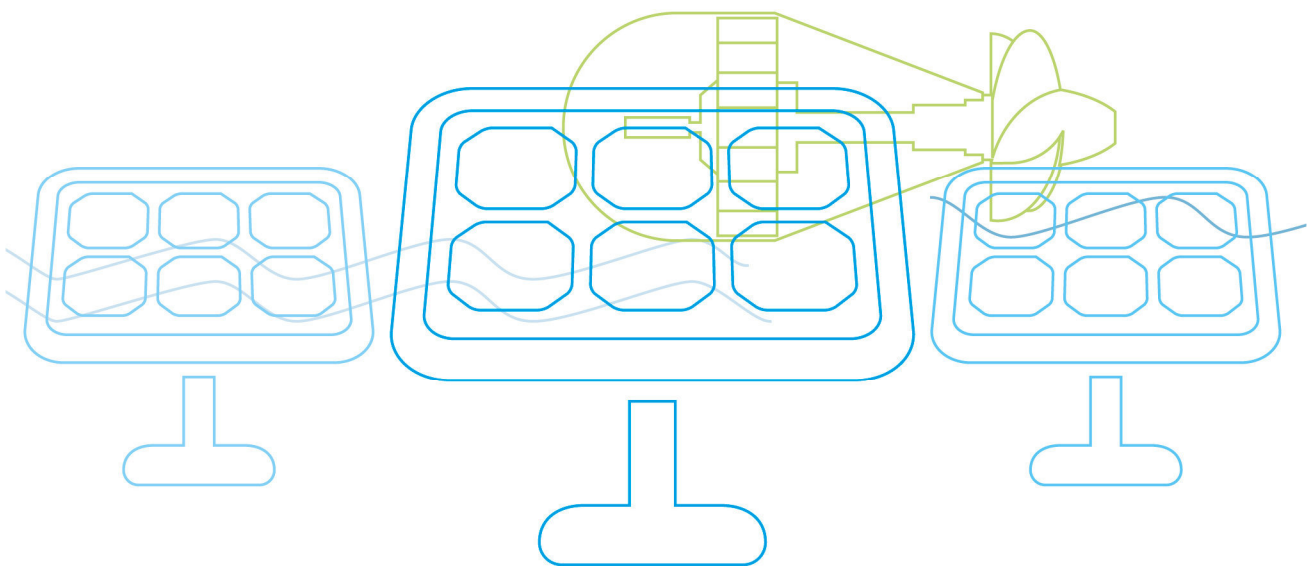




SimpliCIS

Hocheffiziente Dünnschichtsolarzellen für die Gebäude- und Geräteintegration



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, appearing to read 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ingmar Höbarth'.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	2
1 Kurzfassung	4
2 Summary	5
3 Einleitung	6
3.1 Zielsetzungen des Projekts	6
3.2 Aufbau und Methodik des Projektes	6
4 Inhaltliche Darstellung	8
4.1 Ausgangssituation/Motivation des Projektes	8
4.2 Entwicklung der SimpliCIS-Solarzelle	8
5 Ergebnisse und Schlussfolgerungen	27
6 Ausblick und Empfehlungen	29
7 Kontaktdaten	31
8 Referenzen	32

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schichtaufbau der SimpliCIS Solarzelle	9
Abb. 2: Beschichtungssequenzen zur Herstellung der Sunplugged Solarzelle.....	10
Abb. 3: Modifizierte Anlage zur Herstellung der Rückkontakt- und Precursor-Schicht für die Absorberherstellung	11
Abb. 4: Anlage zur Herstellung der Frontschichten.....	11
Abb. 5: Targets der PVD Anlage zum Sputtern von Rückkontakt und CIG Precursor (rechts: Mo, Mitte: CIG)	12
Abb. 6: Anordnung der Metallsubstrate bei der Bestimmung der Schichtdickenverteilung	13
Abb. 7: Abhängigkeit der Schichtdicke über die Targetbreite bezogen auf die Mitte des Targets (100%)	13
Abb. 8: Schemata der verschiedenen Prozesse der Selenisierung für Ausgangsmaterialien. [].....	14
Abb. 9: Schematischer Ablauf des Stacked-Elemental-Layer Prozesses zur Herstellung einer CIS/CIGS- Dünnschichtsolarzelle [].....	15
Abb. 10: Inkorporiertes Selen in das metallische Precursor- Schichtensystem in Abhängigkeit von Substrattemperatur und Selenisierungsmethode nach J. Bekker et al. [^{xiv}].	15
Abb. 11: Schema der CIGS Absorber Synthese über Vakuumverdampfung.....	16
Abb. 12: Beispiel des zeitlichen Ablaufs des Selenbeschichtungsprozess und die somit erzielten Schichtdicken des Selenfilms auf dem Substrat.	17
Abb. 13: Links: REM Aufnahme einer Selenisierten CIG Schicht und rechts: REM Aufnahme eines unerwünschten Kupferselenid-Kristalls	18
Abb. 14: Optische Erscheinung der Delaminationen der Selenisierten CIG-Precursorschichten (Profil II: 20min/250°C+20min/350 p(N ₂)=100mbar) bei unterschiedlichen CIG- Sputterprozessen.....	18
Abb. 15: XRD Spektren einer ungetemperten CIG Schicht (CIG-raw) sowie bei gleichen Temperaturprofilen (350°C, 10min), aber unterschiedlichen Prozessdrücken (50mbar und 200mbar) getemperten Proben.....	19
Abb. 16: Schema Selenisierung Variante B	20
Abb. 17: Links: REM Aufnahme einer Selenisierten CIG Schicht nach Variante B.....	20
Abb. 18: Target im Roll-to-Roll-Coater: (a) ZnMg-Target (85at% Zn, 15at% Mg); (b) ITO-Target (90wt% In ₂ O ₃ , 10wt% SnO ₂).....	21
Abb. 19: Transmissionsspektren zweier ZnMgO-Schichten mit verschiedenen Schichtdicken; Einstellungen: Leistung 900 W, Gesamtdruck 3,5*10 ⁻³ mbar (80% Ar, 20% O ₂), Zuggeschwindigkeit der Folie variabel	22
Abb. 20: Konventionelle, monolithische Kontaktierung von Dünnschichtsolarzellen zu Modulen. Es sind drei Strukturierungsschritte (P1,P2,P3) notwendig, um die serielle Verschaltung zu erreichen.....	23
Abb. 21: Geplante Kontaktierung laut Projektantrag. Die Strukturierungsschritte werden von drei (state- of-the-art) auf zwei reduziert.....	23

Abb. 22: Tatsächliches Design der SimpliCIS Verschaltung (MonoScribe), welches zum Patent angemeldet wurde.....	24
Abb. 23: Gedruckte Monoscribe Kontaktierung.....	25
Abb. 24: Bruch des beschichteten Edelstahlsubstrats der Sunplugged Solarzelle bei Verkapselung.....	26
Abb. 25: Bruchfreie Lamination der Dünnschichtsolarfolien.....	26
Abb. 26: 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.....	26
Abb. 27: Finaler Prototyp der Dünnschichtsolarlamelle.....	26
Abb. 28: Ausblick auf die weitere Entwicklung der SimpliCIS- Solarzelle.....	29

1 Kurzfassung

Photovoltaik kann direkt in Verbrauchern, wie Geräten, Fahrzeugen und Gebäudehüllen integriert werden. Im SimpliCIS Projekt wurde eine neue Solarzellentechnologie erforscht und entwickelt, welche die spezifischen Anforderungen von integrativen solaren Lösungen erfüllt. Es wurde von Grund auf eine neue flexible Dünnschichtsolarzelle entwickelt. Diese Solarzelle zeichnet sich u.a. durch ein hohes Wirkungsgradpotenzial, Flexibilität, geringes Gewicht und die Verwendung von nicht-toxischen Materialien aus. Weiters kann diese Solarzelle in kostengünstigen Rolle-zu-Rolle Prozessen hergestellt werden. Diese endlos herstellbare Solarzelle kann einem neu entwickelten Produktionsverfahren kundenspezifisch zugeschnitten und flexibel, monolithisch verschaltet werden. Die Machbarkeit eines dazu notwendigen selektiven Laserablationsprozesses wurde im Projekt ebenso erforscht als auch die industrielle Entwicklung eines flexiblen, hochpräzisen Druckverfahrens zur Herstellung der integrierten seriellen Verschaltung.

2 Summary

Photovoltaics can be directly integrated into the respective appliance, i.e. vehicles, machines or buildings. In SimpliCIS project a new solar cell technology was developed, which fulfills the specific requirements for integrative photovoltaic solutions. The newly designed flexible thin film solar cells are characterised by high efficiency potential, flexibility, low weight and the usage of non-toxic materials. Furthermore, the solar cell can be produced in low-cost roll-to-roll processes. In this manner an endless solar cell is obtained, which is subsequently cut and monolithically interconnected according to the customer's requirements. The feasibility of a selective laser ablation process as well as the industrial development of a flexible, highly precise printing technique – both needed for this special interconnection – were also investigated within the framework of this project.

3 Einleitung

3.1 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.

3.2 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 dienen 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.

4 Inhaltliche Darstellung

4.1 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.

4.2 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. [i, ii] Die Entwicklung und Hochskalierung von CIGS-Solarmodulen auf flexiblen Substraten ist jedoch eine technisch sehr anspruchsvolle Aufgabe, da zahlreiche prozess- und materialspezifische Faktoren interagieren [iii, iv].

Substrat

Die Wahl des Substrates einen entscheidenden Einfluss auf Wirkungsgradpotenzial, Prozessierbarkeit und Anwendbarkeit hat [v, vi, vii]. 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. [viii, ix]

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 der 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.

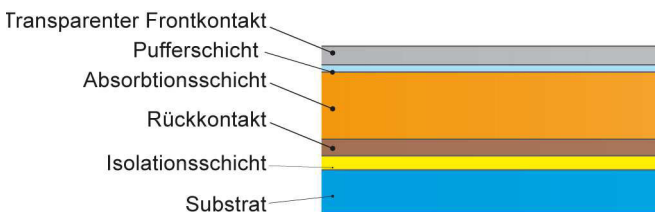


Abb. 1: Schichtaufbau der SimpliCIS Solarzelle

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.

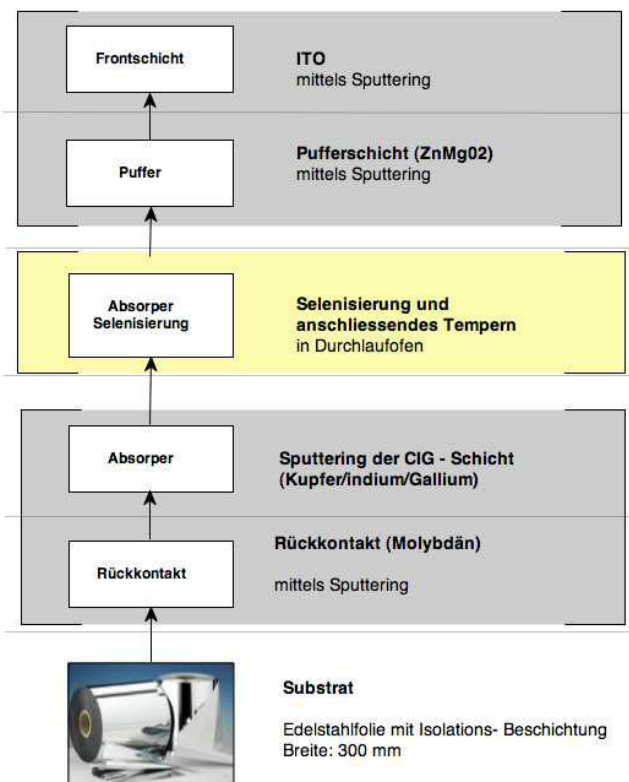


Abb. 2: Beschichtungssequenzen zur Herstellung der Sunplugged Solarzelle

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 [7].



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 niedrige-schmelzender Indiumphasen im CIG-Target muss die Leistungsdichte auf 2 W/cm² begrenzt bleiben (Angabe des Herstellers). Dies entspricht einer Maximalleistung von ca. 850 W bzw. einem Strom von ~1,5 A (je nach Einstellung). Bis zu diesem Strom traten im Prozess keinerlei Schwierigkeiten auf. Hinsichtlich Druck konnte ein Fenster von $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ mbar bis $3,5 \cdot 10^{-3}$ 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 5x5 cm² 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.

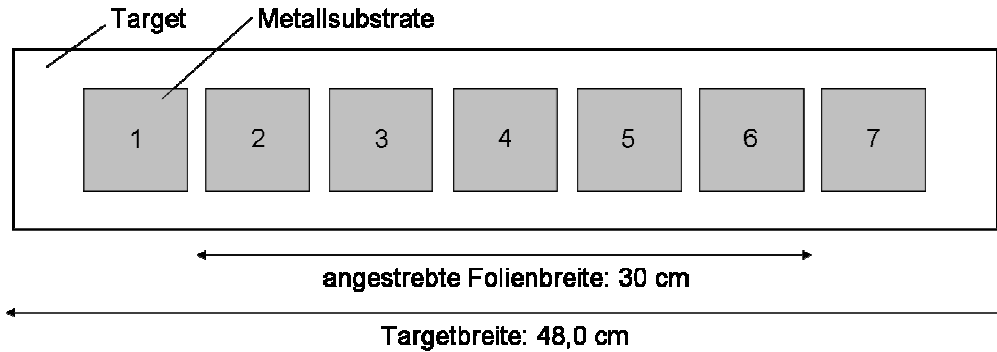


Abb. 6: Anordnung der Metallsubstrate bei der Bestimmung der Schichtdickenverteilung

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.

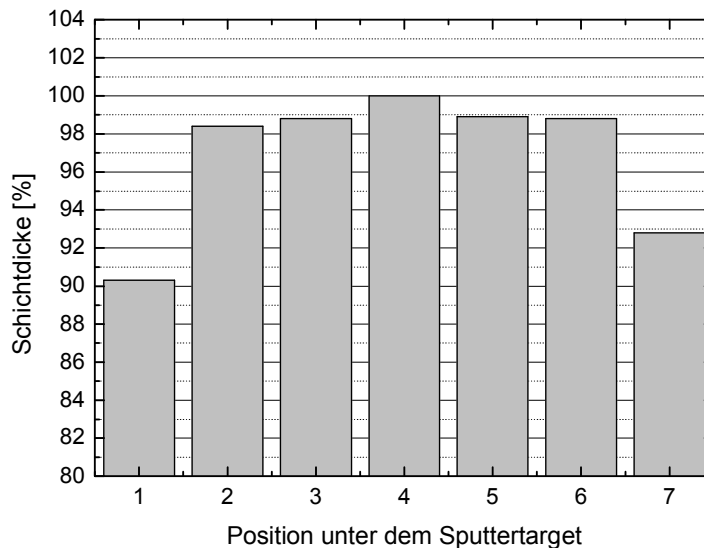


Abb. 7: Abhängigkeit der Schichtdicke über die Targetbreite bezogen auf die Mitte des Targets (100%)

(2) Selenisierung

Wie in Abb. 8 ersichtlich, lässt sich der Herstellungsprozess der photoaktiven Schicht prinzipiell in zwei Teilbereiche trennen, die Schichtabscheidung der Grundmaterialien (Precursor) und eine anschließende Absorbersynthese. So können die metallischen Bestandteile des Absorbers über Sputtertechniken als auch Verdampfungsverfahren auf die Substrate aufgebracht werden. Da es sich bei diesen Methoden um Vakuumverfahren handelt, können somit hohe Reinheiten der Schicht gewährleistet werden, welches zum einen als Voraussetzung für die Erzielung hoher Wirkungsgrade gilt.

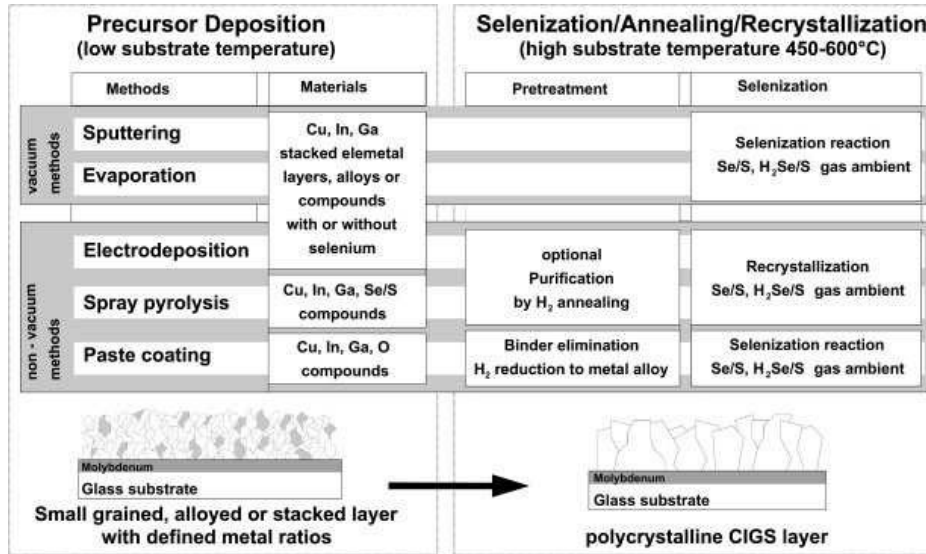


Abb. 8: Schemata der verschiedenen Prozesse der Selenisierung für Ausgangsmaterialien. [xi].

Da es sich im laufenden Projekt um die Selenisierung von metallischen Precursor- Schichtensysteme handelt, wird ein kurzer Überblick über die derzeit bestehenden Verfahren gegeben. So werden zum einen die metallischen Precursor- Schichtensysteme in einer H₂Se Atmosphäre (H₂Se/Ar/O₂) bei Temperaturen zwischen 400°C - 600°C selenisiert [xii, xiii, xiv, xv]. Dabei handelt es sich bei H₂Se jedoch um eine hochtoxische, reaktionsfreudige, gasförmige Verbindung, die entsprechende arbeitsschutzrelevante Bedingungen voraussetzt.

Ebenso ist die prozentuale Ausnutzung; d.h. des angebotenen zum letztendlich inkorporierten Selen relativ gering. So werden zum einen entsprechende Gasumleitungssysteme zur Erhöhung der Ausnutzung eingesetzt [xvi] bzw. gänzlich nach Alternativen wie z.B. das Diethylselenide- (C₂H₅)₂Se [xvii, xviii] für das toxische H₂Se gesucht.

Als weitere Möglichkeit der CIGS Erzeugung wird elementares Selen unter Normaldruckbedingung oder Vakuumbedingung [xix] verdampft und anschließend abgeschieden. Danach folgt der Tempervorgang zur Selenisierung bzw. Bildung der Chalkopyritstruktur. Eine schematische Darstellung einer Vakuumverdampfung von Selen und der sich anschließenden Synthesereaktion ist in Abb. 9 dargestellt.

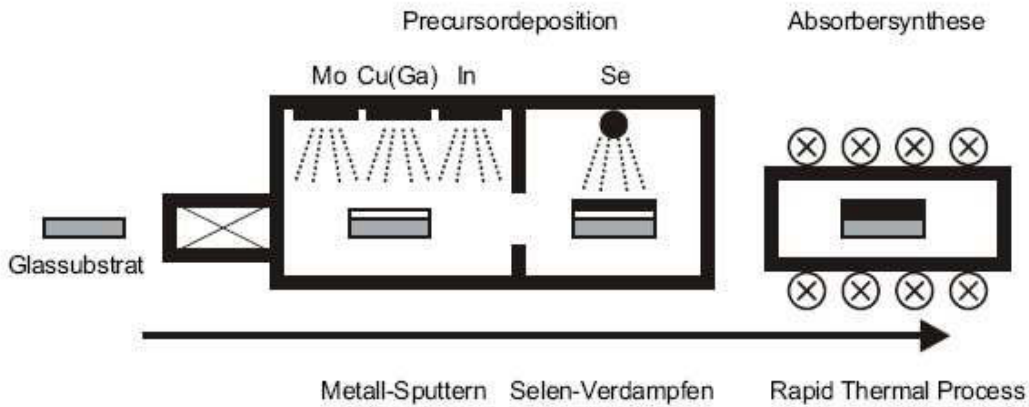


Abb. 9: Schematischer Ablauf des Stacked-Elemental-Layer Prozesses zur Herstellung einer CIS/CIGS-Dünnschichtsolarzelle [xx].

So bietet der Einsatz von Linear- Verdampferquellen zum einen den Vorteil, dass großflächige, homogene Selschichten auf die metallischen Precursor- Schichtensysteme aufgebracht werden können.

Des Weiteren können Selenverdampfung und Absorbersynthese auch räumlich integriert werden, wobei die Substrate über entsprechende Temperaturprofile geheizt werden und zeitgleich weiter Selen verdampft wird [xxi, xxii, xxiii]. Ein Vergleich des in die metallischen Precursor- Schichtensysteme inkorporierten Selen in Abhängigkeit der verwendeten Selenisierungsmethode wurde von J. Bekker et al. [xxiv] gegeben. In dieser Arbeit wurde die Selenkonzentration mittels Röntgen- Fluoreszenz (XRF) bei verschiedenen Substrat/Synthese -temperaturen bestimmt und ist in der folgenden Abb. 10 grafisch dargestellt.

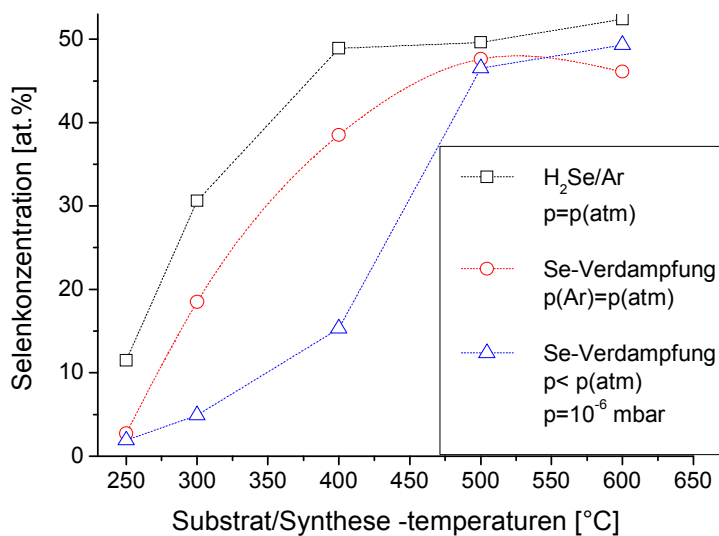


Abb. 10: Inkorporiertes Selen in das metallische Precursor- Schichtensystem in Abhängigkeit von Substrattemperatur und Selenisierungsmethode nach J. Bekker et al. [xxiv].

Während im Fall der H_2Se/Ar - Methode bereits bei $400^\circ C$ eine vollständige Selenisierung des Schichtsystems und die Ausbildung von $1 \mu m$ großen Kornstrukturen [xxiv] beobachtet wurde, konnte dies im Fall der Verdampfungsmethode bei ca. 500 bis $600^\circ C$ nachgewiesen werden, wobei kleinere Kornstrukturen im Absorber sich ausbildeten. Andererseits wurde im Fall der H_2Se/Ar - Methode bei Temperaturen über $500^\circ C$ ein Se- Anteil von größer 50% bestimmt, der zum einen auf die Bildung von $MoSe_2$ an der Kontaktelektrode rückgeführt werden kann. So wurde des Weiteren gezeigt, dass im Fall von $500^\circ C$ in allen Methoden eine homogene Selenkonzentration in der gesamten Absorberschicht anzutreffen ist [xxiv].

Ebenso kommt vermehrt neben der klassischen Vakuumverdampfung als auch H_2Se/Ar - Methode noch zusätzlich eine Plasma- Anregung (engl. plasma-assisted coevaporation) zum Einsatz [xxv, xxvi], um angeregte Zustände des Selens zu erzeugen, mit dem Vorteil, chalkopyritische Absorber auf Substraten bei niedrigen Temperaturen ($250^\circ C$ bis $350^\circ C$) herzustellen [xxvii].

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.

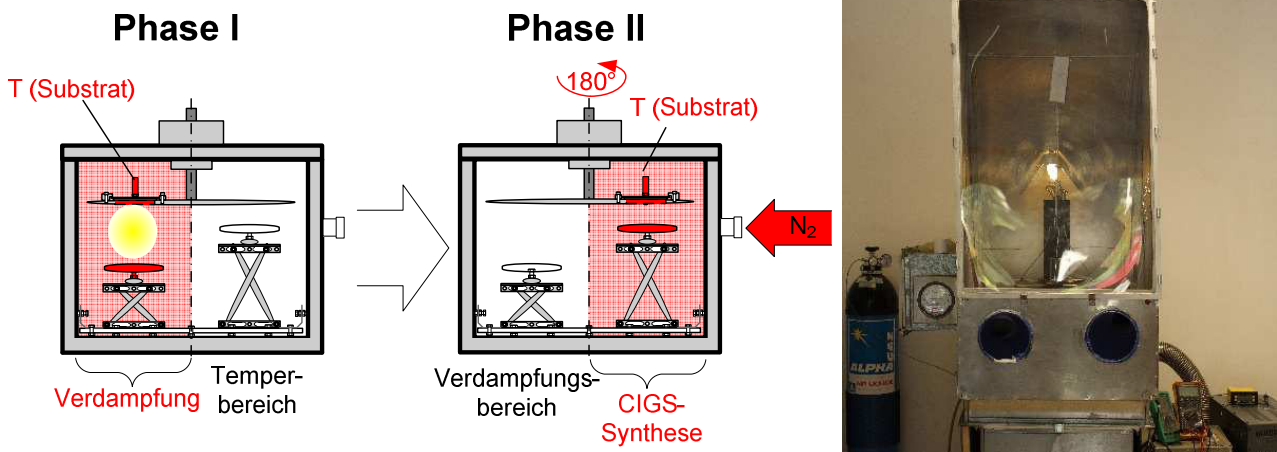


Abb. 11: Schema der CIGS Absorber Synthese über Vakuumverdampfung

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

Der Verdampfungsprozess fand dabei immer unter den in Abb. 12 ersichtlichen Bedingungen statt. Während der Vorheizphase ($P = 200 W$) befand sich das zu beschichtende Substrat über dem für die Synthese konzipierten Heizelement II (siehe Abb. 11 Position des Substrates Phase II). Anschließend wurde die Leistung der Verdampfungsquelle reduziert und das Substrat über die Quelle positioniert,

womit die Selenbeschichtung prinzipiell initiiert wurde. Dabei wurden die Schichtdicken für unterschiedlich lange Beschichtungszeiten (bei konstanten Beschichtungsparametern) mittels Wiegetechnik bestimmt und sind ebenfalls in Abb. 12 dargestellt.

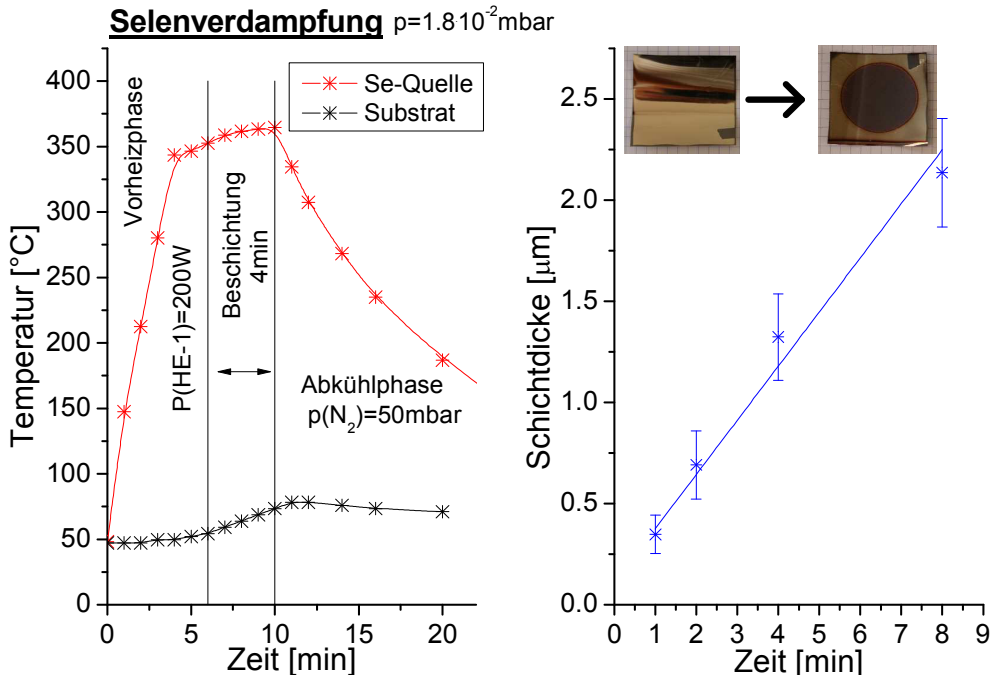


Abb. 12: Beispiel des zeitlichen Ablaufs des Selenbeschichtungsprozess und die somit erzielten Schichtdicken des Selenfilms auf dem Substrat.

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.

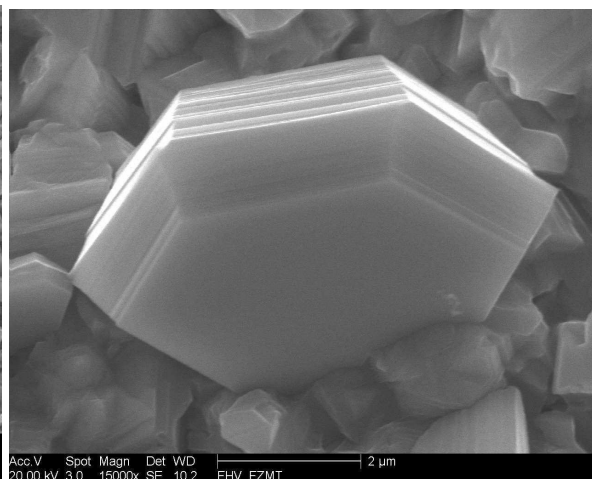
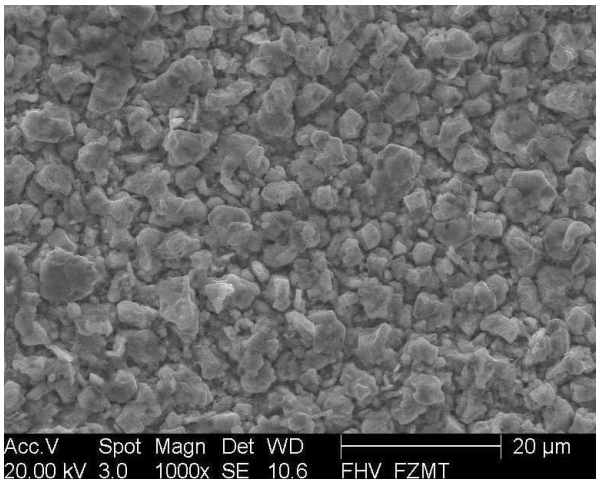


Abb. 13: Links: REM Aufnahme einer Selenisierten CIG Schicht und rechts: REM Aufnahme eines unerwünschten Kupferselenid-Kristalls

Zur Bestimmung der elektrischen Eigenschaft dieser Schicht kam eine 4-Spitzenmessung bzw. 4-Punktmethode zum Einsatz. Dabei zeigte sich jedoch der noch stark metallische Charakter der Schichten in Form von zu niedrigen Schichtwiderständen (Ohm-Bereich) die unterhalb der Messgrenze des 4-Punkt Versuchsaufbau lagen.

Neben den starken Delaminationserscheinungen bei der Verwendung von Kapton®-Folie trat dieser Effekt auch auf Glassubstraten auf, wie in Abb. 14 zu erkennen ist.



Abb. 14: Optische Erscheinung der Delaminationen der Selenisierten CIG-Precursorschichten (Profil II: 20min/250°C+20min/350 p(N₂)=100mbar) bei unterschiedlichen CIG- Sputterprozessen.

XRD Messung zum Einfluss des Prozessdrucks/Stickstoffdrucks auf die Kristallisationsstruktur in den selenbeschichteten CIG-Schichten deuten wesentliche Unterschiede an. So werden in Abb. 15 die XRD-Spektren einer ungetemperten CIG Schicht (CIG-raw) sowie bei gleichen Temperaturprofilen (350°C, 10min), aber unterschiedlichen Prozessdrücken (50mbar und 200mbar) getemperten Proben dargestellt.

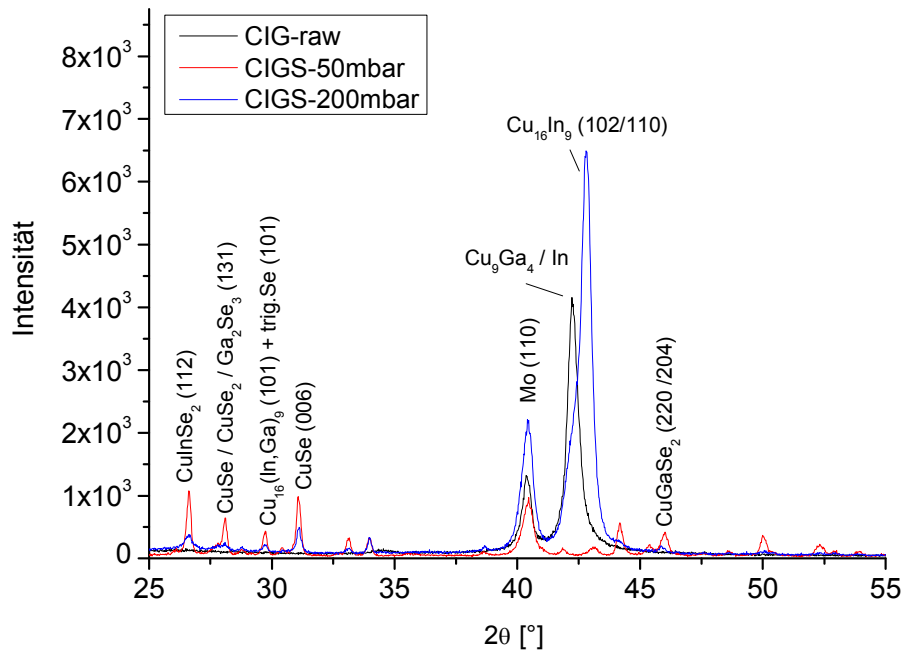


Abb. 15: XRD Spektren einer ungetemperten CIG Schicht (CIG-raw) sowie bei gleichen Temperaturprofilen (350°C, 10min), aber unterschiedlichen Prozessdrücken (50mbar und 200mbar) getemperten Proben.

So sind im unteren Druckbereich 50mbar deutlich die Reflexe der verschiedenen Metallselenide zu erkennen während bei höherem N_2 -Partialdruck deutlich mehr metallische Mischkristalle Cu_9Ga_4 bzw. $Cu_{16}In_9$ fest zu stellen sind. Dies würde den optischen Beobachtungen in den Bereichen an den Ecken der Samples, die nicht direkt mit Selen beschichten waren, ebenso sich grau Verfärbten untermalen.

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

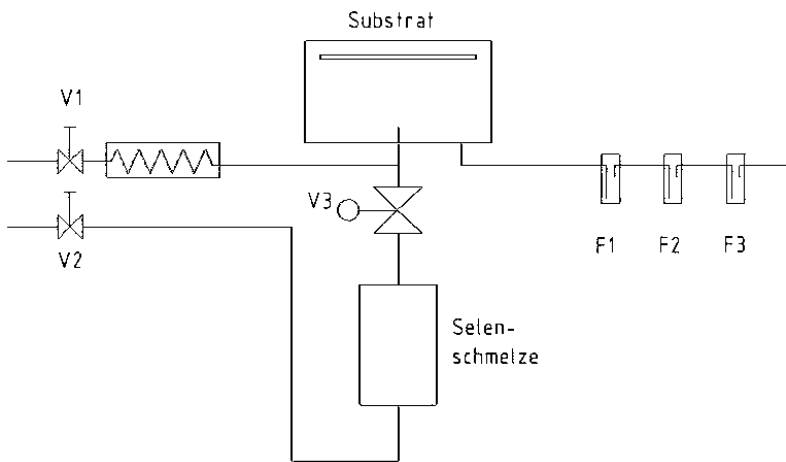


Abb. 16: Schema Selenisierung Variante B

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.

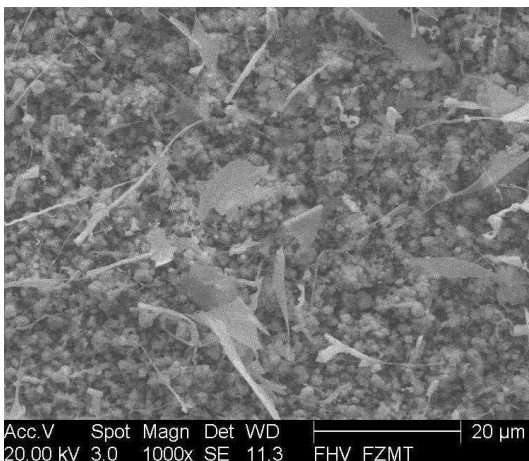


Abb. 17: Links: REM Aufnahme einer Selenisierten CIG Schicht nach Variante B

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.

Als Pufferschicht kommen zahlreiche Materialien in Frage, wobei heute meistens Cadmium-Sulfid eingesetzt wird, das aufgrund seiner Eigenschaften derzeit den höchsten Zellwirkungsgrad ermöglicht. Alternative Materialien, die ohne Cadmium arbeiten zeigen jedoch Potential für ähnlich gute Performance [xxviii]. Zink-Magnesium-Oxid ist eine dieser Puffer-Varianten, die zwar kommerziell noch nicht eingesetzt wird, aber aufgrund der vorhandenen Forschungsdaten eine vielversprechende und ungiftige Alternative für Cadmium-Sulfid darstellt [xxix, xxx]. Zusätzlich kann dieses Material mittels Sputterverfahren hergestellt werden und ist damit besser in die Prozesskette integrierbar. [

Die ZnMgO-Pufferschicht wird in einem reaktiven Sputterprozess – ausgehend von metallischem ZnMg – abgeschieden. Abb. 18a zeigt das Target nach einigen Testläufen. In Abb. 18a rechts ist die bereits beschichtete Stahlfolie zu erkennen, die über eine kühlbare Walze geführt wird.



Abb. 18: Target im Roll-to-Roll-Coater: (a) ZnMg-Target (85at% Zn, 15at% Mg);
(b) ITO-Target (90wt% In₂O₃, 10wt% SnO₂)

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/O₂-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 O₂-Bedarf. Für eine

Leistung von 900 W wurden 20% Sauerstoff als Grenzwert ermittelt (Abb. 19), bevor erhebliche optische Absorption eintritt.

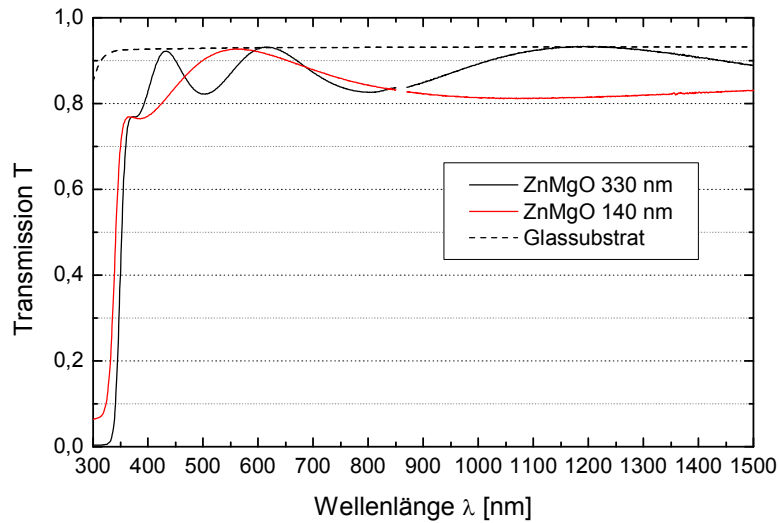


Abb. 19: Transmissionsspektren zweier ZnMgO-Schichten mit verschiedenen Schichtdicken; Einstellungen: Leistung 900 W, Gesamtdruck $3,5 \cdot 10^{-3}$ mbar (80% Ar, 20% O₂), Zuggeschwindigkeit der Folie variabel

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% In₂O₃ und 10wt% SnO₂ eingesetzt (siehe Abb. 18b).

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 abzuschneiden. Etwa 6% O₂-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.

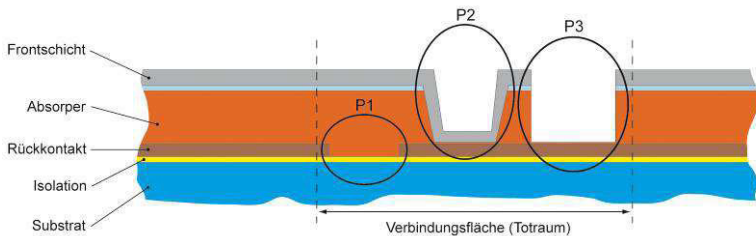


Abb. 20: Konventionelle, monolithische Kontaktierung von Dünnschichtsolarzellen zu Modulen. Es sind drei Strukturierungsschritte (P1,P2,P3) notwendig, um die serielle Verschaltung zu erreichen.

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 Dünnschicht-Solarzellen. 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.

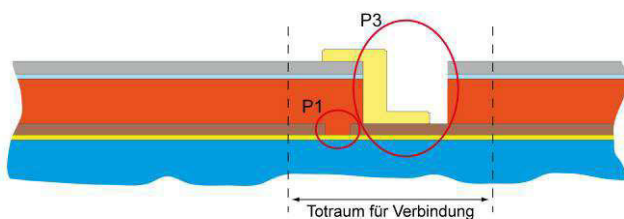


Abb. 21: Geplante Kontaktierung laut Projektantrag. Die Strukturierungsschritte werden von drei (state-of-the-art) auf zwei reduziert.

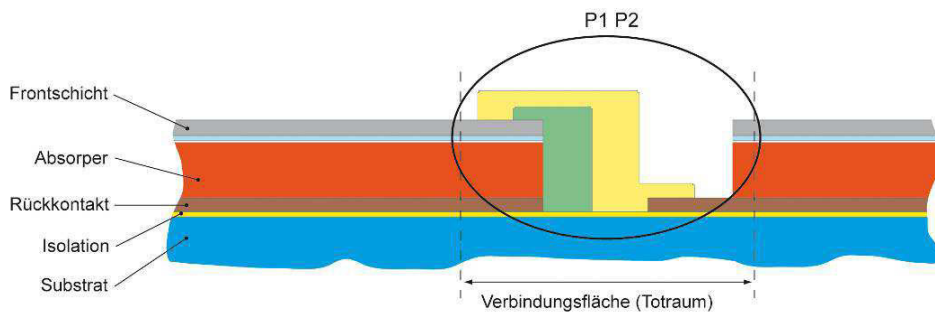


Abb. 22: Tatsächliches Design der SimpliCIS Verschaltung (MonoScribe), welches zum Patent angemeldet wurde.

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 Kurzpuls laser 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

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 Vakuumlaminiator bei 150°C, wobei längerfristig ein Durchlaufofen benötigt wird.

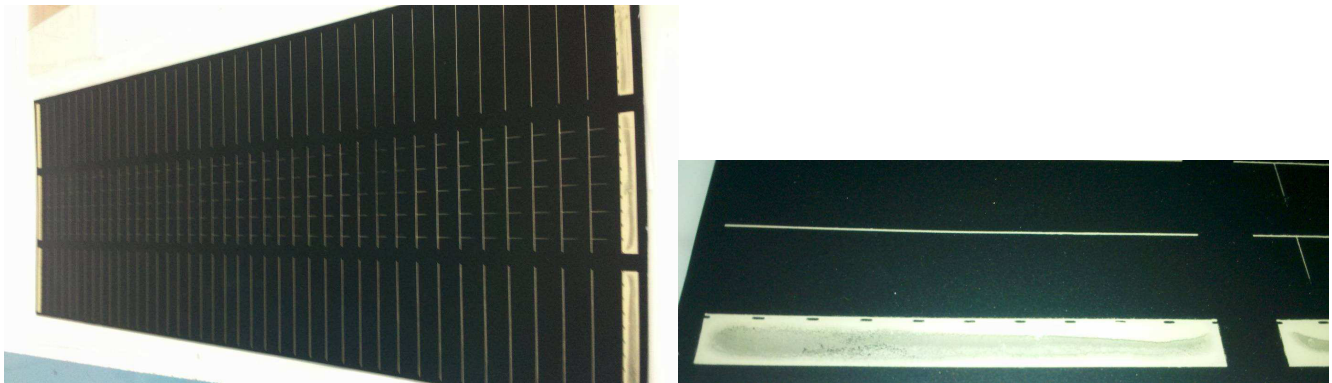


Abb. 23: Gedruckte Monoscribe Kontaktierung.

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. 24: Bruch des beschichteten Edelstahlsubstrats der Sunplugged Solarzelle bei Verkapselung



Abb. 25: Bruchfreie Lamination der Dünnschichtsolarfolien



Abb. 26: 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.

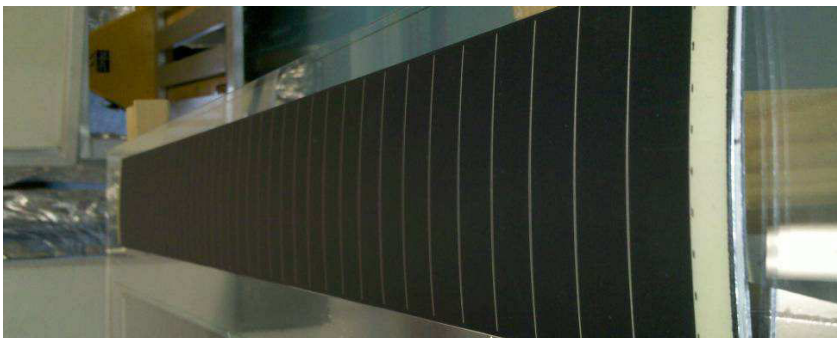


Abb. 27: Finaler Prototyp der Dünnschichtsolarlamelle

5 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-Durchlauf-ofen 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.

6 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.

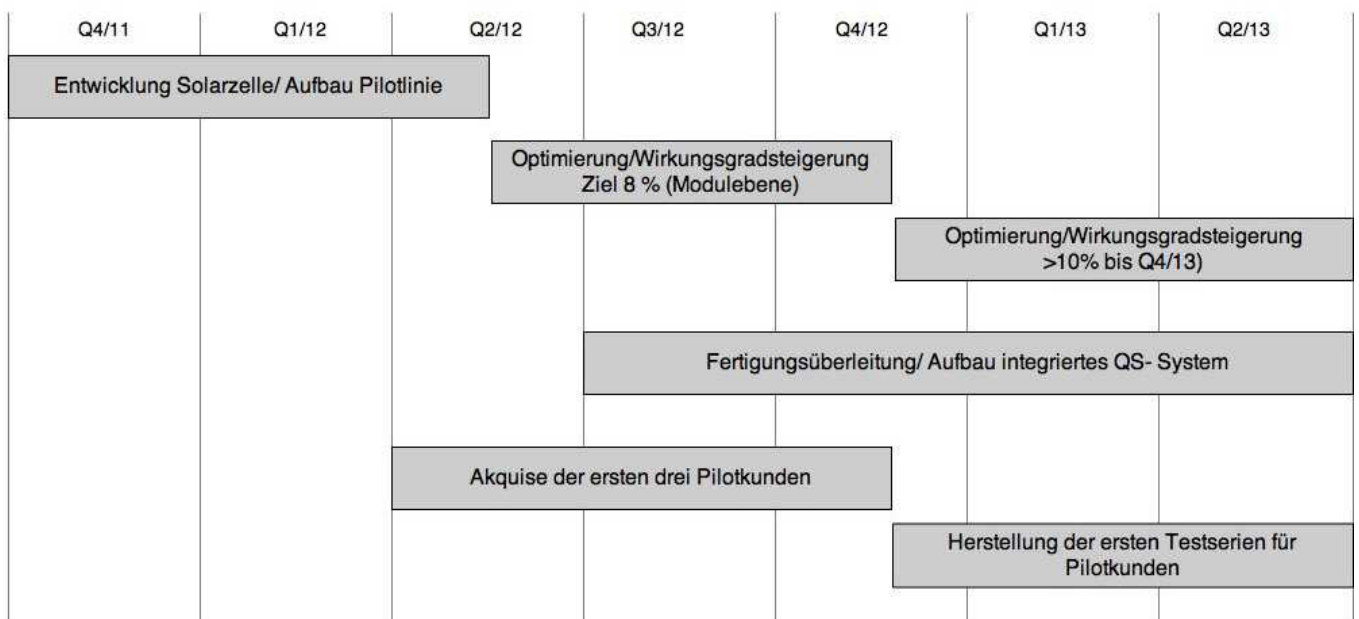


Abb. 28: Ausblick auf die weitere Entwicklung der SimpliCIS- Solarzelle

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; Das

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 Solar modul-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.

7 Kontaktdaten

Projektleiter: Mag. Andreas Zimmermann

Institut/Unternehmen: Sunplugged GmbH

Kontaktadresse: Mindelheimer Straße 6, 6130 Schwaz

Tel: +43(0)5242 61099

Fax: +43(0)5242 61099

E-Mail: andreas.zimmermann@sunplugged.info

Internet: www.sunplugged.at

Auflistung der weiteren Projekt-bzw. KooperationspartnerInnen Name / Institut oder Unternehmen

PhysTech Coating Technology GmbH

Kohlplatz 7

A-6600 Pflach

Kontakt: Dr. Georg Strauss

Leopold-Franzens Universität Innsbruck

Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik

Technikerstr. 25/3

A-6020 Innsbruck

Kontakt: A. Univ. Prof. Hans Pulker

8 Referenzen

- [i] L. El Chaar et al.: *Review of photovoltaic technologies*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 2165–2175
- [ii] Neelkanth G. Dhere: *Toward GW/year of CIGS production within the next decade*, Solar Energy Materials & Solar Cells 91 (2007) 1376–1382
- [iii] D. Schmid et al.: *A comprehensive characterization of the interfaces in Mo/CIS/CdS/ZnO solar cell structures*, Solar Energy Materials and Solar Cells 41/42 (1996) 281-294
- [iv] D. Abou-Ras et al.: *Structural and chemical investigations of CBD- and PVD-CdS buffer layers and interfaces in Cu(In,Ga)Se₂-based thin film solar cells*, Thin Solid Films 480–481 (2005) 118– 123
- [v] F. Kessler et al.: *Approaches to flexible CIGS thin-film solar cells*, Thin Solid Films 480–481 (2005) 491–498
- [vi] F. Kessler et al.: *Technological aspects of flexible CIGS solar cells and modules*, Solar Energy 77 (2004) 685–695
- [vii] S. Khelifi et al.: *Characterization of flexible thin film CIGSe solar cells grown on different metallic foil substrates*, Energy Procedia 2 (2010) 109–117
- [viii] R. Wuerz et al.: *CIGS thin-film solar cells on steel substrates*, Thin Solid Films 517 (2009) 2415–2418
- [ix] K. Moriwaki et al.: *New-structured metal foil substrates with insulating layer for monolithically integrated flexible CIGS sub-modules*, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 6-10 September 2010, Valencia, Spain
- [x] N. Reinfried et al.: *Stable and reproducible Na doping for CIS/CIGS solar cells using MoNa sputtering targets*, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 6-10 September 2010, Valencia, Spain
- [xi] A. Romeo et al.: *Development of Thin-film Cu(In,Ga)Se₂ and CdTe Solar Cells*, Prog. Photovolt: Res. Appl. (2004); 12:93–111
- [xii] Marudachalam et al.: *Preparation of homogeneous Cu(InGa)Se₂ films by selenization of metal precursors in H₂Se atmosphere*; Appl. Phys. Lett. 67 (26), (1995)
- [xiii] J.Bekker et al.: *Properties of CuIn(Se,S)₂ thin films prepared by two-step growth processes*; Thin Solid Films 431-432 (2003) 116-121

- [xiv] C.J. Sheppard et al.: *Deposition of $\text{CuIn}(\text{Se},\text{S})_2$ thin films by sulfurization of selenized Cu/In alloys*; phys. stat. sol. (a) 201, No.10 2234-2238 (2004)
- [xv] C J Sheppard and V Alberts: *Deposition of single-phase $\text{CuIn}(\text{Se},\text{S})_2$ thin films from the sulfurization of selenized CuIn alloys*; J. Phys. D: Appl. Phys. 39 (2006) 3760–3763
- [xvi] NREL- V.K. Kapur et al. : *Phase I/ Annual Technical Report - August 2002–July 2003*; NREL/SR-520-35574
- [xvii] A. Umezawa et al.: *Preparation of $\text{Cu}(\text{In},\text{Al})\text{Se}_2$ thin films by selenization using diethylselenide*; P hys. Status Solidi C 6, No. 5, 1016–1018 (2009)
- [xviii] M. Sugiyama et al.: *Growth of single-phase $\text{Cu}(\text{In},\text{Al})\text{Se}_2$ photoabsorbing films by selenization using diethylselenide*; Thin Solid Films 517 (2009) 2175–2177
- [xix] R.Jeyakumar et al.: *Preparation of $\text{Zn}(\text{In})\text{Se}$ films from alloyed precursors*; Materials Research Bulletin 37 (2002) 617-629
- [xx] Patrick Berwian: *Dissertation: Experimentelle Untersuchung und Modellierung der Bildungskinetik von CuInSe_2 -basierten Halbleiter-Dünnschichten für die Solarzellenherstellung* - Erlangen (2005)
- [xxi] D. Dwyer et al.: *Selenization of co-sputtered CuInAl precursor films*; Solar Energy Materials & Solar Cells 94(2010)598–605
- [xxii] H. Jankowski et al.: *A model for a device with radiation heat transfer for selenization of Cu/In metallic precursors in photovoltaic applications*; Vacuum 75 (2004) 79–83
- [xxiii] Pisarkiewicz, H. Jankowski: *Vacuum selenization of metallic multilayers for CIS solar cells*; Vacuum 70 (2003) 435–438
- [xxiv] Bekker et al.: *Influence of selenization techniques on the reaction kinetics of chalcopyrite thin films*; Thin Solid Films 387(2001)40-43
- [xxv] NREL- Phase II Annual Report: *Plasma-Assisted Coevaporation of S and Se for Wide Band Gap Chalcopyrite Photovoltaics*; NREL/SR-520-35515 (2004)
- [xxvi] Sun Yu et al.: *CuInSe_2 films prepared by a plasma-assisted selenization process in different working pressures*; Chin. Phys. Lett. Vol. 27, No. 2 (2010) 028101
- [xxvii] Kosaraju, Repins, and Wolden: *Formation of chalcogen containing plasmas and their use in the synthesis of photovoltaic absorbers*; J. Vac. Sci. Technol. A 23 (4), Jul/Aug 2005
- [xxviii] D. Hariskos et al.: *Buffer layers in $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$ solar cells and modules*, Thin Solid Films 480–481 (2005) 99–109
- [xxix] D. Hariskos et al.: *The $\text{Zn}(\text{S},\text{O},\text{OH})/\text{ZnMgO}$ Buffer in Thin-Film $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})(\text{Se},\text{S})_2$ -Based Solar Cells Part II: Magnetron Sputtering of the ZnMgO Buffer Layer for In-Line Co-Evaporated $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$ Solar Cells*, Prog. Photovolt: Res. Appl. 2009; 17:479–488
- [xxx] T. Minemoto et al.: *Control of conduction band offset in wide-gap $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$ solar cells*, Solar Energy Materials & Solar Cells 75 (2003) 121–126

IMPRESSUM

Verfasser

Sunplugged
Solare Energiesysteme GmbH

Andreas Zimmermann
Affenhausen 80, 6414 Wildermieming
Tel: 05264/43006
E-Mail: andreas.zimmermann@sunplugged.at
Web: www.sunplugged.at

Autoren und Projektpartner

Daniel Huber
Andre Murawski
Christian Perfler

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