeweilige Schichtdicke rückgerechnet. Es zeigten sich – auch abhängig von den gewählten Druck-, Leistungs- und Magnetfeldeinstellungen – innerhalb der angestrebten Folienbreite von 30 cm nur geringe Dickenänderungen von wenigen Prozent.

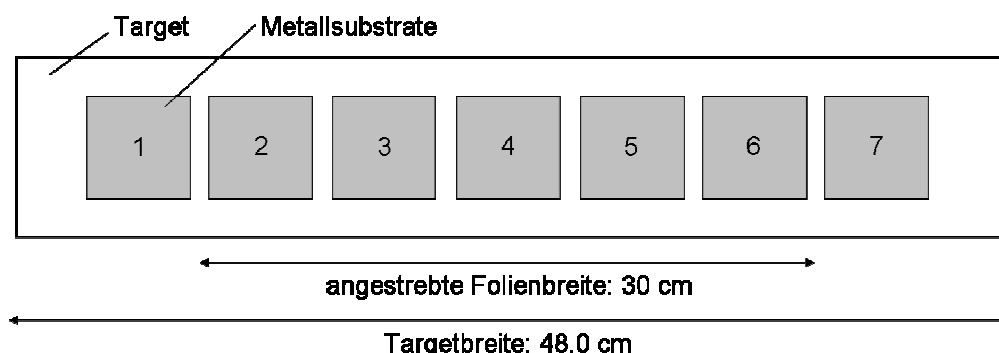


Abb. 6: Anordnung der Metallsubstrate bei der Bestimmung der Schichtdickenverteilung

In Abb. 7 ist die Schichtdickenverteilung für jene Prozesseinstellung gezeigt, die die homogenste Charakteristik lieferte. Innerhalb von 30 cm wurden Abweichungen $< 2\%$ festgestellt. Die äußeren Positionen fallen stärker ab, sind jedoch für das Upscaling auf 30 cm Folienbreite nicht von Relevanz.

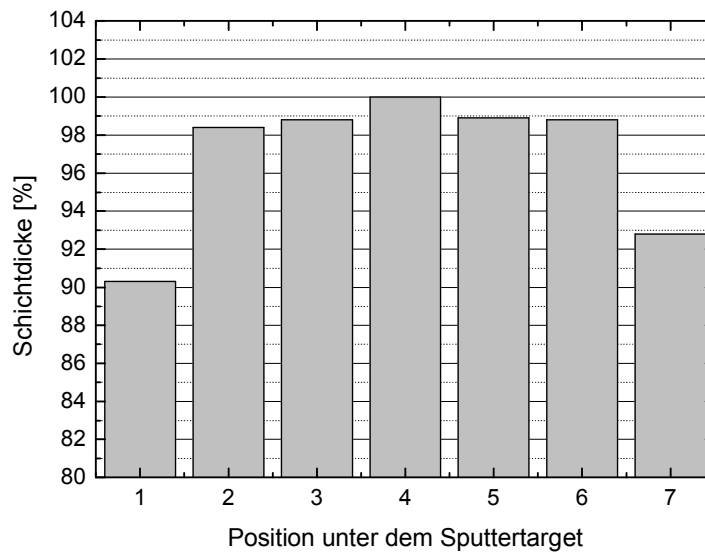


Abb. 7: Abhängigkeit der Schichtdicke über die Targetbreite bezogen auf die Mitte des Targets (100%)

(2) Selenisierung

Die größte Herausforderung im Bereich der Solarzelle war die Herstellung des CIGS-Absorbers. Für die Herstellung der Absorberschicht der SimpliCIS – Solarzelle wurden zwei Versuchsanlagen mit unterschiedlichen Prozessabläufen zur Selenisierung der CIG-Precursorschicht (Variante A: Selenbeschichtung + anschließend Temperaturbehandlung unter Vakuumbedingung und zum anderen Variante B: ein Selenisierungsprozess unter Atmosphärendruck in einer Selendampfhaltigen Gasatmosphäre) geplant und gebaut.

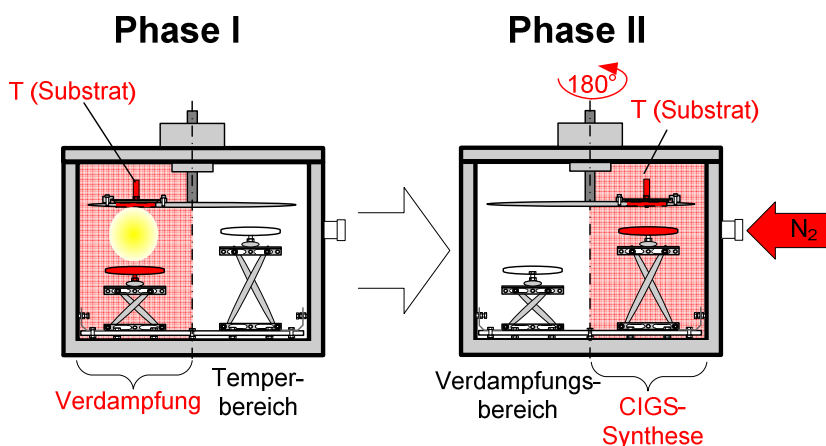


Abb 8: Schema der CIGS Absorber Synthese über Vakuumverdampfung

Mit Hilfe dieser Anlage konnte gezielt die aufgebrachte Selenschicht in ihrer Dicke variiert/kontrolliert werden, erfordert aber zusätzlich Vakuumbedingung.

Anschließend wurden die mit Selen beschichteten CIG Schichten auf 350 bis 500°C über einen Halogenstrahler aufgeheizt und bei unterschiedlichsten Temperaturprofilen getempert. Die Analysen

zeigten folgende Probleme: Zum einen wurde ein zu hoher Grad an binären Seleniden vor allem CuSe_x als auch an Oxiden in der Schicht gefunden. Zusätzlich bildeten sich extreme Spannungen in den Schichten aus die zur Delamination der gesamten Selenidschicht führten. Um diese Probleme zu lösen wurde zum einen die Zusammensetzung des CIG Targets als auch die Beschichtungsparameter optimiert.

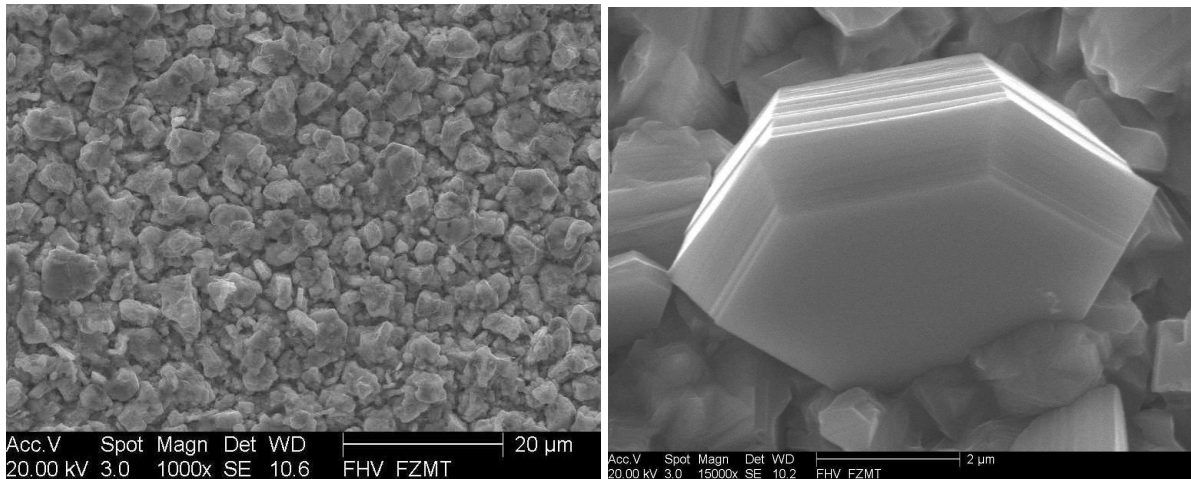


Abb 9: Links: REM Aufnahme einer Selenisierten CIG Schicht und rechts: REM Aufnahme eines unerwünschten Kupferselenid-Kristalls

Parallel zu diesem Ansatz wurde zeitgleich an einem nicht Vakuumansatz der Selenisierung gearbeitet. Dieser Ansatz ist dabei schematisch in der folgenden Ansicht dargestellt.

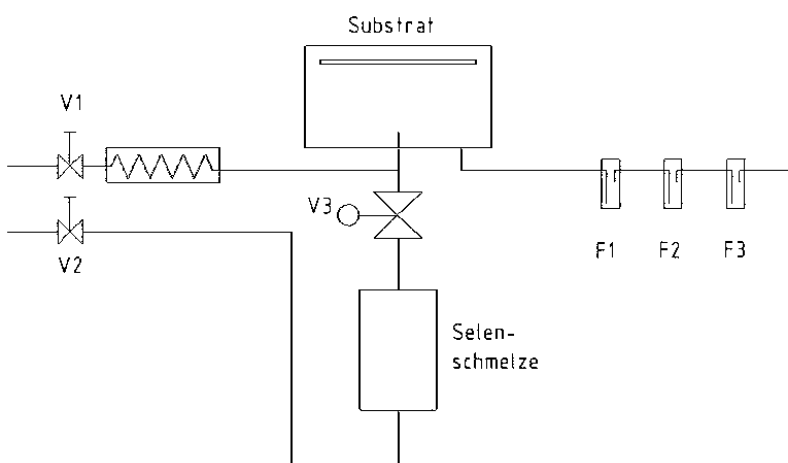


Abb 10: Schema Selenisierung Variante B

Bei diesem Konzept besteht der wesentliche Ansatz, dass sich über einem flüssiges Material immer eine Gasphase des gleichen Materials ausbildet. Wobei der Anteil (Partialdruck) nur von der Temperatur der

Schmelze abhängig ist. Somit wird bei diesem Ansatz Selendampfhaltiges Gas kontinuierlich über die heißen Samples geströmt und so die Selenisierung ermöglicht.

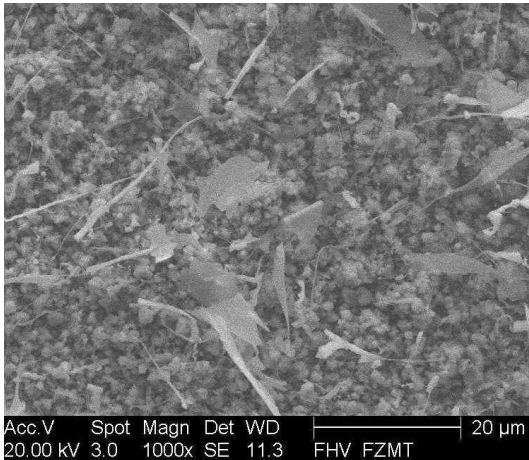


Abb 11: Links: REM Aufnahme einer Selenisierten CIG Schicht nach Variante B

Nach Analyse der gesammelten Daten wurde im Laufe des zweiten Projektjahrs die Entscheidung gefällt, dass alle weiteren Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten auf Basis von Edelstahlsubstraten weitergeführt werden und wir bei der weiteren experimentellen Umsetzung einen Kristallisationsprozess nach Variante B weiterentwickeln.

Pufferschicht: ZnMgO

Der Schichtaufbau wird nach Fertigstellung der CIGS-Schicht mit Puffer- und Frontkontaktschicht weitergeführt. Diese Schichten wurden in einem Rolle-zu-Rolle-System hergestellt, das für maximal vier Sputtertargets ausgelegt ist. Targetgröße: 356x102x6mm.

Die ZnMgO-Pufferschicht wird in einem reaktiven Sputterprozess – ausgehend von metallischem ZnMg – abgeschieden. Abb. 12a zeigt das Target nach einigen Testläufen. In Bild 12a rechts ist die bereits beschichtete Stahlfolie zu erkennen, die über eine kühlbare Walze geführt wird.

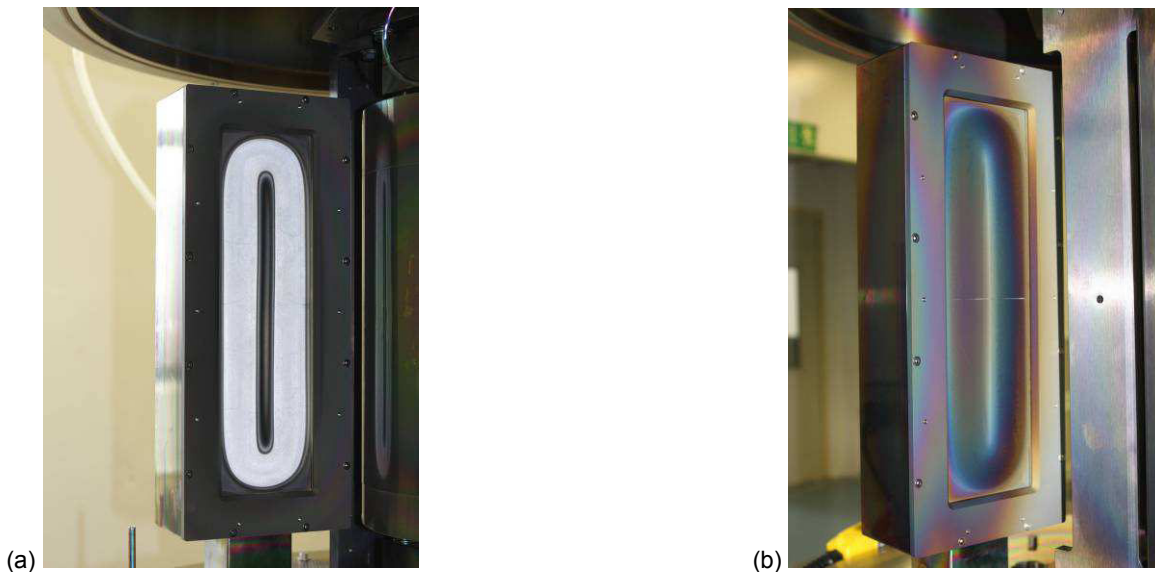


Abb. 12: Target im Roll-to-Roll-Coater: (a) ZnMg-Target (85at% Zn, 15at% Mg);
(b) ITO-Target (90wt% In_2O_3 , 10wt% SnO_2)

Wichtiger Parameter neben der Sputterleistung ist der Sauerstoffanteil in der Gasatmosphäre. Es muss sichergestellt werden, dass transparente Schichten entstehen, um die optischen Verluste möglichst gering zu halten. Gleichzeitig muss ein Absinken der Beschichtungsrate durch Sauerstoff-Überschuss vermieden werden. Es wurden daher Versuche mit unterschiedlichen Leistungen, Drücken und Ar/O_2 -Anteilen durchgeführt. Die Ergebnisse der Vorversuche mit kleinerem Target dienten dabei als Ausgangspunkt, wobei die Targetzusammensetzung leicht variiert wurde: 85at% Zn, 15at% Mg. Abhängig von der Beschichtungsrate, d.h. der Leistung, ändert sich der benötigte O_2 -Bedarf. Für eine Leistung von 900 W wurden 20% Sauerstoff als Grenzwert ermittelt (Abb. 11), bevor erhebliche optische Absorption eintritt.

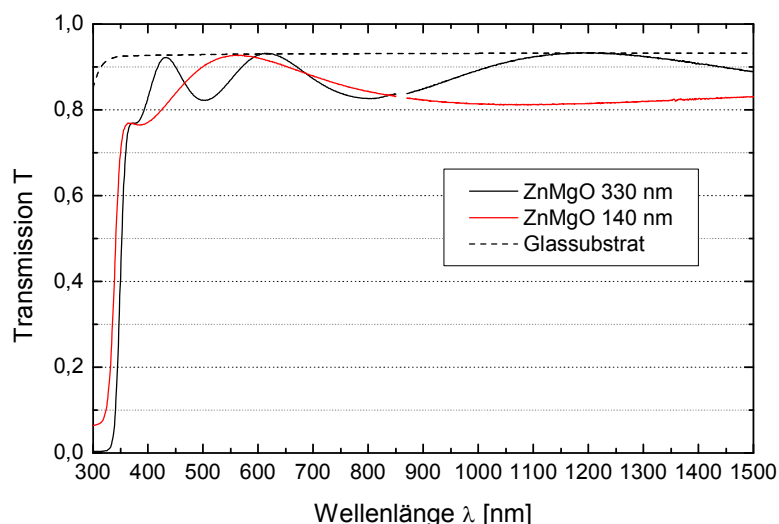


Abb. 12: Transmissionsspektren zweier ZnMgO-Schichten mit verschiedenen Schichtdicken; Einstellungen: Leistung 900 W, Gesamtdruck $3,5 \cdot 10^{-3}$ mbar (80% Ar, 20% O_2), Zuggeschwindigkeit der Folie variabel

Beide dargestellten Schichten weisen im Wellenlängenbereich von 440-850 nm eine Transmission von über 93% auf. Wie an den Maxima der Kurven – in Relation mit der Transmission des Glassubstrates – erkennbar, ist die Absorption vernachlässigbar klein. Über die Schichtdicke kann die Transmission im

nutzbaren Wellenlängenbereich noch gesteigert werden, wobei hier die weiteren Schichten mit berücksichtigt werden müssen.

ITO-Frontkontakt

Zur Abscheidung der ITO-Schichten wurde ein Rechtecktarget (356x102x6mm) mit der Zusammensetzung 90wt% In_2O_3 und 10wt% SnO_2 eingesetzt (siehe Abb. 12b).

Ausgehend von den Parametern für das Kleintarget (3"-Target) konnten mit denselben Einstellungen transparente Schichten mit hoher elektrischer Leitfähigkeit hergestellt werden. Die Leistung wurde mit zunächst 900 W (bezogen auf die Targetfläche) bewusst etwas niedriger gewählt, um die Temperaturbelastung klein zu halten. Dennoch lag der spezifische Widerstand bei $7,4 \cdot 10^{-4} \Omega\text{cm}$ bei einer mittleren Transmission von ca. 91% im Wellenlängenbereich von 440-850 nm. Trotz des oxidischen Targets ist eine geringe Sauerstoffzugabe ins Prozessgas notwendig, um möglichst stöchiometrische und damit absorptionsfreie Schichten abzuscheiden. Etwa 6% O_2 -Anteil sind allerdings ausreichend, wobei größere Mengen zu deutlich schlechteren elektrischen Leitfähigkeiten führen.

Aufgrund der sehr empfindlichen Schichteigenschaften in Bezug auf den Sauerstoffanteil ist eine konstante und homogene Gaszufuhr über die gesamte Folienbreite notwendig. Dies gilt für beide, reaktiv abgeschiedenen Schichten (Pufferschicht und transparente Fensterschicht).

Integrierte, serielle Verschaltung der Solarzellen zu Modulen

Die Ausgangsspannung einer einzelnen Solarzelle, egal wie groß, liegt etwa bei 0,5 Volt. Bei Dünnschichtsolarmodulen werden im Herstellprozess die einzelnen Schichten auf ein Substrat abgeschieden.

Da ein solches Modul, wie erwähnt aufgrund der Materialeigenschaften nur etwa eine Spannung von 0,5 Volt aufweisen würde, wird die Gesamtfläche des Moduls in gleich große Teilflächen unterteilt (strukturiert), die ihrerseits wieder mittels elektrischen Leitern seriell (minus zu plus) verbunden werden. Bei dieser sogenannten monolithischen Verschaltung sind nach heutigem Stand der Technik drei Strukturierungsschritte notwendig. Da die drei Strukturierungsschritte an jeweils unterschiedlichen Schichten angebracht werden, müssen die Beschichtungsprozesse immer wieder von Strukturierungsprozessen unterbrochen werden.

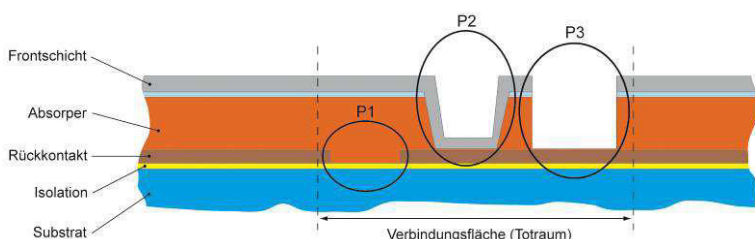


Abb 14: Konventionelle, monolithische Kontaktierung von Dünnschichtsolarzellen zu Modulen. Es sind drei Strukturierungsschritte (P1,P2,P3) notwendig, um die serielle Verschaltung zu erreichen.

Neben der industriellen Forschung im Bereich Dünnschicht-Solarzelle selbst, zielte der zweite große Innovationskreis des Projekts auf die Erforschung und Entwicklung einer flexiblen integrierten Verschaltung von Dünnschichtsolarzellen. Bereits im ersten Projektjahr konnte eine völlig neuartige, flexible Modulverschaltung konzipiert werden. Die Machbarkeit und grundlegende Entwicklung eines dafür notwendige selektive Laserprozesses konnte ebenfalls erbracht werden wie die Entwicklung eines Hochpräzisions-Siebdruck zum Aufbringen von mikrometergroßen Isolations- und Leitpasten.

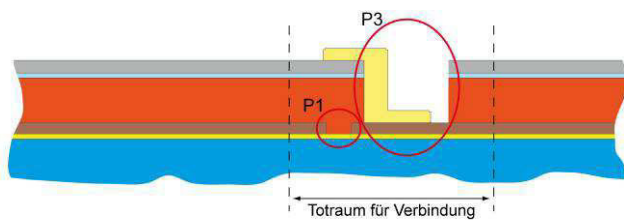


Abb 15: Geplante Kontaktierung laut Projektantrag. Die Strukturierungsschritte werden von drei (state-of-the-art) auf zwei reduziert.

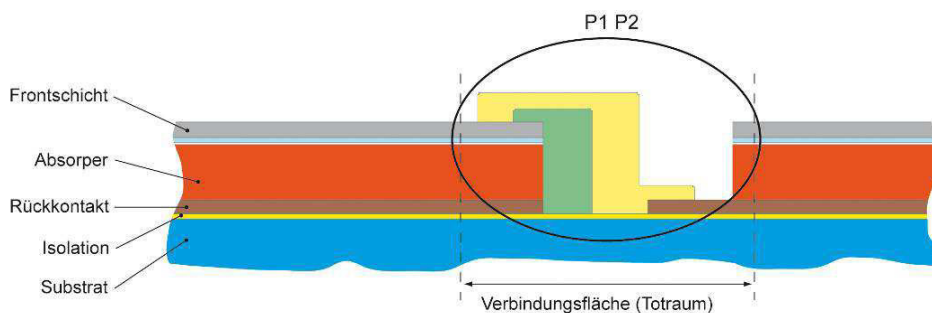


Abb 16: tatsächliches Design der SimpliCIS Verschaltung (MonoScribe), welches zum Patent angemeldet wurde.

Im zweiten Projektjahr wurde vor allem die Integration beider Prozessschritte in einer Maschine im Detail konzipiert und alle notwendigen Komponenten entwickelt und konstruiert.

Ebenso wurden in Druckworkshops die Prozessparameter optimiert. Da die Verkapselung ein wesentliches K.O.-Kriterium für die weitere Verwertung der Solarmodule ist, wurden Verkapselungstests durchgeführt.

Nachdem die Entwicklung und Erforschung der Machbarkeit der wesentlichen Prozessschritte abgeschlossen sowie die notwendigen Entwicklungsanlagen aufgebaut wurden, konnten durchgängig die ersten SimpliCIS-Solarzellen hergestellt werden.

Die Herstellung der Entwicklungsmuster erfolgte ausschließlich in der Pilotlinie von Sunplugged. Dabei wurden bis zu 300 mm breite, gereinigte Folien mit verschiedenen Materialien (Molybdän, Kupfer, Indium, Gallium) in einer PVD Anlage (Physical Vapour Deposition) beschichtet.

Diese beschichteten Rollen wurden in einem Ofen mit einem selenhaltigen Gasgemisch bei 500 bis 600 Grad Celsius dem Kristallisationsprozess unterzogen.

Diese Muster wurden anschließend wiederum in einer weiteren PVD-Anlage mit dem restlichen Schichtaufbau (Pufferschicht und transparente Fensterschicht) versehen.

Ein Teil der Testsamples wird mittels Kurzpulslaser bei der Hochschule München strukturiert, mit Frontkontakten bedruckt und verkapselt.

Für die folgende Charakterisierung und Modellierung wurden jeweils Muster aus den jeweiligen Produktionsschritten gezogen und an der Universität Innsbruck bzw. an der FH Vorarlberg untersucht. Bei der experimentellen Validierung der Lösungsvorschläge wurden die verwendeten Materialien und Prozessparameter selektiv weiterentwickelt.

Siebdruck

Für die nachträgliche Verschaltung/Kontaktierung der Solarzellen wurden mehrere Siebdrucklayouts für Modulgrößen von 800x300mm erstellt. Jeweils ein Sieb dient zum Druck der Isolationspaste, welche die freigelegten Grabenkanten gegen Kurzschlußverbindungen isoliert. Ein weiteres Sieb wird benötigt, um den Kontakt zwischen den Zellen herzustellen. Die Siebe wurden bei der Firma Koenen in Deutschland angefertigt, die Siebdruckpasten wurden uns von DuPont zur Verfügung gestellt.

Gedruckt wurde vorerst auf Dummy-Folien sowie auf Plots die mit der Laserstrukturierung bedruckt waren. Dabei zeigte sich vor allem, dass die Isolationspaste nach dem Trocknen von Kameras sehr schwer erfassbar ist und deshalb nicht als Einrichtmarker für die Leitpaste verwendet werden sollte.

Getrocknet wurden die Pasten in einem Vakuum laminator bei 150°C, wobei längerfristig ein Durchlaufofen benötigt wird.

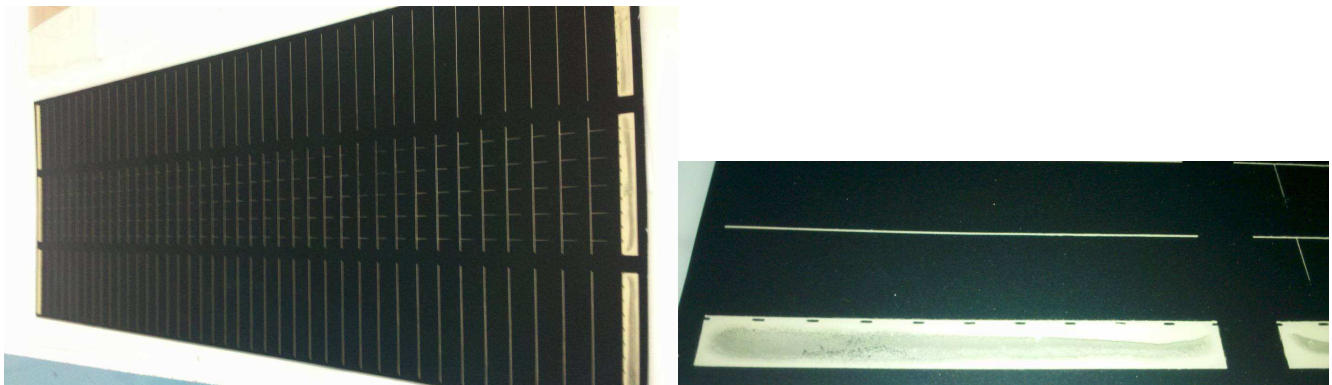


Abb 17: gedruckte Monoscribe Kontaktierung.

Integration

Da die weitere marktreife Entwicklung einer funktionierenden Dünnschichtsolarzelle/moduls sehr kostenintensiv ist, wurden im Projekt auch die Möglichkeiten der Verkapselung der SimpliCIS Solarzellen untersucht. Bei ersten Versuchen stellte sich heraus, dass die dünnen Edelstahlfolien (25µm bis 50µm) mit gängigen Prozessparametern kaum laminierbar sind, da die unterschiedlichen Ausdehnungen der flexiblen Kunststoffverkapselungen zu Rissen der Edelstahlsubstrate führte.

Wir konnten schließlich die Materialkombination der flexiblen Frontabdeckung, Einbettungsmaterial und Dünnschichtsolarzelle so abstimmen, dass eine dichte Verkapselung ohne Substratriss gelang.



Abb 18: Bruch des beschichteten Edelstahlsubstrats der Sunplugged Solarzelle bei Verkapselung



Abb 19: Bruchfreie Lamination der Dünnschichtsolarfolien



Abb 20: 300 mm breites Anschauungsmodul (vorgestellt auf der Intersolar 2011) der SimpliCIS Technologie. Das Anschauungsmodul enthält alle funktionalen Schichten (außer den CIGS Absorber) und die gedruckte Kontaktierung.

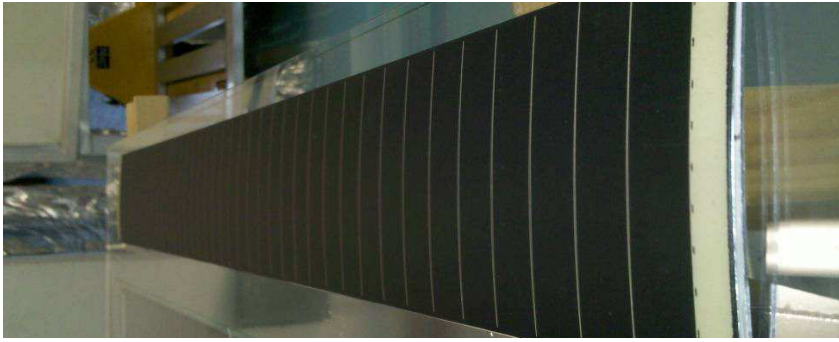


Abb 21: Finaler Prototyp der Dünnschichtsolarlamelle

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im SimpliCIS Projekt konnten alle geplanten Ziele erreicht werden. Eine neuartige Dünnschichtsolar-
modultechnologie, die gegenüber konventionellen Ansätzen zahlreiche Vorteile bietet, konnte
industriell erforscht werden. Die wissenschaftliche Basis für ein experimentelles Entwicklungsprojekt
bzw. für die geplante, zukünftige wirtschaftliche Verwertung konnten ebenfalls gelegt werden.
Die SimpliCIS-Solarzelle wurde speziell auf die speziellen Anforderungen von integrativen Lösungen
hin entwickelt und zeichnet sich unter durch folgende Eigenschaften aus:

Verwendung von Edelstahlträgern-Potenzial für hohe Wirkungsgrade und Rolle-zu-Rolle Fertigung

Als Substrate für flexible, biegbare CIGS-Solarmodule kommen generell alle Materialien in Frage die mit
Temperaturen von 400 Grad Celsius und mehr prozessiert werden können. Eine ideale
Höchsttemperatur zur Bildung der CIGS-Kristalle scheint im Bereich von 550 bis 580 Grad Celsius zu
liegen. Das mit Abstand am meisten verwendete Trägermaterial von CIGS Solarzellen sind allerdings
Polyimid-Folien. Die maximal verträglichen Temperaturen dieser Polyimid-Folien liegen bei ca 400-450
Grad Celsius, also wesentlich unter den Idealbedingungen zu Bildung von CIGS Kristallen.

Weiters schützt die Edelstahlfolie den aufgetragenen Dünnschicht-Stapel besser vor Umwelteinflüssen.
Die SimpliCIS-Solarzelle ist weltweit eines der ganz wenigen Dünnschichtsolarzellen, die auf Edelstahl
basiert.

Verwendung von Mischtargets zur Herstellung des CIG-Precursors und Kristallisation der CIGS- Schicht unter Stickstoffatmosphäre

Bei unserem mehrstufigen Verfahren, wird Kupfer, Indium und Gallium in Form eines Mischtargets auf
den Rückkontakt gesputtert und die Selenisierung erfolgt in einem separaten Prozess. Gemeinsam mit
der Fa. Ebner Industrieofenbau wird im Folgeprojekt SimpliCIS 2 in unserer Pilotlinie ein neuer,
vereinfachter Selenisierungsprozeß umgesetzt. Dabei wird das Selen mittels Stickstoff in einem Rolle-
Rolle-Durchlaufofen eingebracht.

Verwendung von nicht toxischen Pufferschichten

Die Pufferschicht ist eine sehr dünne, transparente Schicht (etwa 0,05 Mikrometer), welche die
Verbindung zwischen p-dotierter CIGS Schicht und transparentem Frontkontakt verbessert. Für diese
Pufferschicht wird heute großtechnisch Kadmiumsulfid (CdS) verwendet. Bei der SimpliCIS Solarzelle
kommt Zinkmagnesiumoxid zum Einsatz, dass im Gegensatz zu Kadmiumsulfid nicht giftig ist.

Die umweltfreundliche Alternative führt zu Einsparungen in der Produktion (geringere Sicherheitsvorkehrungen, Entsorgungskosten) und sorgt anwenderseitig für mehr Sicherheit (z.B. beim Brand einer Fassade oder eines Hauses).

Neuartige, flexible Modulkontaktierung

Herzstück der SimpliCIS-Solarmodule ist eine neuartige, flexible Zellverbindung, die eine Anpassung der notwendigen Stromspannung am Ende des Produktionsprozesses erlaubt. Diese Lösung „Monoscribe“ lässt die Produktionskosten sinken, da sie eine Reduzierung Produktionsschritte ermöglicht.

In der Verwertung zielt das Projekt auf von der PV-Industrie derzeit kaum beachtete Nischenbereiche, nämlich die dezentrale Stromerzeugung bei Geräten und Gebäuden. Sie unterstützt die Verwendung der Photovoltaik in zahlreichen neuen Anwendungsfeldern und erlaubt die Integration in Fertigungssysteme bei potenziellen Multiplikatoren (z.B. europäische KMU's die mit PV ihre Produkte verbessern wollen).

Sunplugged plant, in einem flexiblen Produktionsbetrieb, ab Mitte 2013 kundenorientiert Solarmodule basierend auf dem SimpliCIS Projekt zu fertigen. Der Produktionsbetrieb findet bewusst in Österreich statt, da wir in einem engen Kontakt mit unseren Kunden, die wir primär in Europa sehen, stehen wollen und müssen.

Wir liefern für den Kunden eine Problemlösung, die genau passt und daher ist ein enger Kontakt mit unseren Kunden wichtig und kann z.b. nicht durch asiatische Standardanbieter kompensiert werden.

4 Ausblick und Empfehlungen

Der Antragssteller arbeitet bereits an der weiteren Entwicklung der Dünnschichtsolarzelle im Rahmen des SimpliCIS 2 Projekts. Die experimentelle Entwicklung der Solarzelle selbst ist im vollen Gang und wird von externen Partnern unterstützt (Austrian Institute of Technology, Fa. Ebner, FH Dornbirn).

Die beiden Dünnschichtphysiker Mag.Dr.Daniel Huber und Dipl.Ing (FH) Andre Murawski wurden von der Universität Innsbruck übernommen.

Ziel ist es, bis Ende 2013 marktfähige Dünnschichtsolarmodule anbieten und in Österreich produzieren zu können.

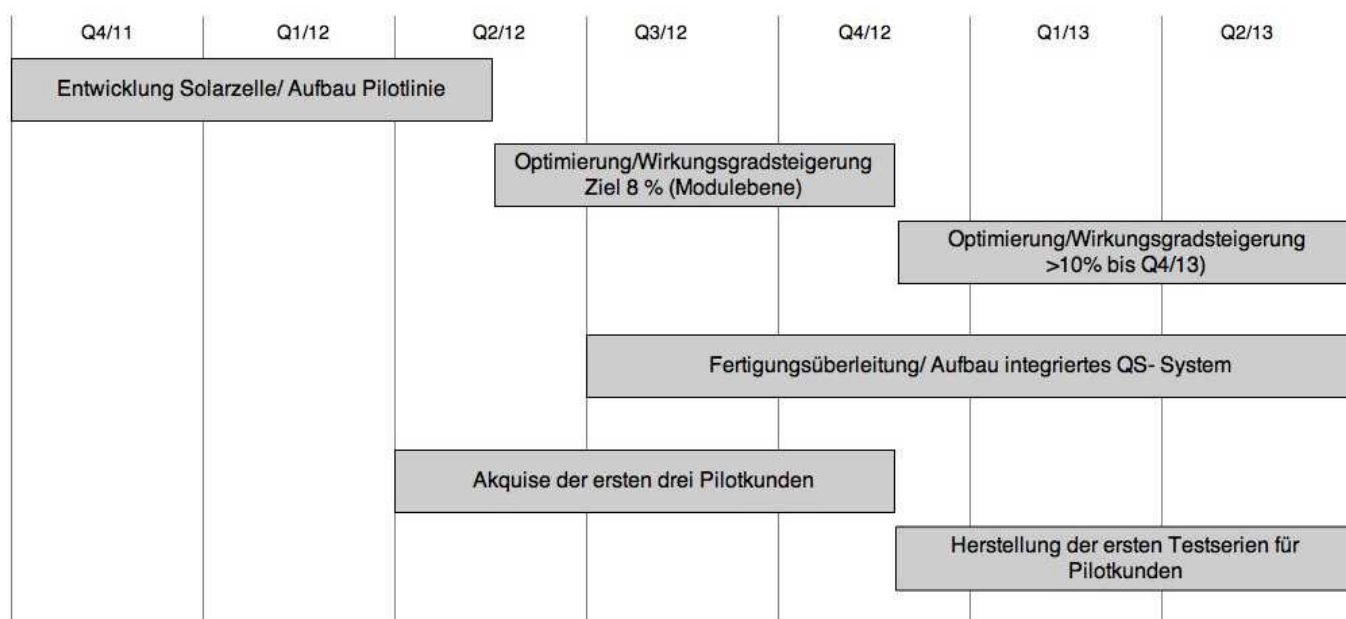


Abb 22: Ausblick auf die weitere Entwicklung der SimpliCIS- Solarzelle

Folgende F+E Schwerpunkte werden in den nächsten zwei Jahren gesetzt:

Entwicklung und Aufbau eines durchgängiger Rolle-zu-Rolle Fertigungsprozess im Reinraum bis Q2/2012

Optimierung des Schichtsystems und der flexiblen Modulverschaltung, mit dem Ziel Wirkungsgrade auf Modulebene auf ein Niveau von mindestens 10% zu heben;

Darüber hinaus hat Sunplugged folgende langfristige F+E Ziele:

1. Erhöhung der Wirkungsgrade und Reduktion der Herstellkosten
2. Innovative Anwendungen und Demonstrationsprojekte

Erhöhung der Wirkungsgrade und Reduktion der Herstellkosten

Die Optimierung der Sunplugged Solarzelle und -module ist ein langfristiges Entwicklungsziel. Konkrete F+E Vorhaben sind u.a. Optimierung der Stöchiometrien in Absorber- und Bufferschicht, Einsatz von

neuen Materialien (z.B. speziell dotierte Zwischenschichten als Na-Spender) und neuen Konzepten (z.B. Nutzung von plasmonischen Effekten, neuen Oberflächenstrukturen).

Da die Wirkungsgradsteigerungen auch beim Endkunden ankommen sollten, werden ebenfalls die Verbesserung der Roll-Roll Prozesse und neue inline Prüf- und Messsysteme von direkten/indirekten Größen angestrebt.

Innovative Anwendungen und Demonstrationsprojekte

Durch Variation von Form, Größe und elektrische Eigenschaften ist es mit der SimpliCIS Technologie möglich, die Solarmodul-Spezifikationen je nach Anwendungsbedarf anzupassen. Dadurch entsteht auch Bedarf an die Entwicklung eines theoretischen Modells, das die Einflüsse von Material- und Geometrie-Parametern auf die Output-Parameter von Solarzellen/Solarmodulen (z.B. Effizienz, Strom- und Spannungswerte) darstellt. Dieses Modell dient als Basis für die optimale Photovoltaikmodul-Auslegung abhängig vom Einsatzzweck. Zukünftige Forschungsschwerpunkte ergeben sich aus dem weiteren strategischen Marktausbau. So können beispielweise theoretisch die temperaturabhängigen Verluste der Sunplugged Solarzelle über die Gestaltung des Absorbers und der Pufferschicht stark reduziert werden. Durch die Nutzung dieses Effekts wären z.B. neue Anwendungsmöglichkeiten bei der Integration von Photovoltaikfolien in thermischen Solarkollektoren denkbar.

IMPRESSUM

Verfasser

Sunplugged GmbH

Andreas Zimmermann
Mindelheimer Straße 6, 6130 Schwaz
Tel: +43(0)5242 61099
Mail: andreas.zimmermann@sunplugged.at
Web: www.sunplugged.at

Projektpartner

PhysTech Coating Technology GmbH
Kohlplatz 7, 6600 Pflach

Leopold-Franzens Universität Innsbruck
Institut für Ionenphysik und Angewandte
Physik
Technikerstr. 25/3, 6020 Innsbruck

Autoren

Daniel Huber
Andre Murawski
Christian Perfler
Andreas Zimmermann

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
office@klimafonds.gv.at
www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige
Verantwortung für den Inhalt dieses
Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise
die Meinung des Klima- und Energiefonds
wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die
Weiternutzung der hier enthaltenen
Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH