

Publizierbarer Endbericht

A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
Kurztitel:	SynerCIS
Langtitel:	Synergizing Austrian Breakthrough Innovations for CI(G)S solar cells
Zitervorschlag:	
Programm inkl. Jahr:	e!MISSION 1. Ausschreibung 2012
Dauer:	01.04.2013 bis 31.12.2017
KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:	Sunplugged GmbH
Kontaktperson Name:	Andreas Zimmermann
Kontaktperson Adresse:	Mindelheimer Strasse 6 6130 Schwaz, Tirol
Kontaktperson Telefon:	+43(0)5264-43006
Kontaktperson E-Mail:	andreas.zimmermann@sunplugged.at
Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):	Ebner Industrieofenbau Ges.m.b.H. (Oberösterreich) Isovoltaic AG (Steiermark) Sunny Bag (Steiermark) Universität Innsbruck (Tirol) AIT Austrian Institute of Technology GmbH (Wien) INM Saarbrücken (Saarland) Technische Universität Wien (Wien)
Schlagwörter:	Photovoltaik, Dünnschichtsolarzellen, CIGS
Projektgesamtkosten:	3.761.278 €
Fördersumme:	2.300.100 €
Klimafonds-Nr:	KR12NEOF01566
Erstellt am:	28.03.2017

B) Projektübersicht

1 Kurzfassung

Dünnschichtphotovoltaik gilt aufgrund ihres geringen Bedarfs an Energie und Material bei der Herstellung als vielversprechende Alternative zu konventionellen, auf Silizium-Wafern basierenden Solarmodulen. Dünnschicht-Technologien ebnen den Weg für kostengünstige Produktionsverfahren und eröffnen neue Anwendungsgebiete der Photovoltaik. Die weltweit industriell am meisten forcierten Dünnschicht-Solartechnologien basieren auf Verbundhalbleitern, allen voran sogenannten CI(G)S-Solarzellen, die ein ähnlich hohes Wirkungsgradpotenzial besitzen, wie konventionelle, kristalline Silizium-Solarzellen. Allerdings ist die Herstellung des CI(G)S-Halbleiters sehr komplex und für die kommerzielle Verwertung fehlt es sowohl an industriell einsetzbaren Prozessen als auch an Halbzeugen, wie zum Beispiel geeignete Einbettungs- und Verpackungsmaterialien. Das Leitprojekt „SynerCIS“ adressierte die wichtigsten technologischen Hürden in der Herstellung von CI(G)S-Solarzellen und spannt eine weiten Bogen entlang der Wertschöpfungskette: Von der Herstellung bisher fehlender Halbzeuge, über die Entwicklung von Anlagen für den eigentlichen CIGS Absorber, der Entwicklung von flexibel fertigbaren Solarzellen und -modulen bis hin zur Evaluierung der Technologien in neuen, bisher nicht realisierbaren Photovoltaikanwendungen.

Wesentliche Projektergebnisse

Neue Substrate und Verpackungsmaterialien für CIGS Solarzellen

Im Projekt wurden neue Substrate und Einbettungsfolien für Dünnschicht-Solarzellen entwickelt. Die neuen metallischen Substrate sind mit einer glasähnlichen Barrierschicht beschichtet und erlauben erhöhte Prozesstemperaturen während der Kristallisation der CI(G)S-Halbleiter. Die neuen Einbettungsmaterialien verbessern sowohl die Langzeitstabilität und führen gleichzeitig zu einer deutlich verbesserten Lichtausbeute bei Dünnschicht-Solarzellen während ihres Betriebs. Die Verpackungsmaterialien wurden im Laufe des Projekts in Rolle-zu-Rolle-Prozessen hochskaliert und weiter optimiert. Zusätzlich wurde eine transparente, flexible Frontabdeckung mit ausgezeichneter Barrierewirkung gegenüber Wasserdampfeintritt entwickelt.

Optimierte und hochskalierte CI(G)S-Solarzellen auf flexiblen Substraten und auf Glas

Im Projekt wurden CI(G)S-Solarzellen auf Glas und auf flexiblen Substraten mit zwei völlig neuen Herstellverfahren weiterentwickelt, hochskaliert und optimiert.

Diese österreichischen Prozessinnovationen führten zu industriell hergestellten CI(G)S-Dünnschichtsolarzellen mit Wirkungsgraden von 12,5% auf Glas und Wirkungsgraden von 10% auf ultradünnen Kunststofffolien. Es konnte mittels Solarzellen im Labormaßstab auch gezeigt werden, daß bei beiden Herstellungsverfahren die Wirkungsgrade mit zusätzlichen Dotierungen, optimierten Prozessbedingungen und Nachbehandlungen in Zukunft weiter gesteigert werden können.

Solarzellen vom Fließband

Sunplugged hat im Zuge des Projekts die Rolle-zu-Rolle-Pilotlinie für flexible CI(G)S-Dünnschichtmodule in der Nähe von Innsbruck in Betrieb genommen. Die Entwicklung des CI(G)S-Solarzellenmaterials und der Prozesse fand größtenteils mit eigens entwickelten Rolle-zu-Rolle-Maschinen statt. Damit wurde gezeigt, dass die unter Laborbedingungen in Österreich entwickelten Dünnschichtsolarzellen auch im industriellen Maßstab „Made in Austria“ hergestellt werden können.

Gedruckte Solarzellenverschaltung für mehr Designfreiheit

Ein druckbares Verschaltungskonzept (Monoscribe) für Dünnschicht-Photovoltaikmodule wurde entwickelt und für die industrielle Umsetzung optimiert. Die Monoscribeverschaltung ermöglicht die Produktion von individuell angepassten Photovoltaikmodulen mit minimalen Rüstzeiten nachdem alle Beschichtungsprozesse durchgeführt sind. Die für die Herstellung der Monoscribe-Kontaktierung notwendigen Kurzpulslaser-Prozesse und Drucktechnologien wurden erfolgreich weiterentwickelt und in einer Pilotanlage demonstriert. Die Reihenfolge und das Design der Mikrogräben erlaubt eine robuste industrielle Umsetzung.

Design und Entwicklung von funktional integrierten Photovoltaikbauteilen

Durch Variation von Form, Größe und elektrische Eigenschaften ist es mit der gedruckten Solarzellenverschaltung möglich, die Spezifikationen je nach Bedarf anzupassen. Basierend auf diesem Ansatz wurden am Ende des Projekts unterschiedliche PV Module entwickelt, welche das Potenzial der direkten Integration von Dünnschichtphotovoltaik in Gebäuden und tragbaren Produkten demonstrieren.

Vernetzung zwischen Akteuren aus Wissenschaft und Industrie

Das Projekt führte zu einer starken Vernetzung zwischen den beteiligten wissenschaftlichen Partnern und den Industrie- bzw. start-up Unternehmen. Neben der Teilnahme und Organisation von Konferenzen und der Zusammenarbeit auf Projektebene trugen hier verschiedenste thematische Workshops sowie die Organisation eines SynerCIS Workshops im Zuge der Intersolar 2015 zur internationalen Vernetzung bei.

2 Executive Summary

One well-recognized class of thin-film solar cells is based on quaternary compound semiconductors. The most prominent representatives of this group are CI(G)S solar cells (Copper Indium Gallium Selenide). CI(G)S solar cells are already commercially available and excel in terms of efficiency in comparison to all other thin-film solar cells. However, numerous shortcomings are existing in CI(G)S manufacturing, which offer a high potential for applied research and development to gain market shares. The flagship project SynerCIS has addressed major technological challenges in the upscaling, manufacturing, and application of CI(G)S solar cells and has brought Austrian innovations in this field closer to global market readiness. The project contributes significantly to advancements in the field of Cu(In,Ga)Se_2 thin film solar cells on glass and on flexible substrates such as polymers and metal foils. The project has covered all aspects along the value chain from the development of semi-finished precursor products helping to overcome current limitations of CI(G)S manufacturing, advanced machinery engineering for the low-cost and safe creation of CI(G)S absorbers to the realization of novel solar cell designs and manufacturing concepts integrated in a flexible production system. All innovations have been demonstrated on an industrial scale finally leading to a showcase of innovative solar-powered end-use applications.

Project results

Novel flexible substrates and packaging materials for CIGS solar cells

Within the framework of the project novel pre-products for CIGS solar cells such as flexible substrates and packaging materials have been developed. The metallic substrates come with glass-like barrier coatings allowing substantially higher processing temperatures and hence higher solar cell efficiencies.

In respect to the encapsulation front- and back encapsulants suitable for CI(G)S packaging have been developed and successfully up-scaled. The “highlight” in respect to packaging can be clearly seen in the development and modification of the front encapsulant enabling the setting of the UV-cut-off to a specific wavelength. Additionally transparent front sheets with excellent barrier properties have been developed.

CI (G)S Formation Processes and upscaling

Two distinct CIGS manufacturing routes for CIGS on glass and CIGS on flexible substrates have been developed, upscaled and optimized.

By consequent research and development both approaches were capable of reaching high efficiencies. Within the project, CIGS solar cells have been manufactured under quasi-industrial conditions (i.e. roll-to-roll production at Sunplugged, 300x300 mm large glass substrates at Ebner). Solar cell efficiencies of 10% have been achieved on flexible substrates and 12,5% respectively on glass substrates. It was also shown that there is a potential for future increases of the efficiencies on lab scale reference samples on different substrates, improved dopings and with additional post-treatments.

Flexibel solar cells from the conveyor belt

In course of the project Sunplugged has commissioned and operated a pilot line for the production of its in-house developed flexible CI(G)S solar cells and modules. This equipment has been used to show that the CIGS solar cells and modules developed in Austria can also be “Made in Austria”.

Monoscribe interconnection

A robust, printable interconnection scheme has been developed that allows the serial interconnection after all deposition processes have been made (Monoscribe). After fine-tuning the laser process parameters the layout of the microgrooves has been changed and fully reproducible results were achieved.

Prototypes and demonstrators for integrated PV applications

At the end of the project novel end-user applications for the use of flexible CI(G)S solar cells have been developed. The demonstrators comprise a generic mobile solar charging unit, the integration of light-weight and flexible thin-film modules for school bags in order to provide solar energy for pupils (charging of electronic devices plus safety lighting) and two novel BIPV elements for skylights and lightweight building skins.

Cross-linking the actors of the Austrian and European CI(G)S community

The project has led to strong collaboration between the scientific and industrial partners. The strong scientific contribution and the huge development steps in the project SynerCIS allowed to surpass the initially set goals. In total three full publications, 14 contributions to conferences, several participations at workshops and exhibitions were made. The organization of a CI(G)S workshop as side event of the “Intersolar” 2015 triggered further R+D activities beyond the scope of the SynerCIS project.

3 Hintergrund und Zielsetzung

Dünnschichtsolarmodule gelten als ein großer Hoffnungsträger für die Zukunft der Photovoltaik. Sie zeichnen sich durch niedrigen Verbrauch an Rohstoffen und Energie bei der Herstellung aus. Weiters können fertigungstechnisch zahlreiche kostensenkende Methoden und Prozesse verwendet werden. So ist im Gegensatz zur konventionellen auf Siliziumsolarzellen basierenden Photovoltaik, eine integrierte monolithische Verschaltung von Solarzellen zu Modulen möglich. Neben Glas können auch flexible Substrate verwendet werden, was die Herstellung leichtgewichtiger flexibler Photovoltaikmodule und eine kostengünstige Rolle-zu-Rolle-Fertigung ermöglicht. Diese Fertigungsoptionen helfen nicht nur die Kosten zu senken, sondern erlauben auch größere Freiheiten bezüglich Form und Design der Module.

Als besonders erfolgsversprechend gelten Dünnschichtsolarmodule basierend auf einer Absorptionsschicht bestehend aus Kupfer, Indium, Gallium und Selen. Diese sogenannten CI(G)S-Solarzellen erreichen im Labor bereits Wirkungsgrade von 22% und liegen daher nahezu im Bereich von konventionellen, polykristallinen Siliziumsolarzellen. Darüberhinaus haben CI(G)S-Solarzellen ein gutes Diffuslichtverhalten und erzielen hohe Energieerträge über den gesamten Tag.

Eine Reihe österreichischer Forschungseinrichtungen und Unternehmen sehen daher ein großes Potential in CI(G)S-basierten Solarzellen und entwickeln daher neue Ansätze, um Technologien rund um CIGS Solarzellen zum Durchbruch zu verhelfen.

Das SynerCIS -Projekt fördert die marktnahe Entwicklung österreichischer Innovationen im Bereich von Dünnschichtsolarmodulen basierend auf CI(G)S-Halbleitern. Durch die Entwicklung von kostengünstigen Vorläufermaterialien und verbesserten Produktionsprozessen werden die Wirkungsgrade von CI(G)S-Solarzellen gesteigert und gleichzeitig die Herstellkosten gesenkt.

SynerCIS schafft dabei Synergien zwischen den österreichischen „CI(G)S-Akteuren“ entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

Das Leitprojekt SynerCIS adressiert dabei die wesentlichen, technologischen Hürden, um österreichische Innovationen im Bereich von CI(G)S-Solarzellen

langfristig in globalen Wachstumsmärkten zu etablieren und sie unter Realbedingungen zu evaluieren.

SynerCIS umfasst alle technologischen Problembereiche entlang der Wertschöpfungskette: Von der Herstellung bisher fehlender Halbzeuge wie geeigneten Trägerfolien und Verkapselungsmaterialien, über die Entwicklung von Anlagen für den eigentlichen CI(G)S-Absorber, der Entwicklung von flexibel fertigen Solarzellen und -modulen bis hin zur Evaluierung der Technologien in neuen, bisher nicht realisierten PV-Applikationen österreichischer Hersteller.

4 Projektinhalt und Ergebnis(se)

Das SynerCIS-Projekt fördert die marktnahe Entwicklung österreichischer Innovationen im Bereich von Dünnschichtsolarzellen basierend auf CI(G)S-Halbleitern.

Im Zuge des Projekts wurde(n)

- ein multifunktionales Substrate für flexible CI(G)S-Solarzellen entwickelt
- die Herstellprozesse zur Bildung von hocheffizienten CI(G)S-Absorbern und der darauf aufbauenden Solarzellen optimiert
- eine neue, druckbare Verschaltung von flexiblen Solarzellen hochskaliert und für den industrielle Verwertung adaptiert
- neue Front- und Verkapselungsmaterialien mit höherer Lichtausbeute und verbesserter Alterungsbeständigkeit entwickelt.

Die entwickelten Technologien wurden anschließend in unabhängigen Photovoltaikanwendungen (mobile PV und gebäudeintegrierte Photovoltaik) demonstriert und auf ihre Anwendbarkeit, Energie- und Ressourceneffizienz hin evaluiert.

Durch die Entwicklung von kostengünstigen Halbzeugen, verbesserten Produktionsprozessen und Materialien wurden die Wirkungsgrade von CI(G)S-Solarzellen gesteigert und gleichzeitig die Herstellkosten gesenkt.

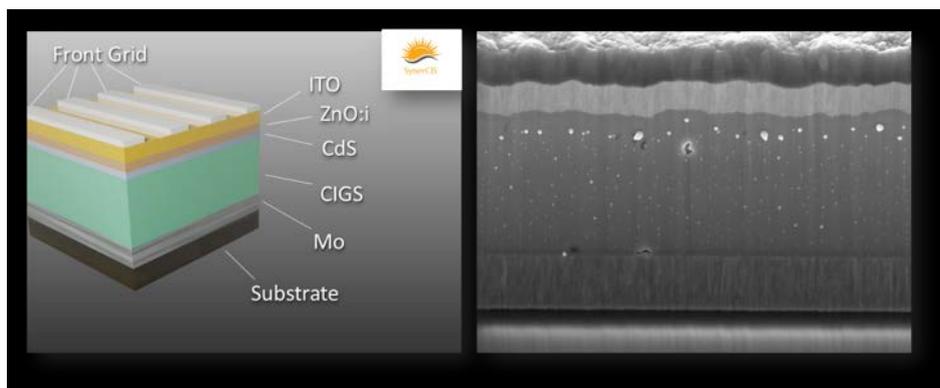
Grundlagen und Systemdesign

Im Rahmen des Projekts wurden zuerst Designrichtlinien und Berechnungsgrundlagen für die optimierte Herstellung von CI(G)S-Dünnschichtsolarmodulen erarbeitet. Die TU Wien übernahm die Erarbeitung und Darstellung der Abhängigkeiten zwischen Modul-Funktion, Modul-Geometrie und der Charakteristik der aufgetragenen CI(G)S-Schichten.

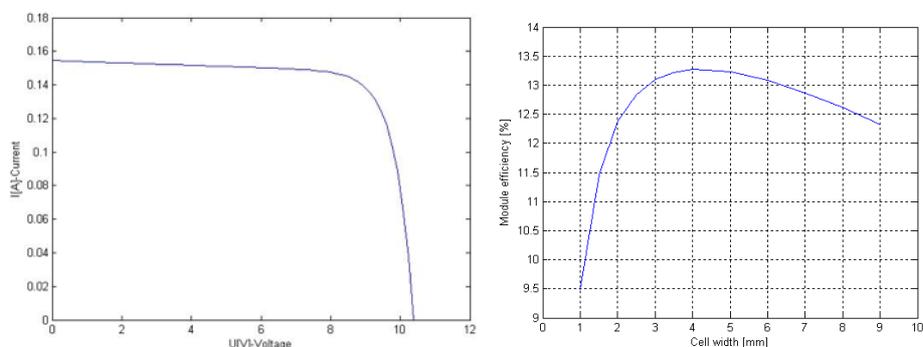
Zu Beginn des Projekts entwickelte die TU Wien ein allgemein gültiges, hybrides Modell für die Optimierung des Solarmodul-Designs und der elektrischen, optischen und geometrischen Parameter. Darauf aufbauend wurden Simulationen sowohl auf Solarzellenebene als auch auf Modulebene (d.h. unter Berücksichtigung der seriellen Verschaltung) durchgeführt.

Bei der Simulation auf Solarzellenebene wurde auch der Effekt der Verkapselung berücksichtigt. Nachdem alle Schichten der Solarzelle erfasst waren, simulierte

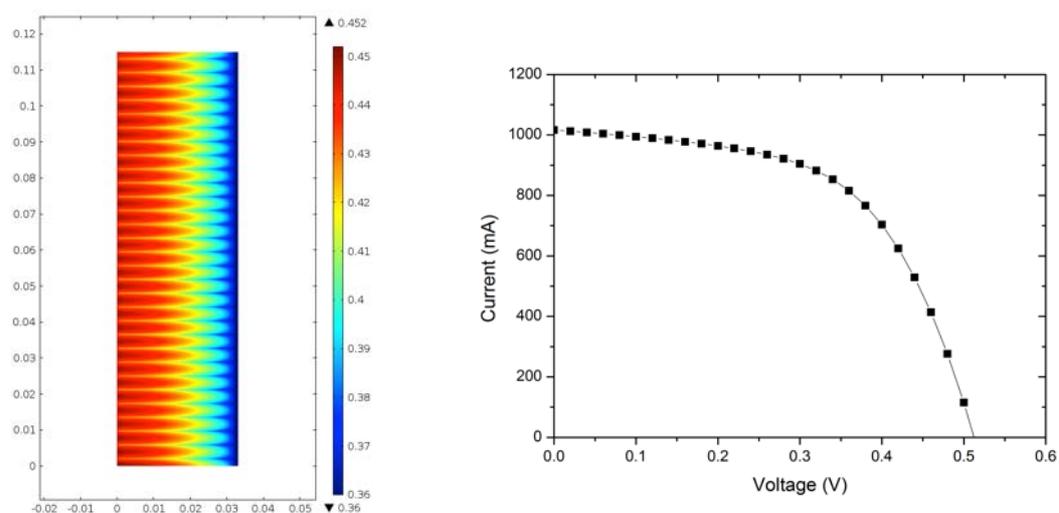
die TU Wien die IV-Kennlinie und stellte die charakteristischen Zellparameter dar (V_{oc} , J_{sc} , FF, η).



Schematische Darstellung der Solarzellen-Schichten, wie sie in der Simulation berücksichtigt wurden (links). SEM Aufnahme der einzelnen Schichten der CI(G)S Solarzelle (rechts).



links: Simulierte Strom-Spannungs-Kennlinie eines Moduls für eine Zell-Breite von 5mm, (16 Zellen im Modul), rechts: Effizienz eines Moduls in Abhängigkeit von verschiedenen Zellenbreiten (vorläufige Simulation TUW, Zell- und Modul-Parameter von Sunplugged)



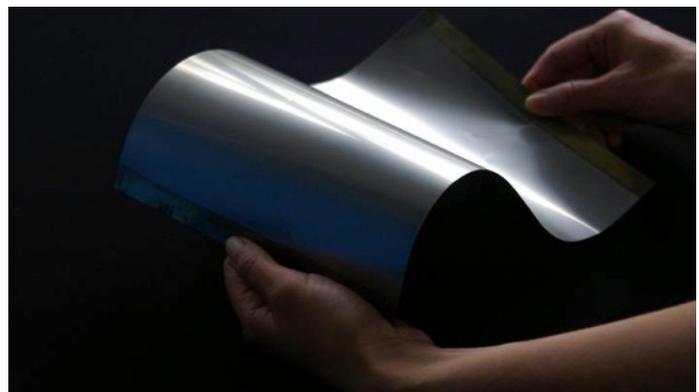
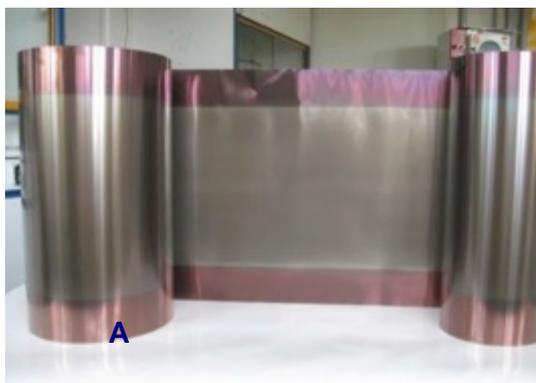
Spannungsverteilung auf der Oberfläche der simulierten Solar-Zelle bei $V_{MP}=0.36V$ sowie die entsprechende IV-Kurve (Simulation des Sunnybag-Prototyp).

Anschließend wurde die Simulation auf Modul-Ebene weitergeführt. In diesem Simulationsschritt wurden die IV-Kurven aus dem vorangegangenen Schritt als Input-Parameter genutzt. Das gewählte Modell beinhaltet optische, elektrische und thermische Parameter, die geändert werden können, um die Simulation an das jeweilige Anwendungsbeispiel anzupassen. Das Simulationsmodell wurde angewendet, um die Entwicklung der Demonstrationsprototypen von Sunnybag und der Universität Innsbruck zu unterstützen.

Substrate und Verkapselungsfolien für flexible CI(G)S-Solarzellen

Flexible CI(G)S-Solarzellen bieten neue Chancen für den Einsatz der Photovoltaik. Sie sind leicht und können aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften in zahlreichen, bisher nicht genutzten Anwendungen, verwendet werden. Entwicklungsseitig sind flexible CI(G)S-Solarzellen jedoch sehr anspruchsvoll. So gibt es derzeit kaum geeignete Trägerfolien, welche die thermischen und mechanischen Anforderungen bei der Herstellung von CI(G)S-Solarzellen erfüllen.

Es wurde daher im Rahmen des SynerCIS Projekts ein temperaturstabilisiertes, multifunktionales Substrat entwickelt. Dabei wird auf eine günstige Metallfolie eine dünne, elektrisch isolierende Schicht mittels Sol-Gel-Verfahren aufgebracht. Dieses Substrat erlaubt eine neue, serielle Kontaktierung der Solarzellen, verhindert die Diffusion von Eisenionen und wirkt als Natriumpuffer zur späteren Bildung des CI(G)S-Absorbers. Weiters kann dieses Substrat mit Mikrostrukturen versehen werden, um die Lichtausbeute zu verbessern. Technologiegeber für die Sol-Gel-Entwicklung ist das renommierte deutsche Forschungsinstitut für neue Materialien in Saarbrücken. Die Entwicklung einer dafür angepassten Solarzelle übernimmt Sunplugged und Entwicklung der Mikrostrukturen wird an der TU Wien durchgeführt.



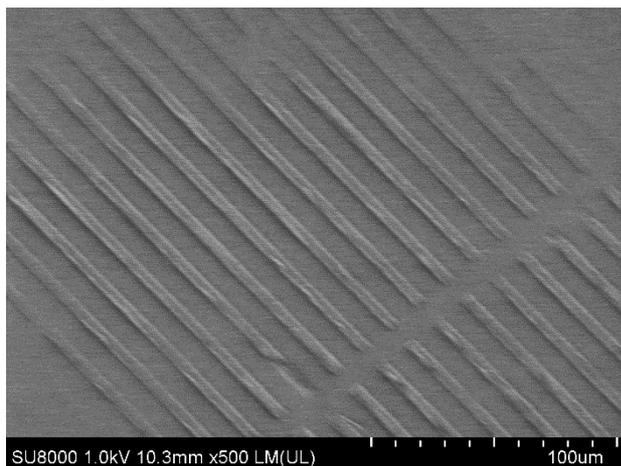
Edelstahlfolien mit glasartiger Barriere- und Isolationsschicht.

Texturierung für verbessertes Lichtmanagement in Dünnschichtsolarzellen

Da die CI(G)S-Absorptionsschicht sehr dünn (etwa 1-2 μm) ist, können zur Erhöhung der Absorptionsleistung „Light-Trapping“-Mechanismen eingesetzt werden. Sie beruhen darauf, dass sie den Lichtweg innerhalb der Solarzelle verlängern bzw. das Licht am Verlassen der Zelle hindern, bevor es absorbiert werden kann.

Dazu zählen neben der Krümmung des Substrats auch die Streuung des Lichts, etwa durch Einbringen von Nanopartikeln in das Substrat oder das Aufrauen des Substrats.

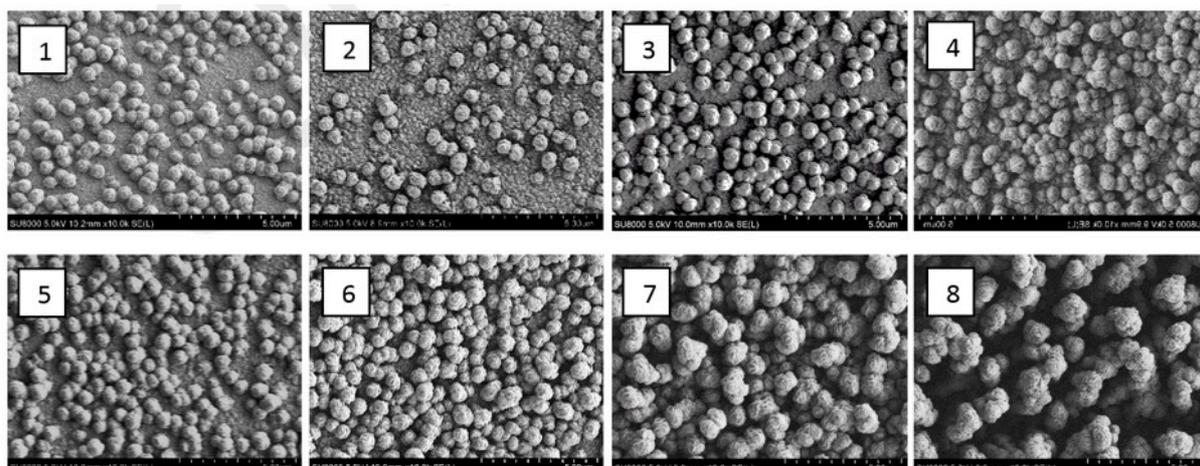
Im Rahmen des Projektes wurde ein kostengünstiger Texturierungsprozess entwickelt, der vollständig in das Rolle-zu-Rolle-Verfahren integriert werden kann. Die TU Wien hat im Zuge des Projekts mehrere Verfahren mit unterschiedlichen Substrat-Konfigurationen untersucht und ein Verfahren zum Patent angemeldet.



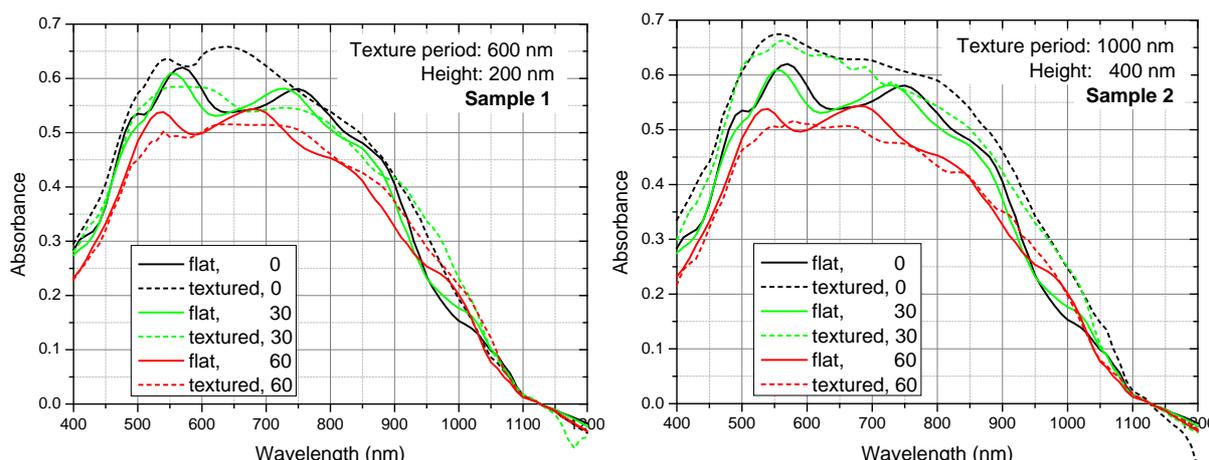
Mittels Heißprägung texturiertes Edelstahlsubstrat mit glasartiger Barrierschicht

Das von der TU Wien entwickelte und patentierte Verfahren zur Texturierung der Oberfläche von Polyimidfolien basiert auf einer Plasma-Behandlung. Dabei wird reiner Sauerstoff (O_2) aufgrund seiner Fähigkeit, unter elektrischen Entladungen reaktive Sauerstoffspezies (ROS) zu bilden, als Arbeitsgas eingesetzt. An der Polyimidoberfläche zerstören ROS Bindungen im Polymer, so dass an der Polymeroberfläche neue, vernetzte Strukturen entstehen.

Gleichzeitig sputtern hochenergetische Plasmapartikel Atome aus der Polyimid-Oberfläche, was die Rauheit der Oberfläche noch zusätzlich erhöht. Die auf der so texturierten Oberfläche erzeugten Erhebungen hängen von den Plasma-Prozessparametern, wie z.B. Plasmaleistung und der Behandlungsdauer, ab, wobei die Texturierung der Oberfläche Light-Trapping-Eigenschaften verleiht.



Rasterelektronenmikroskopaufnahmen der Plasmatexturierten Polyimidsubstrate in Abhängigkeit von Plasmaleistung und Prozesszeit. Die REM Bilder 2-4 zeigen die Texturierung bei 100W Plasmaleistung und unterschiedlichen Prozesszeiten von 5 bis 20 min. Die Bilder 5-7 zeigen die Texturierung bei 200W Plasmaleistung und Prozesszeiten von 5 bis 20 min. Bei Bild 1 (50W) und Bild 8 (300W) betrug die Prozesszeit jeweils 20 min.



Simulation des Absorptionsverhaltens von texturierten und flachen Solarzellensubstraten

Optimierung des Dünnschichtsolarzellenmaterials

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

Das Hauptaugenmerk auf Zellebene war die Optimierung des CI(G)S-Absorbers bzw. die Optimierung der Grenzfläche zwischen dem CI(G)S-Absorber und der sogenannten Pufferschicht. Der methodische Ansatz dabei war, mit unterschiedlichen Stöchiometrien und Beschichtungssequenzen den Zellwirkungsgrad zu erhöhen.

Die chemische Zusammensetzung des Absorbers – insbesondere die jeweiligen Anteile von Kupfer, Indium, Gallium und Selen – sowie die Ausbildung der CI(G)S-Strukturen während des Kristallisationsprozesses spielen eine wesentliche Rolle für Erzeugung und Nutzbarkeit freier Ladungsträger durch Lichteinstrahlung. Es wurden daher zahlreiche Varianten bezüglich des Schichtaufbaus sowie prozesstechnischer Einstellungen getestet und evaluiert. So konnten für jeden einzelnen Prozessschritt Einstellungsparameter ermittelt werden, mit denen sowohl die benötigten Schichtdicken und Materialzusammensetzungen als auch die Kristallstrukturen und ausreichende Selenzufuhr für die Ausbildung stöchiometrischer CI(G)S-Schichten realisiert werden können.

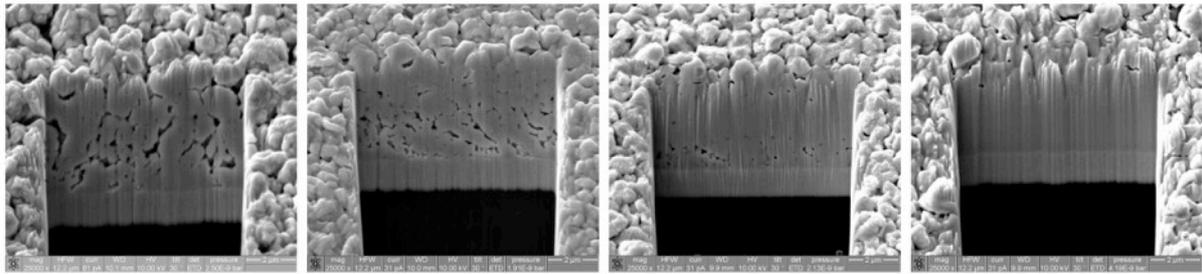
Im Zuge des Projekts wurden bei den Projektpartnern mehrere hundert Versuche mit variierenden Prozessparametern durchgeführt.

Im Folgenden werden exemplarisch Versuche bei denen die Parametern „Selenfluss“ und Substrattemperatur variiert werden vorgestellt:

Beispiel 1 Selenfluss:

Neben Substrattemperatur, Sputterleistungen, Druck, etc. ist vor allem der Selenfluss während des Beschichtungsprozesses ein ausschlaggebender Parameter, der die CI(G)S-Schichtqualität stark beeinflusst. Ein Schwerpunkt des SynerCIS-Projekts wurde daher auf die Optimierung des Selenflusses gelegt.

Die Selenquelle besteht aus einem Reservoir, einer Leitung und einer Düse. Die Temperatur des Reservoirs und der Düsendurchmesser bestimmen die Selenmenge in der Beschichtungskammer. Wird die Temperatur zu niedrig gewählt, kann einerseits die Menge an Selendampf in der Kammer zu gering sein, wodurch die Bildung der stöchiometrisch polykristallinen CI(G)S-Halbleiterschicht negativ beeinflusst oder sogar verhindert wird. Andererseits hat eine niedrige Temperatur zur Folge, dass sich Cluster aus sechs oder sieben Selenatomen bilden können, die eine sehr geringe chemische Reaktivität aufweisen. Wird andererseits die Selen-Quellentemperatur zu hoch gewählt, kann dies einen Überschuss an Selen in der Absorberschicht zur Folge haben. Das in der Schicht eingelagerte, überschüssige Selen verdampft im letzten Prozessschritt und hinterlässt Risse oder Löcher in der obersten Schicht. Beide beschriebenen Probleme haben eine geringe Effizienz zur Folge.



Entwicklung der Morphologie der CI(G)S-Schicht in Abhängigkeit des Selenflusses (gesteigerter Selenfluss von links nach rechts/links wenig Selen, rechts viel Selen)

Beispiel 2: Substrattemperatur

Die Substrattemperatur hat ebenfalls wesentlichen Einfluss auf das Kristallwachstum in der CI(G)S-Absorberschicht, d.h. je höher das Substrat geheizt wird, umso mehr Energie steht für die Ausbildung der Kristallstrukturen zur Verfügung. Dadurch können über die Substrattemperatur beispielsweise die Anteile der verschiedenen CI(G)S-Phasen, die Kristallitgrößen sowie die damit verbundenen Korngrenzen im Gefüge verändert werden. Jedoch sind hier zahlreiche weitere Parameter von Bedeutung, die immer in Kombination betrachtet werden müssen. Einige wichtige Größen in dieser Hinsicht sind:

- Verfügbare Mengen an Cu, In, Ga und Se
- die Teilchenenergien: abhängig von Verdampferquelle und Prozessdruck
- Zeit, die für die Reaktion (Kristallbildung) zur Verfügung steht
- Menge an Fremdatomen (z.B. Na), die Einfluss auf die Strukturbildung haben

Wie stark die Substrattemperatur die Mikrostruktur der CI(G)S-Schicht beeinflussen kann, ist beispielhaft in den folgenden Abbildungen dargestellt. Dabei zeigen sich bei 490°C wesentlich größere Strukturen mit mehr Hohlräumen und damit verbundener höherer Oberflächenrauigkeit, während bei 400°C eine deutlich kompaktere Schicht hergestellt werden konnte. Dies hat großen Einfluss auf die Abscheidung der weiteren Schichten auf der CI(G)S-Oberfläche – insbesondere auf die sehr dünne Pufferschicht, mit der der p-n-Übergang der Zelle realisiert wird. Auf einer sehr rauen CI(G)S-Oberfläche (wie bei 490°C) ist die Abscheidung einer geschlossenen, homogenen Pufferschicht nur schwer umzusetzen.

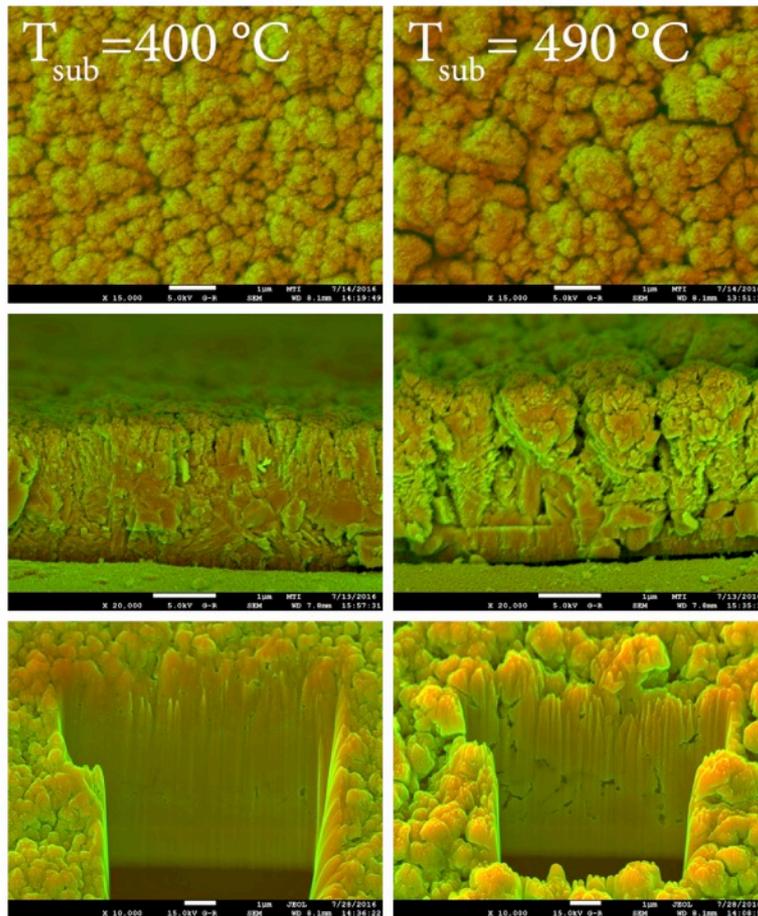


Abbildung: Links ist eine bei niedrigen Substrattemperaturen ($T_{\text{sub}} = 400^\circ\text{C}$) hergestellte CI(G)S-Schicht dargestellt, rechts bei höheren Temperaturen ($T_{\text{sub}} = 490^\circ\text{C}$). Für beide Proben ist die Oberfläche, der gebrochene Querschnitt und der polierte Querschnitt dargestellt.

Neben der Variation der grundlegenden Prozessparameter während des CI(G)S-Prozesses wurden weitere Ansätze untersucht, die Wirkungsgrade der CI(G)S-Solarzellen zu steigern.

Thermische Nachbehandlung

Ein weiterer Ansatz zur Wirkungsgradsteigerung ist die thermische Nachbehandlung der Solarzellen unter verschiedenen Atmosphären und Drücken. Zu diesem Zweck wurde bei Sunplugged eine Rapid-Thermal-Annealing-Apparatur aufgebaut. Im Sommer 2016 durchgeführte Versuche unter Schwefelatmosphäre haben geringe Erhöhungen des Füllfaktors ergeben.



Der Versuchsaufbau (Vakuum-Ofen) bei Sunplugged für die thermische Nachbehandlung von CIGS Solarzellen. Damit können Solarzellen bis zu einem Durchmesser von 280 mm thermisch nachbehandelt werden. Weiters können unterschiedliche Drücke, Prozessgase und sehr schnelle Aufheiz- und Abkühlrampen gefahren werden.

Am Ende des SynerCIS- Projekts wurden diese Experimente weitergeführt und Wirkungsgradsteigerungen von 5-10% im Vergleich zum Basismaterial konnten erreicht werden.

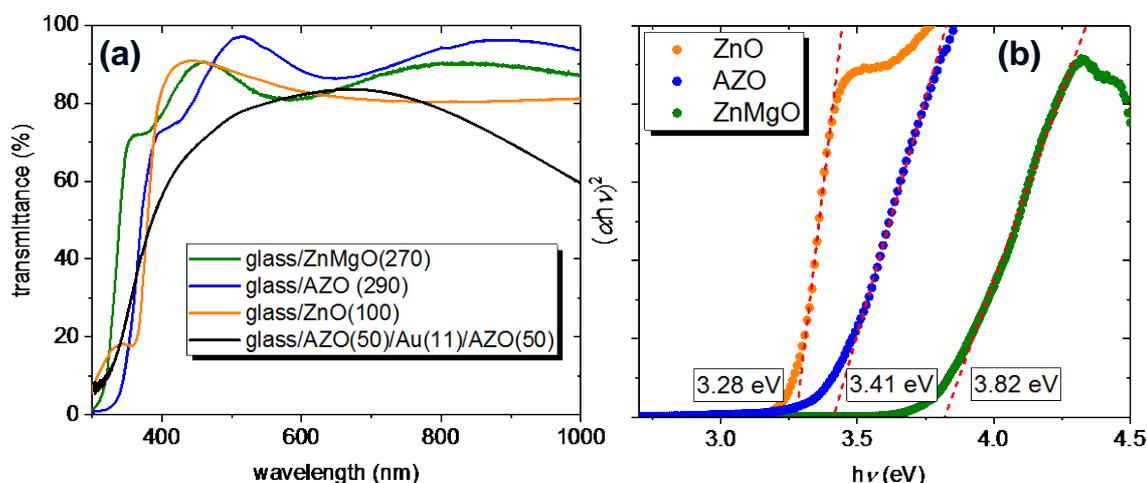
Optimierung des gesamten Solarzellenstapels

Neben den Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten an der CI(G)S-Schicht wurde der gesamte Solarzellenstapel kontinuierlich weiterentwickelt.

Sputterdeposition des Frontkontakts

Im Zuge des Projekts haben die Partner Sunplugged und AIT gemeinsam verschiedene gesputterte Fensterschichten untersucht. Als potentielle Fensterschichten wurden ZnO (Zinkoxid), ZnMgO (MgO Anteil 10%) sowie AZO (Aluminiumzinkoxid) verwendet. Während die AZO-Schicht einen niedrigen spezifischen Widerstand ($\sim 2 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$) aufweist, sind die spezifischen Widerstände von ZnMgO und ZnO um 2 bzw. 3 Größenordnungen höher. Eine höhere Bandlücke des Frontkontaktes (TCO, transparent conducting film) erlaubt dem Lichtspektrum ungehindert zum Absorber vorzudringen, während bei geringerer Bandlücke die Gefahr von Rekombinationen zunimmt. Während reines ZnO hier die niedrigste Bandlücke (3.28 eV) aufweist, ist jene von AZO bereits etwas höher (3.41 eV). ZnMgO besitzt die höchste Bandlücke (3.83 eV), wobei diese von der Magnesiumdotierung abhängt. Dotierung von ZnO mit Magnesium

erlaubt somit eine Verbesserung der Bandlücke am Übergang zwischen Frontkontakt und der Pufferschicht.



Transmissionsspektren verschiedener transparenter Frontkontakte und Fensterschichten

Optimierung des Rückkontakts (Mo):

Ein weiteres Problem stellten beim CIGS Hochtemperaturprozess entstehende Mikrorisse in der Rückkontaktschicht (Mo-Schicht) dar. Der Ursprung dieser Risse lag einerseits in den unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten des Substrates (Polyimid) und der darüber liegenden Molybdänschicht und andererseits an mechanischen Zugspannungen welche in der Rolle-zu-Rolle-Anlage auftreten. Die Entstehung der Mikrorisse passierte bereits im Mo-Beschichtungs-Prozess. Der Flächenwiderstand war allerdings nach Abkühlung der Folie (zusammenziehen der Risse) kaum messbar und wurde erst nach der CI(G)S-Beschichtung, während welcher die Mikrorisse mit Halbleitermaterial aufgefüllt wurden, deutlich. Dies erschwerte die Optimierung erheblich.

Trotzdem konnten die Mikrorisse durch Ergänzen der Mo-Anlage durch eine Substrateheizung, durch Verwendung eines leicht geänderten Substrates, sowie durch Optimierung der Sputterparameter nahezu eliminiert werden. Einen weiteren Beitrag zur Elimination der Mikrorisse lieferte das Hinzufügen einer Titan-Schicht zwischen Mo und Polyimid, welche vom Ausdehnungskoeffizienten näher am Polyimid liegt als Molybdän.

Diese Eigenschaft des Titanlayers ist allerdings hauptsächlich ein günstiger Nebeneffekt, da der eigentliche Grund für den Titanlayer in der Optimierung der Natriumzufuhr (siehe unten) liegt.

Natriumzufuhr

Der positive Effekt von Natrium für den Aufbau der CI(G)S-Schicht ist bereits seit längerem aus der Literatur bekannt. Während die Isolierende Schicht auf

Stahlsubstraten selbst als Natriumspender fungiert, muss bei Polyimid-Substraten das Natrium zusätzlich eingebracht werden. Dies funktioniert entweder über das „Zuschalten“ einer NaF-Quelle während des CI(G)S-Prozesses, oder durch Einlagerung von Na in der Mo-Rückkontaktschicht. Dabei wird die Rückkontaktschicht aus drei Einzelschichten (Mo-MoNa-Mo) aufgebaut. Aufgrund von besseren Ergebnissen, wird bei Sunplugged die zweite Variante (Einlagerung im Rückkontakt) verwendet. Während anfängliche Versuche zu deutlich zu geringem Natriumgehalt in der CI(G)S-Schicht führten, wurde der Rückkontakt nachoptimiert.

Dabei wurden folgende Verbesserungen durchgeführt:

- Hinzufügen einer Titanschicht, die als Barrierschicht zwischen Polyimid-Substrat und Molybdän fungiert, um zu verhindern, dass das Natrium den Rückkontakt in Richtung des Substrats verlässt
- Erhöhung der Natriumanteils in der mittleren Rückkontaktschicht (MoNa) von 10% auf 20%.
- Optimierung der Dicke der MoNa-Schicht im Rückkontakt
- Reduktion/Optimierung der Schichtdicke der „CI(G)S-seitigen“ Mo-Schicht des Rückkontaktes, um das Diffundieren des Natriums in die CI(G)S-Schicht zu erleichtern/gewährleisten.

Die Optimierungen des Rückkontaktes in Bezug auf Mikrorisse sowie auf Natrium führten zu einer deutlichen Effizienzsteigerung und erlaubten erstmals Effizienzwerte im Bereich von 10%.

Gedruckte Solarzellenverschaltung für neue Designfreiheit

Neben der Solarzelle selbst ist die serielle Verschaltung zur Erhöhung der Modulspannung ein wesentlicher Einflussfaktor für die erzielbaren Wirkungsgrade und die Kosten des fertigen Photovoltaikmoduls.

Die integrierte monolithische Verschaltung von CI(G)S-Solarmodulen ist industriell State-of-the-art. Diese Methode ist jedoch für eine flexible, kundenspezifische Produktion zu starr und nur für glasbasierte CI(G)S-Module ausgereift.

Sunplugged hat bereits im Zuge eines Vorläuferprojekts die Machbarkeit einer druckbaren Kontaktierung demonstriert, welche die maßgeschneiderte Produktion von Dünnschichtsolarmodulen erlaubt. Dabei können Größe, Form und Spannung eines Solarmoduls über einen selektiven Laserprozess und zwei,

damit verknüpften Druckprozessen „on-the-fly“ definiert werden. Im Zuge des SynerCIS-Projekts wurde diese Basisentwicklung vom Labor auf industrielles Fertigungsniveau hochskaliert und Laser- und Druckprozesse mit Breiten von bis zu 300 mm durchgeführt.

Das Finden eines robusten Strukturierungslayouts, welches die selektive Strukturierung der CI(G)S-Solarzellen erlaubt, war dabei die größte technische Herausforderung. Darauf aufbauend wurde das Drucken von dielektrischen und leitfähigen Materialien mit Inkjet-Druckverfahren optimiert, um sowohl eine uneingeschränkte Designfreiheit der Module zu erreichen als auch eine präzise Drucktechnologie für die Zukunft zur Verfügung zu haben.

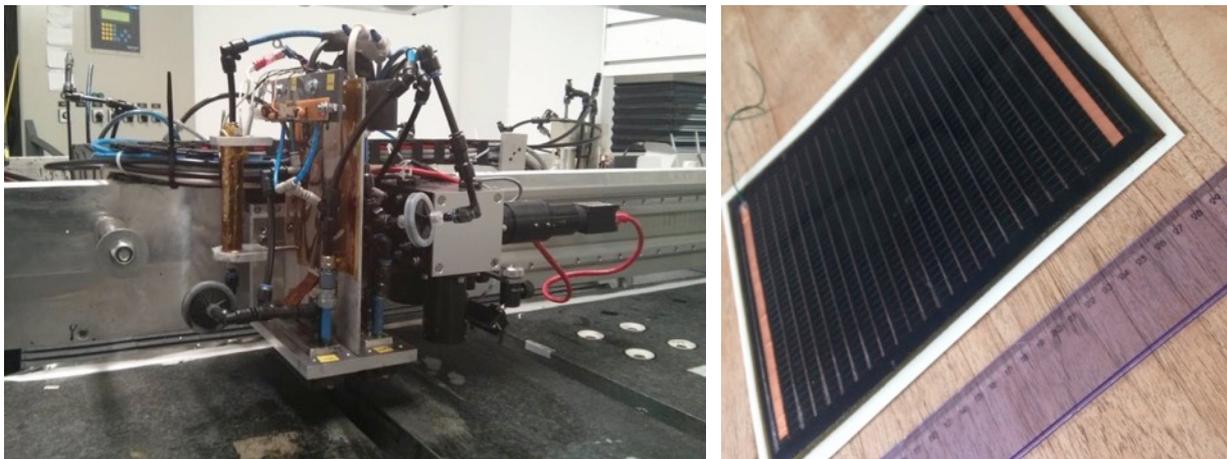
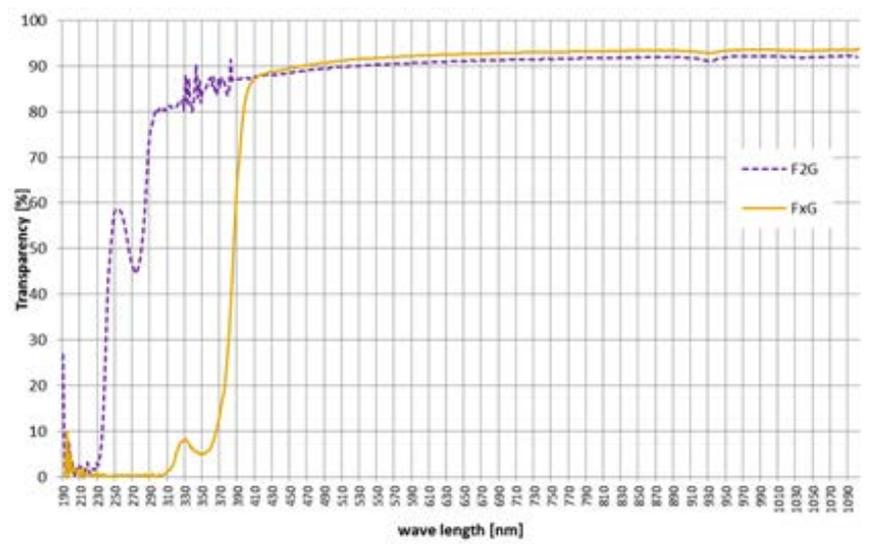


Abbildung links: Von Sunplugged entwickeltes Drucksystem, das mit dem Kurzpuls laser verknüpft ist. Mit den zwei Druckköpfen können die dielektische Tinte und die leitfähige Tinte gedruckt werden, ohne dass dabei die Positionierung der darunter liegenden CI(G)S-Solarzellen verändert werden muss.

Abbildung rechts: Mit Monoscribe verschaltetes CI(G)S-Modul von Sunplugged

Neue Einbettungs- und Verkapselungsmaterialien für CI (G)S-Solarzellen

Ein Schwachpunkt von flexiblen CI(G)S-Solarzellen ist die Verkapselung. CI(G)S-Solarzellen sind empfindlich gegenüber Feuchte und haben daher hohe Anforderungen an die Barriereigenschaften der Solarmodulverkapselung. Im SynerCIS entwickelte die Isovoltaic AG mechanisch belastbare und UV-beständige Einkapselungsmaterialien mit verbesserten Barriereigenschaften zur Vermeidung von Wasserdampf und Sauerstoffeintrag.



Verbesserter UV Cut-off für das breite Absorptionsspektrum von CI(G)S-Solarzellen

Die Einbettungsmaterialien wurden bei Sunplugged mit verschiedenen Rückseitenfolien (Backsheets) und transparenten Frontabdeckungen getestet und schließlich wurde bei Isovoltaic die Herstellung der Einbettungsfolien hochskaliert.

Neben den neuen Einbettungsmaterialien wurde von Isovoltaic auch eine neue transparente Frontabdeckung mit verbesserten Barriereigenschaften in Bezug auf Feuchte entwickelt.

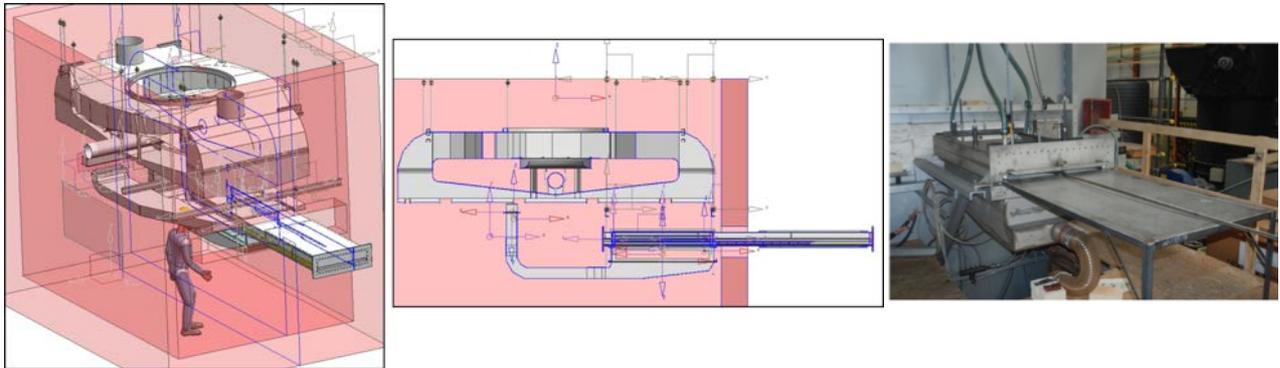
Das Frontseitenmaterial weist für CI(G)S-Zellen folgende relevante Eigenschaften auf: Transparenz >90%, Wasserdampfdurchlässigkeit <10-2g/m²d (23°C, 85%r.h), Witterungsbeständigkeit (Damp-Heat-Test, UV-Prüfung).

Um diese Transparenz auch für Wellenlängen <380nm nutzen zu können, mussten spezielle Polymere gewählt und entsprechend modifiziert werden. Eine Kombination mehrerer Lagen PET-SiO_x mit einer witterungsbeständigen Außenschicht auf der Basis von Polyamid hat sich als geeigneter Startpunkt für alle weiteren Entwicklungen erwiesen.

Robuste Prozesse sorgen für Wirkungsgradsteigerungen und geringeren Herstellkosten

Eng verknüpft mit der eigentlichen Solarzellenentwicklung in Arbeitspaket 2 war die Optimierung der Herstelltechniken und Materialzusammensetzungen des Schicht-Stapels. Die beiden Unternehmen Sunplugged und Ebner arbeiteten gemeinsam mit dem AIT an neuem Produktionsequipment zur Herstellung von glasbasierten und flexiblen Photovoltaikmodulen. So wurde im Zuge des Projekts vom Projektpartner Fa. Ebner ein Konzept und ein Prototyp für eine neue

Selenisierungsanlage zur Herstellung von großformatigen Glas-CI(G)S-Modulen entwickelt.



Konzept für Anlage zur Herstellung von CI(G)S-Solarzellen auf Glassubstraten mit sequentiellen Prozess

Bei Sunplugged wurde ein völlig neu entwickelter CI(G)S-Prozess hochskaliert, der speziell für die Verwendung von flexiblen Substraten zahlreiche Vorteile bietet.

Dabei werden anders als im konventionellen Co-Verdampfungsprozess, die Elemente Kupfer, Gallium und Indium zuerst auf eine rotierende Trommel gesputtert und anschließend gemeinsam unter Selenatmosphäre verdampft.

Im klassischen Co-Verdampfungsprozess werden Verdampferquellen im Hochvakuum ($>10^{-5}$ mbar) verwendet. Dabei besitzen die Teilchen eine niedrige kinetische Energie ($\approx 0,1$ eV) und aufgrund des niedrigen Druckes ist die Wahrscheinlichkeit eines Stoßes auf der Flugbahn zwischen Verdampferquelle und Substrat sehr gering.

Der Hybridprozeß der Sunplugged GmbH ist ein modifizierter 3-Phasen-Prozess. In der Vakuumkammer herrscht ein Druck von 10^{-3} mbar, d.h. es finden rund 15 Stöße auf der Wegstrecke zum Substrat statt. Außerdem werden die metallischen Komponenten (Kupfer, Indium und Gallium) durch Magnetron-Sputtering atomar zerstäubt. Beim Magnetron-Sputtering werden unter anderem Argon-Teilchen auf kinetische Energien von bis zu 20 eV beschleunigt, wodurch die mittlere kinetische Energie der schichtbildenden Teilchen erhöht wird (durch die Stöße findet eine Mittelung der kinetischen Energie der Teilchen statt).

Die zwei erwähnten Modifizierungen haben Vorteile für die Herstellung von CI(G)S-Absorptionsschichten im Niedertemperaturbereich auf Polymer-Substraten:

1. Der benötigte Energieeintrag für die Kristallbildung wird nicht nur durch die Substrattemperatur (klassischer 3-Phasen-Prozess), sondern auch durch die vergleichsweise erhöhte kinetische Energie der Teilchen eingebracht. Dies ist für den benötigten Niedertemperatur-Prozess auf Polymer-Substrat ein entscheidender Vorteil.
2. Die Haftung der CI(G)S-Schicht wird durch den Anteil an kinetischem Energieeintrag maßgeblich erhöht. Die Haftung ist für die Langlebigkeit (z.B. Nutzung als BIPV Element) ein ausschlaggebendes Kriterium.

Das Hochskalieren des neuen CI(G)S-Prozesses hatte allerdings auch zur Folge, dass es für die Funktion und Betriebsbereitschaft der zahlreichen Teilsysteme (Sputterquellen, rotierende Verdampfer, Kühlung von niedrigschmelzenden Precursor-Materialien, etc) keine empirischen Grundlagen gab. Aus diesem Grund wurden Anlagenteile im Zuge des Projekts systematisch getestet und verbessert.



Der Unterschied zwischen Labor und industrieller Wirklichkeit: Zahlreiche Probleme traten bei der Hochskalierung der komplexen Dünnschicht- und Halbleiterprozesse auf. Das SynerCIS Team war bei der Überleitung in den Rolle-zu-Rolle-Betrieb über weite Strecken des Projekts mit zahlreichen Problemen konfrontiert, die im Laborbetrieb nicht absehbar waren. Die Probleme wie gerissene Substrate, geschmolzene Galliumtargets und Anlagenkomponenten konnten aber nach und nach gelöst werden.

Ein wichtiger Punkt bei der großflächigen Deposition ist eine genügend homogene Verteilung der Schichteigenschaften (z.B. Schichtzusammensetzung, Schichtdicke) über die Fläche des Substrates. Dazu wurden die verwendeten Verdampfer der einzelnen Materialien in Hinsicht auf Verdampfungsprofile und Schichtdicke analysiert. Für eine Substratbreite von 30 cm wurde eine akzeptable Homogenität in Bereich von +/-5% erreicht.

Ein Problem das über weite Strecken des Projekts bestand, waren eine sehr selenhaltige Topschicht auf der eigentlichen CI(G)S-Schicht. Diese stark

selenhaltige Topschicht verursachte eine starke Reduktion der erzielten Wirkungsgrade auf flexiblen Substraten. Zahlreiche Versuche und Modifikationen an der Rolle-zu-Rolle CI(G)S-Anlage wurden durchgeführt, um das Entstehen dieser Topschicht zu verhindern.

Um die Dichtheit der Selenquellen zu vergleichen, wurden vor und nach dem Umbau/Modifikation über den Selenquellen (auf der wassergekühlten Kammerwand) Kapton-Klebeband Streifen positioniert. Diese wurden nach dem CI(G)S-Prozess entfernt und die Schichtdicke der Selenschicht analysiert. Diese Methode liefert keine eindeutigen Ergebnisse, da nicht bekannt ist wieviel Selen desorbiert oder ob dieses als quasi-Schmelze vorliegt. Allerdings können die Ergebnisse als erstes Indiz dienen. Der gemessene Wert der Schichtdicke wurde im Anschluss noch durch die Prozessdauer dividiert, da diese sich unterscheidet.

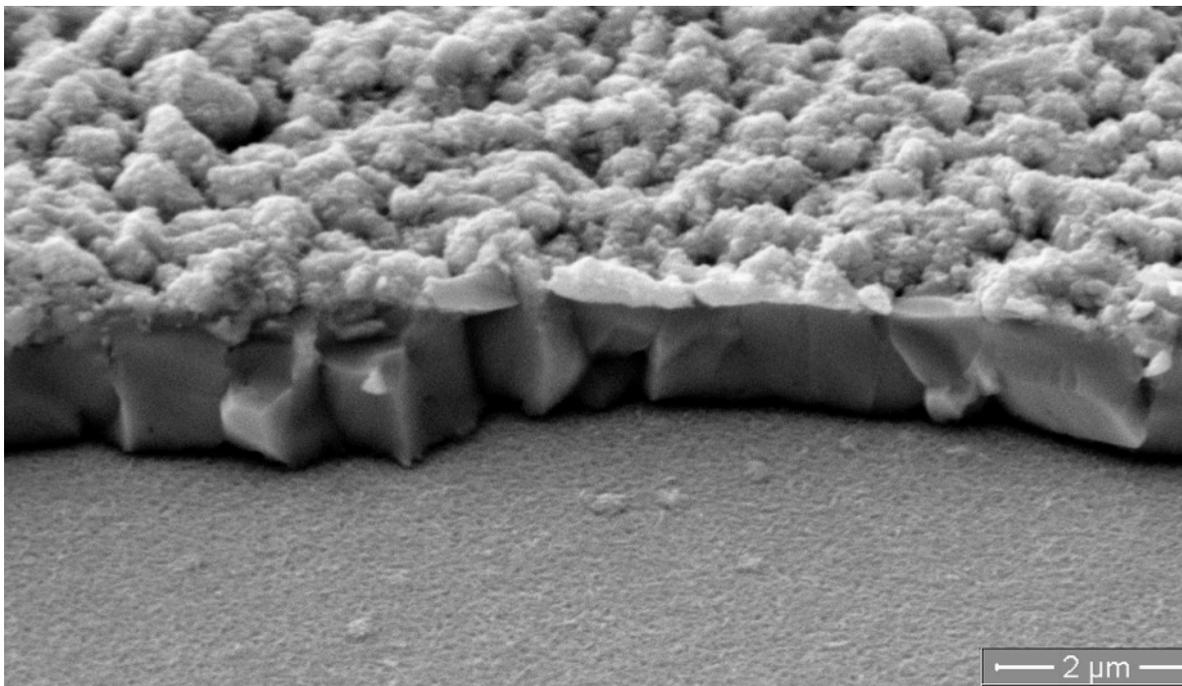
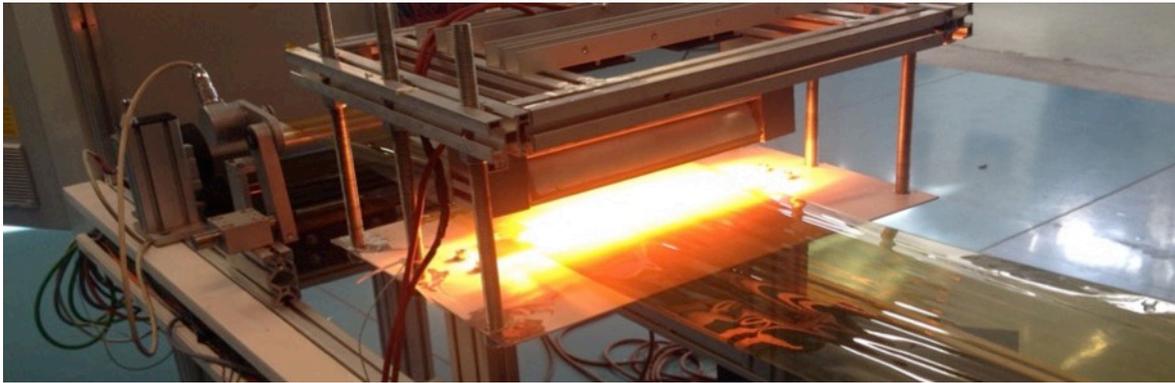


Abbildung oben: Die hellgraue Schicht zeigt die stark selenhaltigen Schicht, die über der eigentlichen Absorberschicht (dunkelgrau) im Produktionsprozeß aufwächst.

Die ursprünglich angestrebten Ziele im Projekt konnten trotz enormer technischer Herausforderungen erreicht werden. Der schwierigste Teil des Projekts war die Hochskalierung des CI(G)S-Kristallisationsprozesses für flexible Substrate im Rolle-zu-Rolle-Verfahren.

Da immer wieder einige unerwartete Probleme in der CI(G)S-Pilotlinie auftraten und die Anpassung der Prozessparameter mehr Aufwand als erwartet war, wurde das Projekt um insgesamt neun Monate verlängert.



Thermische Vorbehandlungen von Polyimidfolien zur Verbesserung des Schrumpfungsverhaltens und Reduktion von Mikrorissen bei der Herstellung von flexiblen CI(G)S-Dünnschichtsolarzellen

Demonstration der Entwicklungen in der Gebäudeintegration und bei der Versorgung von mobilen elektrischen Geräten

Am Ende des Projekts wurden alle entwickelten Technologien in neuen Photovoltaikanwendungen demonstriert und auf ihre Anwendbarkeit hin evaluiert. Sunplugged demonstrierte die entwickelten Technologien in zwei Photovoltaikmodulen für den Einsatz in der Gebäudeintegration und Sunnybag entwickelte zwei Anwendungsbeispiele im Bereich von mobilen Solarladegeräten. Beim Design wurden beide Unternehmen durch Modellierung und Simulation von der TU Wien und der Universität Innsbruck unterstützt.



5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Das Projekt spannte einen weiten Bogen über zahlreiche Aspekte der angewandten Photovoltaikentwicklung: Von der Entwicklung von neuen Halbleitern, über neue Produktionstechnologien für Dünnschichtsolarzellen bis hin zur Demonstration in Gebäudehüllen und mobilen Endgeräten wurden neue Technologien erforscht und optimiert, welche weltweit in österreichischen Produkten verwertbar sind.

Gleichzeitig kam es während der fast vierjährigen Projektlaufzeit es zu grundlegenden Veränderungen in der Photovoltaikbranche. Für die industriellen Akteure am Photovoltaikmarkt hat der Wettbewerb im letzten Jahr weiter zugenommen und eine globale Konsolidierungsphase mit zahlreichen Insolvenzen und Verlagerungen der Produktionskapazitäten nach Asien eingeleitet. Dennoch zeichnet sich gleichzeitig ab, dass die technologische und industrielle Entwicklung rasch im Bereich von CI(G)S-Dünnschichtsolarzellen weiter geht und international eine Beschleunigung von Forschung und Innovation stattfindet.

Die Herausforderung der österreichischen und europäischen Photovoltaikforschung und -industrie für die kommenden Jahre liegt darin, international an vorderster Front mithalten zu können bzw. verlorenes Terrain im Bereich der konventionellen waferbasierten Solarzellenentwicklung durch Innovationen von neuen, material- und energieschonenden Solarzellenkonzepten eine Reindustrialisierung Europas im Bereich der Photovoltaik zu erreichen.

Das SynerCIS-Projekt hat bewiesen, dass CI(G)S-Dünnschichtsolarzellen und darauf basierende PV-Module, sowohl in Bezug auf erzielbare Energieerträge als auch auf Kostenreduktion, die etablierten waferbasierten Technologien übertrumpfen können.

Ungeachtet der technischen Probleme bei der Hochskalierung sind CI(G)S-Photovoltaikmodule ein entscheidender Befähiger für zukünftige Photovoltaikprodukte, da in keiner anderen Solarzellentechnologie die sowohl Vereinigung von Energieertrag und Kostensenkungspotential, als auch Langzeitstabilität und die Möglichkeit der nahtlosen Integration gegeben sind.

Kurzfristig können sie daher in zahlreichen globalen Marktsegmenten, in denen Formfreiheit, direkte Integrierbarkeit, Flexibilität oder ästhetische Kriterien von Bedeutung sind, Fuß fassen.

Die Projektpartner versuchen daher, basierend auf den Entwicklungen des SynerCIS-Projekts die Technologien weiterzuführen und an den globalen Märkten zu etablieren.

Die Ziele dabei sind:

1. Die weitere Erhöhung der Wirkungsgrade bei gleichzeitiger Reduktion der Herstellkosten
2. Die weitere Optimierung und Entwicklung von flexiblen und langlebigen Verkapselungsmaterialien
3. Die Demonstration in innovativen Anwendungen

C) Projektdetails

6 Methodik (max. 10 Seiten)

Methodik für die Entwicklung und Optimierung der CI(G)S-Dünnschichtsolarzellen und -module

Die Herstellung der flexiblen Dünnschichtsolarzellen und -module erfolgte in der Pilotlinie bei Sunplugged und Herstellung der glasbasierten CI(G)S-PV-Module erfolgte bei der Fa. Ebner.

Bei Ebner wurden 300x300 mm² große Glasplatten prozessiert und bei Sunplugged unterschiedliche, flexible Foliensubstrate verwendet.

Auf diesem meist ca. 300 mm breiten, gereinigten Folien wurden zuerst mit verschiedenen Materialien (Chrom, Molybdän, dotiertes Molybdän) in einer Rolle-zu-Rolle-PVD-Anlage (Physical Vapour Deposition) ein mehrschichtiger Rückkontakt aufgetragen. Danach wurden an den mit dem Rückkontakt beschichteten Rollen, der CI(G)S-Kristallisationprozess durchgeführt. Dann wurden die Bänder in einzelne Segmente unterteilt, diese charakterisiert und weiter verarbeitet. Auf die CI(G)S-Schichten wurde nasschemisch eine etwa 50-80 Nanometer dünne Pufferschicht abgeschieden.

Diese Bänder werden anschließend wiederum in einer weiteren PVD-Anlage mit dem restlichen Schichtaufbau (transparente Fensterschicht) versehen.



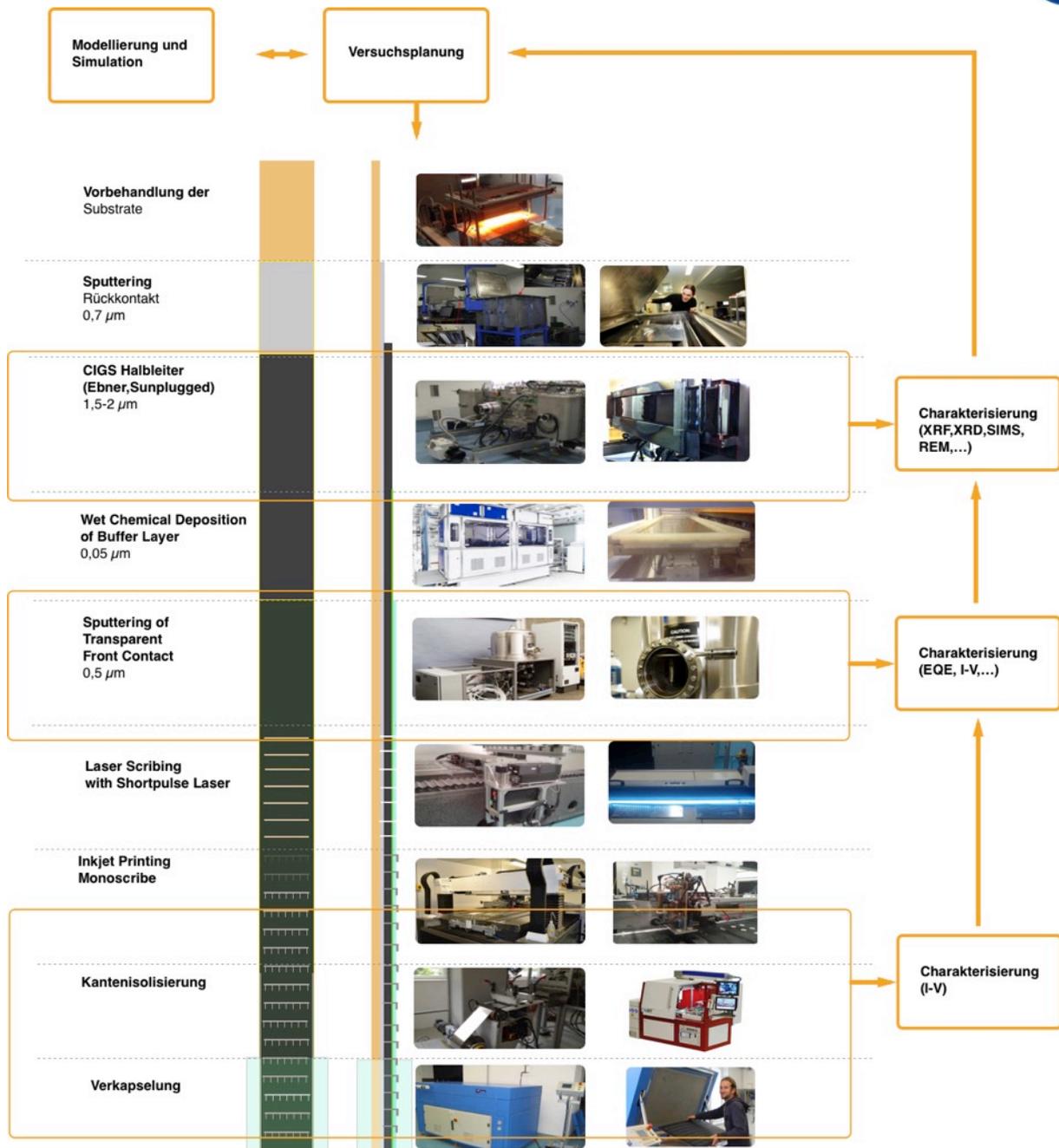
Abbildungen: Nach Rolle-zu-Rolle-Prozessen zum Auftragen des Mo-Rückkontakts und der CI(G)S-Absorberschicht wird das Material zur Analyse (XRF, SEM, XRD) in kleinere Samples geschnitten. Nach Auswahl der besten Samples werden diese weiterverarbeitet (Buffer-Layer und Frontkontakt-Bschichtung) und anschließend mit einer gedruckten verschaltung versehen und zu fertigen Solarmodulen verarbeitet.

Ein Teil der Testsamples wurde mittels Kurzpulslaser strukturiert, mit Frontkontakten bedruckt und verkapselt. Für die folgende Charakterisierung und Modellierung wurden jeweils Muster aus den jeweiligen Produktionsschritten gezogen und der TU Wien zur Verfügung gestellt (z.B. Muster nur mit Rückkontakt bis hin zu fertigen Solarmodulen mit Verschaltung und Verkapselung).

Bei der experimentellen Validierung der Lösungsvorschläge der TU Wien wurden die verwendeten Materialien und Prozessparameter selektiv durch die vorgeschlagenen Alternativen substituiert. Hauptaugenmerk auf Zellebene ist jedoch die Optimierung des CI(G)S-Absorbers bzw. die Optimierung der Grenzfläche zwischen CI(G)S-Absorber und der sogenannten Pufferschicht. Der methodische Ansatz dabei war, mit unterschiedlichen Stöchiometrien und Beschichtungssequenzen den Zellwirkungsgrad zu erhöhen.

Auf Solarmodulebene lag ein großes Optimierungspotenzial vor allem im Design der Modulverschaltung und in der Materialauswahl der verwendbaren, druckbaren Materialien (z.B. Isolations- und Leitpasten) und der darunterliegenden transparenten Fensterschicht.

Die Lösungsvorschläge von AIT und TUW in Bezug auf Frontkontaktdesign wurden in verschiedenen Druck-Layouts umgesetzt.



Versuchsablauf zur Optimierung der CI(G)S-Solarzellen und verschalteten Module

Methodik - begleitende Charakterisierungen

Der Schwerpunkt der begleitenden Analysen lag in der Charakterisierung der CI(G)S-Absorberschicht. Diese wurde laufend in Bezug auf die elementare Zusammensetzung, der Struktur und der Oberflächenbeschaffenheit untersucht.

Als erster Schritt wurde die relative elementare Zusammensetzung mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF) bestimmt. Folglich wurden mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops (SEM) Oberflächen- und Schnittbildern der

Absorber-Schicht aufgenommen, welche zur Analyse der Stöchiometrie dienen. Die Schnittbilder wurden durch Abtragen der einzelnen Schichten mit einem Focused Ion Beam (FIB) erstellt.

Eine tiefenabhängige Elementanalyse wurde teilweise anschließend mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX), GDOES (Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy), Sekundärionenmassenspektroskopie (SIMS) oder Photoelektronen-Spektroskopie (XPS) durchgeführt. Diese Methoden dienen v.a. zum Vergleich mit anderen Methoden. Durch die Kombination von GDOES mit SIMS erhält man ein Konzentrationsprofil der Schichtelemente und ein zusätzliches Tiefenprofil des Dotierelements Natrium.

Um zu untersuchen, ob bei den CI(G)S-Prozessen oder durch die Selenaktivierung schädliche Verunreinigungen in die CI(G)S-Schicht eingebaut wurden, wurden an der TU Wien sowohl positive als auch negative SIMS-Messungen durchgeführt.

XPS-Messungen dienen hingegen hauptsächlich der Analyse der Schichtübergänge. Diese Methode erlaubt ein genaues elementares Tiefenprofil des gesamten Schichtstapels auf einer Nanometerskala.

Neben der Zusammensetzung spielt die Struktur der Absorberschicht eine sehr wichtige Rolle. Strukturanalysen wurden mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) durchgeführt. Durch diese Methode konnten Informationen über den Phasenbestand, die Kristallitgrößen und den Kristallinitätsgrad erlangt werden.

Des Weiteren wurde die Oberflächenbeschaffenheit durch die Erstellung eines 3D-Modells der Oberfläche mit einem Infinite Focus Mikroskop (IFM). Das IFM besteht aus einem klassischen optischen Mikroskop, allerdings können Proben in alle drei Raumrichtungen abgerastert werden und somit ein 3D-Modell erstellt werden, welches die Bestimmung von Oberflächenprofilen und der Oberflächenrauheit erlaubt. Zur Untersuchung der instrumentellen Oberflächenstruktur kam außerdem regelmäßig ein Rasterkraftmikroskop (AFM) zum Einsatz, welches ebenfalls die Bestimmung der Oberflächenrauheit sowie die Bestimmung von Schichtdicken (an Schichtkanten) erlaubt.

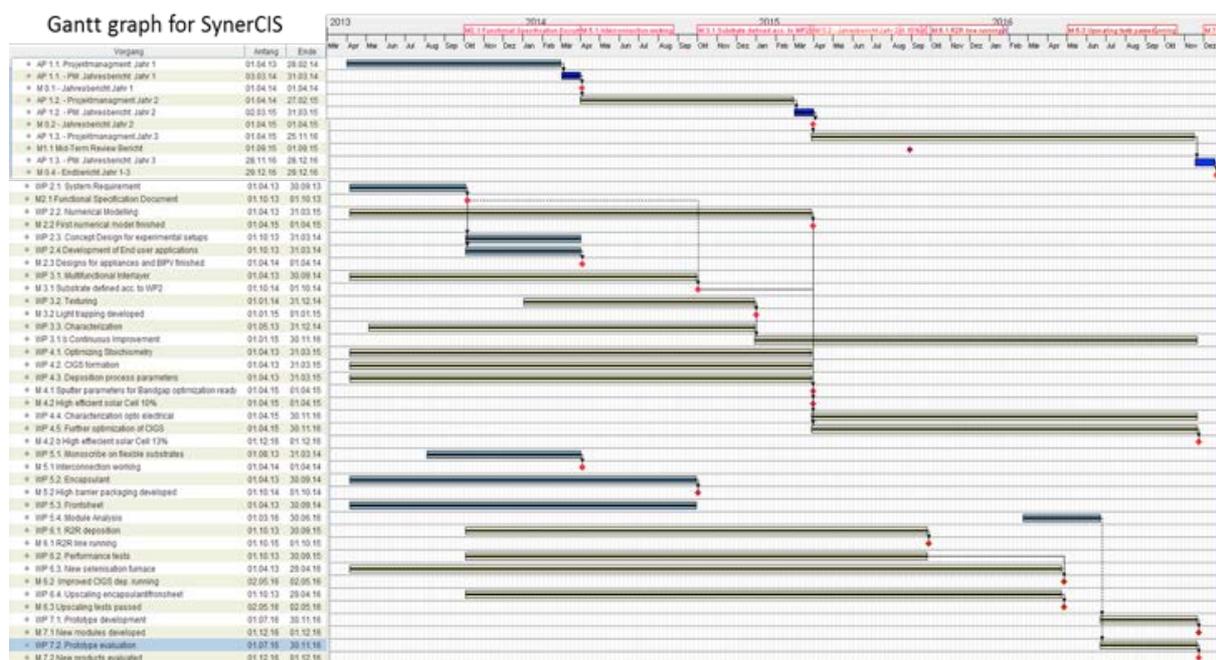
Diese Analysemethoden kombiniert mit der Messung der Strom-Spannungskennlinie fertiger Zellen und verschalteter Module bildeten die Grundlage zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen den Herstellungsparametern und den Schichteigenschaften.

Methodik Prototypenentwicklung

Neben der Entwicklung der Solarzellenmaterialien und -prozesse wurden verschiedene Photovoltaikmodul-Demonstratoren und experimentelle Versuchsaufbauten konzipiert und in Betrieb genommen.

7 Arbeits- und Zeitplan

(max. 1 Seite)



8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Tabellarische Angabe von wissenschaftlichen Publikationen, die aus dem Projekt entstanden sind, sowie sonstiger relevanter Disseminierungsaktivitäten.

Academic works:

1. Master Menz: „Light Soaking of Thin-Film Solar Cells under Colored Light“; Master thesis in co supervision with the TU-Vienna (Prof. Summhammer) and AIT (M. Rennhofer) 2016
2. Sophie Zeiger: “Charakterisierung von Prototypensolarzellen“; Internship within the „Femtech“ Stipendia program at AIT (M. Rennhofer) (2016)
3. CHARAKTERISIERUNG UNTERSCHIEDLICHSTER CIGS-PROTOTYPENZELLEN
4. Daniel Weberndorfer ; Bachelor Thesis; AIT, FH-Joanneum (2014)
5. DEVELOPMENT OF A DARK LOCK-IN THERMOGRAPHY (DLIT) SYSTEM AND ITS APPLICATION FOR CHARACTERIZING THIN FILM AND CRYSTALLINE PHOTOVOLTAIC GENERATORS
6. M. Halwachs, Master Thesis, AIT, Technical University of Vienna, (2014)

Femtech-Internship

A Femtech-internship was held in summer 2014, July and August (<http://www.femtech.at/>). The trainee, Marianne Pietschnig worked supervised on characterization of the first sample patches on metal substrate. The results are included in the report.

Journal Papers:

1. N. Severino, N. Bednar, N. Adamovic, "Buffer layer optimization for high efficiency CIGS solar cells", *Journal of Physics: Conference Series* 758, 012016 (2016). (doi:10.1088/1742-6596/758/1/012016)
2. N. Bednar, N. Severino, N. Adamovic, "Modelling of Cu(In,Ga)Se₂ Solar Materials/Cells", *Green Engineering* 5, 1-10 (2016). (doi:10.13052/jge1904-4720.5341)
3. N. Bednar, N. Severino, N. Adamovic, "Optical Simulation of Light Management in CIGS Thin-Film Solar Cells using Finite Element Method", *Applied Sciences* 5, 1735-1744 (2015). (doi:10.3390/app5041735) (**Open Access publication costs were paid for this journal article publication**)
4. **INDOOR DARK LOCK-IN THERMOGRAPHIE**
M. Halwachs, B. Kubicek, M. Rennhofer, G. Újvári, poster at the PV-Tagung, 3.11-5.11.2014, Linz, Austria (2014)
5. D. Menz and M. Rennhofer, "Colored Light Soaking of Thin-Film Solar Cells" in progress (2017)

Participation in conferences & workshops, with presentation:

1. N. Adamovic, M. Rennhofer, A. Zimmermann, "Synergizing Austrian Breakthrough Innovation for CI(G)S Solar Cells"; Poster: Photovoltaic Technical Conference 2016, Marseille, Frankreich; 09.05.2016 - 11.05.2016. (2016)
2. N. Severino, N. Bednar, N. Adamovic, "Buffer layer optimization for high efficiency CIGS solar cells", 3rd Euro-Mediterranean Conference on Materials and Renewable Energies, 2-6 November, 2015, Marrakech, Morocco. (conference, poster)
3. N. Bednar, N. Severino, N. Adamovic, "Numerical Optimization of Custom Designed BIPV Modules", 13. *Österreichische Photovoltaik-Tagung*, 5-7 Oktober 2015, Schwaz, Austria. (workshop, oral presentation)
4. N. Bednar, N. Severino, N. Adamovic, "Light trapping in thin Cu(In,Ga)Se₂ solar cells on textured polyimide substrate", *European PV Solar Energy*

Conference and Exhibition, 14-18 September, 2015, Hamburg, Germany (doi: 10.4229/EUPVSEC20152015-3BO.8.4). (conference, oral presentation)

5. N. Bednar, N. Severino, N. Adamovic, "Light Management in Back-Textured Thin-Film Solar Cells Achieved by Hot Embossing Process", *12th International Conference on Nanosciences and Nanotechnology*, 7-10 July, 2015, Thessaloniki, Greece. (conference, poster)
6. N. Severino, N. Bednar, N. Adamovic, "Optimization of CIGS thin-film solar cells by numerical modelling and simulation", *Vienna young scientists symposium*, 25-26 June, 2015, Vienna, Austria. (conference, oral presentation)
7. N. Bednar, N. Severino, N. Adamovic, "Simulation of Light Trapping in CIGS Thin-film Solar Cells using Finite Element Method", 2nd Spring International School and Workshop – NextGen Nano PV 2015, 20-24 April, 2015, Mao, Menorca, Spain. (oral presentation)
8. M. Rennhofer, A. Schneider, N. Bednar, P. Sevela, P. Corti, N. Adamovic und A. Zimmermann; SYNERCIS – NEUE FORMMÖGLICHKEITEN IN DER BIPV, for 9. Forum Bauwerkintegrierte Photovoltaik, 7.3. 2017 Kloster Banz Bad Staffelstein (2017).
9. M. Rennhofer, D. Menz: "Characterization Of Low Light Behavior Of Cigs Solar Cells"; Photovoltaic Technical Conference 2016, Marseille, Frankreich; 09.05.2016 - 11.05.2016; in: "Photovoltaic Technical Conference 2016", ARCSIS, 2016, 3 (2016).
10. D. Menz, M. Rennhofer; "Metastable Behavior of Thin-Film Solar Cells under Colored Light"; EUROREG-PV 2016, Ljubljana; 21.09.2016 - 23.09.2016; (2016).
11. D. Menz, J. Summhammer, M. Rennhofer: "Characterization of Low Light Behavior of CIGS Solar Cells"; 13. Österreichische Photovoltaik-Tagung, Schwaz; 05.10.2015 - 07.10.2015. (2015)
12. D. Menz, M. Rennhofer, A. Mittal, G. Újvári, J. Summhammer: "Metastable Behavior of Thin-Film Solar Cells under Colored Light"; Annual Meeting 2016, Austrian Physical Society, Wien; 27.09.2016 - 29.09.2016; in: "Austrian Physical Society, Annual Meeting 2016, Conference Book", Universität Wien, PW22 (2016), S. 271 - 272. (2016).
13. Upcoming: N. Bednar, A. Caviasca, P. Sevela, N. Severino, N. Adamovic, "Modelling of Flexible Thin-Film Modules for BIPV and PIPV", PVTC 2017,

26-28. April, Marseille, France

14. Upcoming: Walter Klasz, Alexander Grasser, Michael Flach, Pavel Sevela; "Wooden membrane with integrated flexible photovoltaic foil", for 12th Conference on Advanced Building Skins, Bern, Switzerland.

Participation at workshops:

1. Lichtmanagement und Photonik Workshop, 18 June, 2015, Graz, Austria. (Networking with members of Austrian Technology Platform in field of photovoltaics)
2. 4th PV Performance Modelling and Monitoring Workshop, 22-23 October, 2015, Cologne, Germany. (Training, networking and dissemination in the field of PV performance modeling through discussions with professionals working in the field.)

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte sowie die barrierefreie Gestaltung der Projektbeschreibung, übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

Die Fördernehmerin / der Fördernehmer erklärt mit Übermittlung der Projektbeschreibung ausdrücklich über die Rechte am bereitgestellten Bildmaterial frei zu verfügen und dem Klima- und Energiefonds das unentgeltliche, nicht exklusive, zeitlich und örtlich unbeschränkte sowie unwiderrufliche Recht einräumen zu können, das Bildmaterial auf jede bekannte und zukünftig bekanntwerdende Verwertungsart zu nutzen. Für den Fall einer Inanspruchnahme des Klima- und Energiefonds durch Dritte, die die Rechteinhaberschaft am Bildmaterial behaupten, verpflichtet sich die Fördernehmerin / der Fördernehmer den Klima- und Energiefonds vollumfänglich schad- und klaglos zu halten.