

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

17/12/2015

flex!PV.at – Modulkonzepte und Produktionsverfahren für hocheffiziente flexible PV-Module basierend auf emergenten Zelltechnologien

Projektnummer: 838621

e!Mission.at - 1. Ausschreibung

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

| | |
|------------------------------------|--|
| Ausschreibung | 1. Ausschreibung e!Mission.at |
| Projektstart | 01.04.2013 |
| Projektende | 31.12.2015 |
| Gesamtprojektdauer (in Monaten) | 33 Monate |
| ProjektnehmerIn (Institution) | KF: NanoTecCenter Weiz Forschungsges mbH P1: Austrian Institute of Technology, Energy Department P2: Institut für Chemische Technologie von Materialien, TU Graz P3: Linzer Institut für Organische Solarzellen, JKU Linz P4: Fraunhofer Institut für Angewandte Polymerforschung P5: crystalsol GmbH P6: ISOVOLTAIC AG |
| AnsprechpartnerIn | NanoTecCenter Weiz Forschungsges mbH |
| Postadresse | Franz-Pichler-Straße 32, 8160 Weiz |
| Telefon | +43 316 876 - DW |
| Fax | +43 316 876 8040 |
| E-mail | birgit.six@ntc-weiz.at |
| Website | www.NTC-weiz.at |

flex!PV.at

Modulkonzepte und Produktionsverfahren für hocheffiziente flexible PV-Module basierend
auf emergenten Zelltechnologien

AutorInnen:

DI Birgit Six

Dr. Theodoros Dimopoulos

Assoc. Prof. Dr. Gregor Trimmel

Dr. Markus Scharber

Dr. Christine Boeffel

DI Lukas Plessing

Dr. Verena Schenk

1 Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----|----------------------------------|----|
| 1 | Inhaltsverzeichnis | 4 |
| 2 | Einleitung | 5 |
| 2.1 | Aufgabenstellung | 5 |
| 2.2 | Schwerpunkte des Projektes | 7 |
| 2.3 | Einordnung in das Programm | 8 |
| 2.4 | Verwendete Methoden | 8 |
| 2.5 | Aufbau der Arbeit | 9 |
| 3 | Inhaltliche Darstellung..... | 11 |
| 4 | Ergebnisse..... | 13 |
| 5 | Ausblick | 24 |
| 6 | Literaturverzeichnis..... | 25 |
| 7 | Anhang | 27 |
| 7.1 | Abbildungsverzeichnis..... | 27 |
| 7.2 | Tabellenverzeichnis..... | 28 |
| 8 | Kontaktdaten..... | 29 |

2 Einleitung

Innovationen im Bereich der verschiedenen Photovoltaik- (PV) Technologien stellen einen wesentlichen Eckstein für den Vollzug einer künftigen Energiewende dar. Durch breit angelegte Aktivitäten in der F&E ist es gelungen, neue Generationen von PV-Technologien basierend auf organischen, anorganischen oder hybriden Aktivschichten zu entwickeln, welche technische Alleinstellungsmerkmale wie Semitransparenz, Flexibilität und geringes Flächengewicht aufweisen und durch die Verwendung von Niedertemperaturprozessen niedrigere Stromgestehungskosten bei einer verbesserten Ökobilanz zulassen. Es wird erwartet, dass diese Technologien ab 2025 in einigen Segmenten des PV-Marktes eine beherrschende Rolle einnehmen, sofern es gelingt, die hervorragenden F&E-Ergebnisse vom Labormaßstab in die industrielle Produktion zu transferieren. Das Projektkonsortium *flex!PV.at* hat dieses Ziel durch die Bündelung der maßgeblichen Expertise zu Material und Zellentwicklung, Beschichtungstechnologie und Modulentwicklung sowie Einkapselung und Modultests hinsichtlich Photovoltaiktechnologien in Österreich verfolgt.

2.1 Aufgabenstellung

Eine detaillierte technische Analyse¹⁻²⁵ ergab, dass allen potentiell flexiblen Solarzellentechnologien (Organische, Hybrid und CZTS) ähnliche Modulkonzepte und Herstellungsprozesse zugrunde liegen. Des Weiteren zeigte sich, dass es eine große Anzahl von gemeinsamen technischen Herausforderungen gibt, die es im Rahmen des Projektes *flex!PV.at* zu überwinden galt.

Damit hat sich *flex!PV.at* zum Ziel gesetzt, PV-technologieübergreifende, innovative Konzepte und Materialien, sowie Prozesse für die kontinuierliche Herstellung von Dünnschichtsolarzellenmodulen zu entwickeln. Alle notwendigen Herstellungsprozesse, von der Aufbringung der Absorberschicht, von Zwischen- respektive Pufferschichten, der thermischen Behandlung zur Trocknung und Umwandlung der Schichten, dem Druck der Elektroden bis zur kontinuierlichen Einkapselung der Module wurden in *flex!PV.at* technologieübergreifend behandelt und erforscht, um diese Produktionsverfahren kostengünstig sowie umwelt- und ressourcenschonend zu gestalten.

Die Möglichkeit, der in *flex!PV.at* angewandten Technologien, leichte und flexible Substrate unterschiedlicher Geometrie, sowie optische Absorbermaterialien, die weniger empfindlich auf Schwachlichtverhalten und zunehmende Modultemperatur reagieren, einzusetzen, sind entscheidende Kriterien, vor allem im Hinblick auf die Marktsegmente gebäudeintegrierter Photovoltaik (GIPV) und Konsumgüter. Die richtige Integration von Photovoltaik in Produkten, Gebäuden oder die städtische Umgebung ist immer noch eine Herausforderung und wirft Fragen in Bezug auf Flexibilität, Farbe, Haltbarkeit, Gewicht und Ästhetik auf.

e!Mission.at - 1. Ausschreibung

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

Besonders flexible PV-Module erhöhen deutlich die Akzeptanz durch die Verbraucher. Darüber hinaus will das Projekt *flex!PV.at* den momentan hohen Produktionskosten von Photovoltaikmodulen (etwa 0,60 €/WP zu 1,25 €/WP je nach Technologie)^{26,27} entgegenwirken und Produktionskosten von unter 0,3 €/WP erreichen, damit die Dünnschichtsolarzellentechnologien konkurrenzfähig werden und einen bedeutenden Beitrag zur weltweiten Energieproduktion leisten können.

Die Aufgabenverteilung in *flex!PV.at* erfolgte anhand der Expertise der einzelnen Projektpartner. Für die erfolgreiche Durchführung des Projekts wurde interdisziplinär gearbeitet, da einerseits die Forschungsexpertise im Materialbereich sowie im Bereich der Bauteilforschung, andererseits das Knowhow im Bereich der industriellen Prozesse essentiell war. Alle diese Kompetenzen waren im Konsortium vorhanden. Die folgende Abbildung fasst die unterschiedlichen Kompetenzen der Partner zusammen:

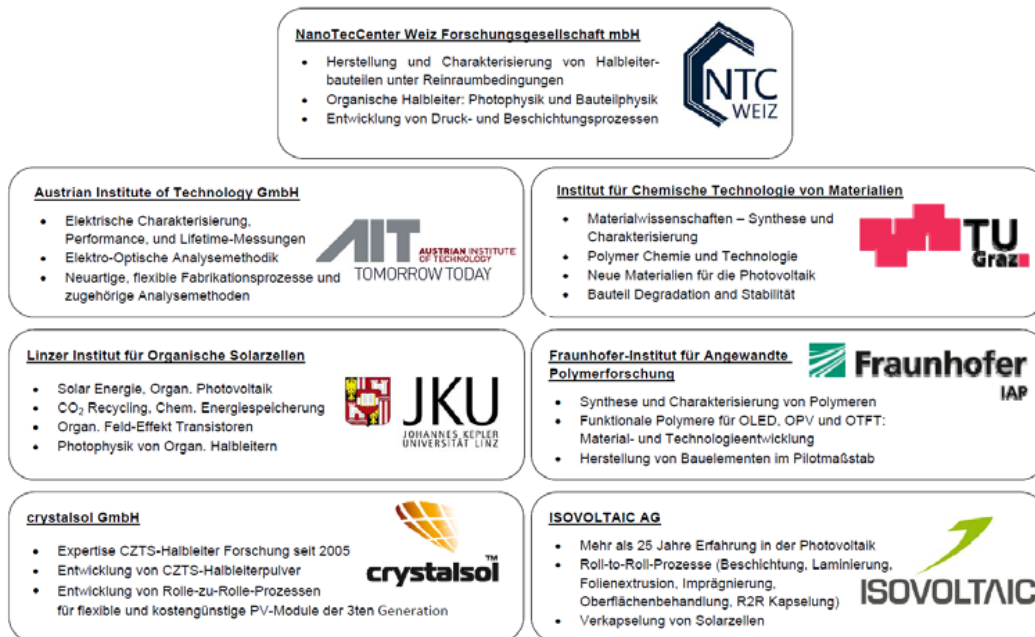


Abbildung 1: Zusammenstellung des Konsortiums und Kernkompetenzen der Projektpartner

Die Aufgabe der **NTC-Weiz** war neben den Tätigkeiten als Konsortialführer, die Durchführung eines Screenings hinsichtlich der einzelnen Prozesse, sowie die Auswertung und Optimierung dieser. Außerdem wurden weitere Schwerpunkte auf den (Digital)Druck von Silbergitterelektroden, sowie auf die Entwicklung alternativer Moduldesigns gelegt.

Der Schwerpunkt der **AIT** lag zum einen in der Prüfung von PV-Modulen hinsichtlich Lebensdauer- und Qualitätsanalyse (LCF und CFP), zum anderen in der Herstellung von lösungsbasierten transparenten Elektroden sowie der Synthese des Kesterit-Absorbers.

Am **ICTM** der Technischen Universität Graz lag der Forschungsschwerpunkt neben der Anpassung der verwendeten Kesteritmaterialien an den kontinuierlichen

Herstellungsprozess, sowie deren Charakterisierung, auf der Entwicklung Cadmium-freier Pufferschichten. Dies erfolgte in enger Zusammenarbeit mit der crystalsol.

Der Forschungsschwerpunkt des **LIOS** der JKU im Rahmen des Projektes war ein Screening inklusive Auswertung sowie Optimierung der Konzepte von der Zelle zum Modul und die Zusammenführung der erhaltenen Ergebnisse bezüglich Zwischenschichtsystemen in der organischen PV.

Anhand dieser Ergebnisse wurden am **Fraunhofer IAP** die Tests hinsichtlich des kontinuierlichen Modulherstellungsprozesses auf der bestehenden Pilotanlage durchgeführt. So konnten Bauelemente kontinuierlich im Labormaßstab hergestellt werden

Die **crystalsol** führte im Rahmen des Projektes ein Screening sowie die entsprechende Auswertung und Optimierung der Konzepte von der Zelle zum Modul bezüglich der CZTS-Technologie durch und überführte die Ergebnisse in den Herstellungsprozess von crystalsol für flexible PV-Module.

Die **ISOVOLTAIC AG** führte ihrer Expertise entsprechend die Rolle-zu-Rolle- (R2R) Verkapselung von CZTS- und OPV-Solarzellen und -Modulen durch, und optimierte in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern die dafür benötigten Materialien.

2.2 Schwerpunkte des Projektes

Wesentliche Intention des Projekts *flex!PV.at* war die Entwicklung von innovativen, technologieübergreifenden Konzepten – vom Material bis hin zu den Prozessen für die kontinuierliche Fabrikation von Dünnschichtsolarzellen. Ausgehend von den zwei sehr unterschiedlichen Photovoltaiktechnologien, der *organischen Photovoltaik* mit weitgehend Niedrigtemperaturprozessen (unter 200°C) und sehr dünnen Materialschichten (unter 500 nm) und der *anorganischen Photovoltaik mit Kupfer-Zink-Zinn-(Sulfid/Selenid)* (CZTS, CZTSe) mit meist Hochtemperaturprozessen (über 350°C) und Materialschichtdicken im Mikrometerbereich, wurde versucht, die den beiden Technologien gemeinsam zugrundeliegenden Herausforderungen in Forschung und Entwicklung zusammenzuführen und entsprechende Lösungskonzepte zu entwickeln. Daraus haben sich folgende Projektziele ergeben:

- (a) Die Erforschung alternativer Zell- und Moduldesigns für eine flexible Gestaltung der Solarzellenmodule, sowie die Überwindung der Diskrepanz zwischen Zellen- und Moduleffizienz,**
- (b) Die Entwicklung von lösungsbasierten Prozessen für transparente Elektroden,**
- (c) Die finale Prozessüberführung in einen vollständig kontinuierlichen Prozess,**
- (d) Die Entwicklung lösungsbasierter Cadmium-freier Pufferschichten, sowie**
- (e) Die Lebensdauererhöhung der Module.**

2.3 Einordnung in das Programm

flex!PV.at behandelt vorrangig folgenden Schwerpunkt:

- Themenfeld 2: Erneuerbare Energie mit dem Subschwerpunkt 2.2 Photovoltaik

Dieses Projekt beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung von energieeffizienten, lösungsmittelbasierenden Prozessen für die Produktion von flexibler Photovoltaik. Es wurden Konzepte und Lösungen bezüglich Umweltverträglichkeit, kosten-, energie- und materialsparender Prozessierung von Dünnschichtsolarzellen unter Berücksichtigung von Effizienz- und Lebensdauersteigerung, Flexibilität und Design erarbeitet.

Des Weiteren liefert es einen Beitrag zu *Themenfeld 1 Energieeffizienz und Energieeinsparungen mit dem Subschwerpunkt 1.1 Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe:*

Mit der Optimierung von bereits vorhandenen Prozessen durch entsprechende Auswahl von Materialien, Beschichtungsparameter und dem Einsatz von Niedertemperaturschritten konnten eine Reduzierung des Energieeinsatzes entlang der gesamten Prozesskette erreicht werden.

Ermöglicht wurde dies durch die hervorragende Zusammenarbeit der einzelnen Partner. Dadurch konnte Knowhow aus den unterschiedlichsten wissenschaftlichen Bereichen, wie PV, Physik, Chemie und Nanotechnologie gebündelt werden und der Forschungs- und Wirtschaftsstandort Österreich gestärkt werden.

2.4 Verwendete Methoden

Es wurde ein Arbeitsplan strukturiert nach den einzelnen Aspekten der Projektziele erstellt. Daraus ergaben sich, wie in Tabelle 1 fünf Arbeitspakete, von denen Arbeitspaket 1 die Managementbereiche und die Arbeitspakete 2 – 4 die wissenschaftliche Tätigkeit umfassten.

Tabelle 1: Übersicht Arbeitspakete

| AP Nr. | AP Titel |
|--------|--|
| 1 | Projektmanagement |
| 2 | Von der Zelle zum Modul Konzeptentwicklung und –anpassung |
| 3 | Material – Entwicklung, Anpassung und Evaluierung |
| 4 | Einzelprozessforschung |
| 5 | Einkapselung, Lebensdauer und Qualitätssicherung |

In der Anfangsphase wurde eine Evaluierung der geeignetsten Materialien, Prozesse und Konzepte hinsichtlich ihrer Anpassungsfähigkeit an das Ziel effiziente, kostengünstige und vollständig R2R-prozessierbare Photovoltaikmodule herzustellen, vorgenommen. Gleichzeitig mit der Konzeptentwicklung in AP 2 begannen damit auch erste Arbeiten in den

Arbeitspaketen 3 und 4, wobei in AP 3 die entsprechenden Materialien getestet und optimiert wurden, um in die in AP 4 vorgesehenen Beschichtungslösungen für die einzelnen Prozessschritte integriert werden zu können. Sämtliche Erkenntnisse daraus wurden in AP 2 an der Zelle sowie am Modul getestet und analysiert. In Arbeitspaket 4 wurden die Resultate von AP 2 und AP 3 gebündelt und mit der Einzelprozessforschung verbunden. Wichtig dafür waren Informationen über die Eigenschaften der einzelnen Schichten, wie Dicke, Rauigkeit, Morphologie der Solarzellen wie auch deren Wechselwirkung (Grenzflächenchemie, Diffusionsprozesse) untereinander. Diese Kenntnisse stammten unter anderem aus AP 5, in welchem die Solarzellen und Module charakterisiert und hinsichtlich Lebensdauer und Stabilität untersucht wurden. Darüber hinaus beschäftigten sich Arbeitspaket 2 und 4 mit der Erarbeitung alternativer Modulverschaltungen. Während in AP 2 verschiedene Möglichkeiten und Designs evaluiert und entwickelt wurden, beschäftigte sich AP 4 mit der Umsetzbarkeit dieser in einem kontinuierlich geführten Prozess mit den dafür benötigten Aufbringungsmethoden. In Arbeitspaket 5 wurden neben der Analyse der Qualität der Solarzellen und Module sowie ihrer Einkapselung auch eine Berechnung des CO₂-Fussabdruckes sowie eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt.

2.5 Aufbau der Arbeit

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, wurde das Projekt in 5 Arbeitspakete gegliedert, wobei sich die vier wissenschaftlichen Arbeitspakete (AP2 – AP5) aus einem integrierten Workflow mit einem Proben-, Material- und Wissensaustausch mit fachspezifischen Beiträgen zwischen den Projektpartnern zusammensetzten. Im Einzelnen setzen sich die Arbeiten der Arbeitspakete wie folgt zusammen:

In **Arbeitspaket 2** wurde ausgehend von einer Zusammenfassung und Dissemination von Literatur und Methoden mit Fokus auf alternative Polymere zum Einsatz in der aktiven Schicht, druckbaren Polymeren zur Umsetzung beliebiger Form- und Farbkonzepte, alternativen Einbringmethoden für Halbleiterpulver und neuartige Verschaltungskonzepte für Verringerung der Wirkungsgradverluste und flexibles Design eine Auswahl an möglichen Modulkonzepten für die jeweiligen Zelltechnologien getroffen. Diese Modulkonzepte wurden anschließend anhand ihrer Performance mittels Herstellung von Testmodulen evaluiert und die Ergebnisse in Bezug auf Zelltechnologie/Konzept korreliert.

Arbeitspaket 3 beschäftigte sich vor allem mit der Herstellung von geeigneten Beschichtungslösungen im chemischen Labor und der damit verbundenen Herstellung eigener Vorstufen durch chemische Synthese. Die darin entwickelten Beschichtungslösungen wurden bezüglich ihrer Prozessierbarkeit unter anderem mittels Rotationsbeschichtungsverfahren oder Filmziehen, sowie hinsichtlich ihres Auftrocknungs- und Umwandlungsverhaltens im Labor getestet. Dies diente als Vorversuch für die in AP 4 angesetzten Beschichtungsversuche

Anschließend wurden die einzelnen Schichten in Bezug auf die chemische Zusammensetzung, Phasenreinheit, Morphologie und Rauigkeit der Schichten mittels Röntgenbeugung (XRD), Transmissionselektronenmikroskopie (TEM), Rasterelektronenmikroskopie (SEM), Rasterkraftmikroskopie (AFM), optische Mikroskopie (OM) und Profilometer untersucht. Die Elektrodenmaterialien wurden darüber hinaus anhand ihrer Transparenz und Leitfähigkeit bewertet. Zu guter Letzt wurden die einzelnen Schichten in der Solarzelle mittels elektrischer Charakterisierung (Stromdichte-Spannungs-Kennlinie (IV-Kurve) und wellenlängenaufgelöster Messung des Kurzschlussstromes (IPCE)) zur Ermittlung der Solarzellenschlüsselparameter (Leerlaufspannung, Kurzschlussstrom, Füllfaktor und Effizienz; Externen Quantenausbeute) getestet.

In **Arbeitspaket 4** wurden die Beschichtungslösungen hinsichtlich Viskosität, Oberflächenspannung, thermische Eigenschaften (Thermogravimetrie (TGA)) und Stabilität (dynamische Lichtstreuung) analysiert. Die Aufbringung der verschiedenen Schichten auf Glas, sowie auf flexible Polymersubstrate wurde mittels verschiedener Beschichtungs- und Druckverfahren wie Schlitzdüsenbeschichtung und Tintenstrahldruck in einem kontinuierlich geführten Prozess durchgeführt. Die Charakterisierung der Schichten bezüglich Dicke, Rauheit, Homogenität und Phasentrennung wurde mit TEM, REM, AFM und Röntgenstreuungsmethoden durchgeführt. Die Curing- und Annealingprozesse wurden auf ihre Kompatibilität mit flexiblen Substraten (PEN-, PET-Folien) sowie ihrer R2R-Umsetzbarkeit untersucht und mit den bisher üblichen Temperprozessen hinsichtlich Zeitdauer, sowie benötigter Temperatur verglichen. Anschließend wurden zur morphologischen Analyse der Schichten TEM, SEM, AFM, OM und Profilometer, sowie photophysikalische Untersuchungen (Absorption, Photolumineszenz (PL) und PL-Quenching) durchgeführt. Die auf Glas- und Polymersubstraten mittels R2R-kompatibler Methoden gefertigten Solarzellen wurden elektrisch charakterisiert (IV-Kurven) und mit spektroskopischen Methoden (UV-Vis-Spektroskopie, Messung der Quantenausbeute) analysiert, um die Auswirkungen der einzelnen Beschichtungsmethoden auf die Solarzellenperformance zu untersuchen.

In **Arbeitspaket 5** wurde anhand der Zusammenfassung und Dissemination von Literatur und Methoden mit Fokus auf das Permeationsverhalten von polymeren Einkapselungsmaterialien und deren Delaminationsverhalten, die Alterungscharakterisierung von PV-Modulen und Materialien, sowie spezielle zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden eine Auswahl von geeigneten Polymerfolien (Einkapselung, Rückseitenfolien, etc.) für die jeweiligen Zelltechnologien getroffen. Mit den maßgeschneiderten Einkapselungsmaterialien wurden anschließend im Labormaßstab als auch mittels Rolle-zu-Rolle Testmodule hergestellt und hinsichtlich ihrer Modulperformance, Modul- und Materialalterung überprüft.

3 Inhaltliche Darstellung

Kontinuierliche Prozessführung mit R2R-überföhrbaren Einzelprozessen: Der Herstellungsprozess von crystalsol für flexible PV-Module gliedert sich in 8 getrennte Prozessschritte (siehe Abbildung 2). Im ersten Schritt wird eine Polymerschicht in definierter Dicke auf eine Trägerfolie aufgebracht. Darin wird die Z-Kontaktierung eingebettet (Schritte 1 - 3). Im Anschluss wird ein transparenter leitender Frontkontakt strukturiert aufgebracht (Schritt 4). Danach wird die Vorderseite der Zelle mit einer Schutzfolie versehen, um die mechanische Stabilität sicherzustellen (Schritt 5). Nach Entfernung der Trägerfolie werden die Halbleiterkristalle an der Rfickseite durch Schleifen freigelegt (Schritt 6), um sie in Schritt 7 mit dem Rfickkontakt zu kontaktieren. Im letzten Schritt wird die Rfickseite verkapselt. Aktuell werden die ersten 3 Prozessschritte wie in Abbildung 2 dargestellt in einem R2R-Produktionsverfahren realisiert. Die nachfolgenden Prozessschritte werden zurzeit schrittweise von einem Batchverfahren in ein R2R-Verfahren überföhrt. Der Herstellungsprozess für organische Photovoltaik ist wie in Abbildung 2 dargestellt schon für alle Prozessschritte mittels R2R-Verfahren durchföhbar. Jedoch ist der Unterschied in den Wirkungsgraden von Laborzellen und Modulen immer noch beträchtlich, was unter anderem auch auf Probleme bei der großflächigen Abscheidung der Absorberschicht zurfickzuführen ist.

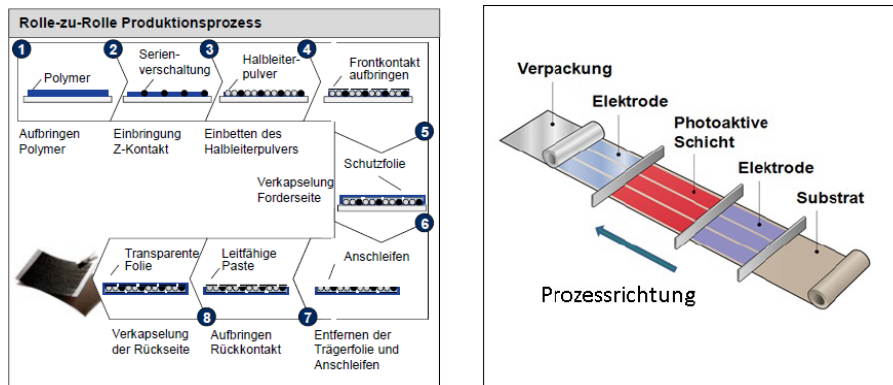


Abbildung 2: links: crystalsols R2R-Produktionsprozess; rechts: Herstellungsprozess für OPV

Lösungsbasierte transparente Elektroden: Als transparentes Elektrodenmaterial wird in der Dfünnschicht-PV-Technologie meist Indium-Zinn-Oxid (ITO) oder Aluminiumdotiertes Zinkoxid (AZO) durch Sputtern aufgebracht. Da Vakuumprozesse in modernen R2R-Produktionsprozessen jedoch Nachteile in Bezug auf Energieeffizienz, Skalierbarkeit und Kosten bringen, ist die Thematik, diese Vakuumprozesse durch lösungsbasierte Verfahren zu ersetzen, ein zentrales Forschungsthema in der Photovoltaik. Aus der Literatur sind schon einige Möglichkeiten transparente leitfähige Oxide (TCOs) aus Lösung herzustellen bekannt.²⁸ Ziel dieses Projektes war es, diese Methoden in R2R-Prozessen anwenden zu können. Weiters ist es wichtig auf seltene und somit teure Rohstoffe wie z.B. Indium zu verzichten, um die Kosten der PV-Module möglichst gering zu halten und damit Photovoltaik gegenüber konventionellen Methoden zur Stromerzeugung noch

konkurrenzfähiger zu machen. Daher wurde in *flex!PV.at* im Bereich der anorganischen Technologie an einem Indium-freien Absorbermaterial gearbeitet. Im Bereich der organischen Photovoltaik wird der Ersatz von ITO durch AZO, leitfähige Polymerschichten (PEDOT:PSS) und andere Indium-freie leitfähige transparente Schichten (z.B. Silber) vorangetrieben. Dadurch wird letztendlich ein kompletter kontinuierlicher lösungsbasierter Herstellungsprozess geschaffen.

Lösungsbasierte Zwischen- und Pufferschichten: Ein weiterer Schwerpunkt war die Entwicklung einer Cadmium- (Cd) freien Pufferschicht, die durch einen lösungsbasierten Prozess aufgebracht werden kann, um somit eine umweltfreundlichere Alternative zu dem herkömmlichen umweltschädlichen und nicht nachhaltig vertretbaren Schwermetall zu finden. Beispielsweise liegen die Wirkungsgrade der besten Cd-freien CIGS – Solarzellenmodule derzeit etwa 2% unter denen mit CdS-Pufferschicht (15,7% mit CdS, 13,5% Cd-frei)²⁹. Dies zeigt, dass die Herstellung von effizienten Cd-freien Solarzellen möglich ist. Im Rahmen des Projektes wurden diese Cd-freien Schichten für Kesterit-Solarzellen adaptiert und optimiert.

Alternative Zellkonzepte und Moduldesigns: Wie bereits erwähnt, weisen die im Projekt behandelten Technologien eine große Diskrepanz bezüglich ihrer Modul- und Zelleffizienz von 40-60% auf. Eine Möglichkeit diese Diskrepanz zu überwinden liegt in alternativen Zellkonzepten, indem der Verlust an aktiver Fläche und die Widerstände durch die serielle Verbindung von Zellen zum Modul gesenkt werden. Des Weiteren können mit diesen alternativen Designs die PV-Module flexibler gestaltet und somit die Akzeptanz durch die Verbraucher erhöht werden.

4 Ergebnisse

Wie schon oben angeführt, liegen den in *flex!PV.at* untersuchten Photovoltaiktechnologien folgende gemeinsame Herausforderungen zu Grunde:

- (a) **Die Erforschung alternativer Zell- und Moduldesigns für eine flexible Gestaltung der Solarzellenmodule, sowie die Überwindung der Diskrepanz zwischen Zellen- und Moduleffizienz,**
- (b) **Die Entwicklung von lösungsbasierten Prozessen für transparente Elektroden,**
- (c) **Die finale Prozessüberführung in einen vollständig kontinuierlichen Prozess,**
- (d) **Die Entwicklung lösungsbasierter Cadmium-freier Pufferschichten, sowie**
- (e) **Die Lebensdauererhöhung der Module.**

Die Realisierung dieser höchst anspruchsvollen Ziele gelang durch die in den Arbeitspaketen 2 bis 5 erarbeiteten Konzepte und Lösungen.

- (a) **Erforschung alternativer Zell- und Moduldesigns für eine flexible Gestaltung der Solarzellenmodule, sowie die Überwindung der Diskrepanz zwischen Zellen- und Moduleffizienz**

Ein Schwerpunkt war die Weiterentwicklung von flexiblen Solarzellen und Solarzellenmodulen hinsichtlich Verschaltung, Design und Flexibilität. Mit der Verwirklichung der monolithischen Verschaltung, die mit Hilfe eines abwechselnden Schichtaufbaus von Elektronen- und Lochtransporter (ETL bzw. HTL) in der organischen „bulk-heterojunction“-Solarzelle (siehe Abbildung 3) realisiert wurde, konnte der Effizienzverlust von den Einzelzellen zum Modul beträchtlich gesenkt werden.

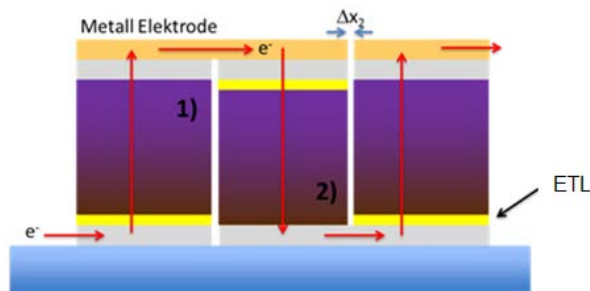


Abbildung 3: Vereinfachte Darstellung der monolithischen Verschaltung einer OPV

Die Ausbildung eines interpenetrierenden Netzwerkes aus Elektronenakzeptor- und Elektronendonormolekülen in der Aktivschicht (bulk-heterojunction) und der dadurch bedingten Ladungstrennung an der Phasengrenze hat es ermöglicht, die Funktionalität der Elektroden durch den Schichtaufbau zu bestimmen. So ist es möglich, die Polarität der Einzelzellen abwechselnd zu ändern (einmal ist die transparente Elektrode die Anode und einmal die Kathode), wodurch es zu einer Erhöhung des geometrischen Füllfaktors durch den verringerten Abstand zwischen den Einzelzellen kommt. Dadurch reduzieren sich die Verluste durch inaktive Flächen auf dem Solarmodul.

Es wurden hierzu mehrere Versuchsaufbauten hinsichtlich der einzelnen Schichten getestet und optimiert. Als Lochtransportschicht wurde bei dem konventionellen Aufbau, bei dem die transparente Elektrode die Anode ist, Poly(3,4-ethyldioxythiophen)-poly(styrensulfonat) (PEDOT:PSS) aufgrund seiner Austrittsarbeit ($\sim 5,2 \text{ eV}$)³⁰ gewählt. Ein weiterer Grund für PEDOT:PSS war die Tatsache, dass es hochleitfähige Modifikationen (hc-PEDOT:PSS) gibt, die gleichzeitig als Unterstützung der lösungsbasierenden gedruckten Silbergitterelektroden verwendet werden konnten (siehe unten).

Ein Konzept für die Elektronentransportschicht im konventionellen Design war die lösungsmittelbasierende Auftragung von Polyethylenimin (PEI). Während Solarzellen mit der PEI-Schicht unter der Absorberschicht (siehe nächsten Absatz) die erwarteten elektrischen Parameter lieferten, wurden für Solarzellen mit der PEI-Schicht über der photoaktiven Schicht immer deutlich geringere Wirkungsgrade gemessen. Die genaue Ursache dafür ist derzeit nicht bekannt. Allerdings wird vermutet, dass Defekte in der PEI-Schicht die Selektivität des Metallrückkontaktes beeinträchtigen. Hervorgerufen wird dies offenbar durch die Rauigkeit der darunterliegenden Schicht. Um hierfür eine Lösung zu finden wurde am LIOS intensiv an der Qualität der PEI-Beschichtung gearbeitet. Es wurden unterschiedliche Lösungsmittel, Prozesstemperaturen sowie PEI-Konzentrationen getestet. Die besten Resultate konnten mit einer PEI/PCBM-Mischung in einem Butanol/Anisol-Gemisch erzielt werden.

Abbildung 4 zeigt eine IV-Kurve einer organischen Solarzelle mit der PEI/PCBM-Zwischenschicht und den dazugehörigen Parametern.

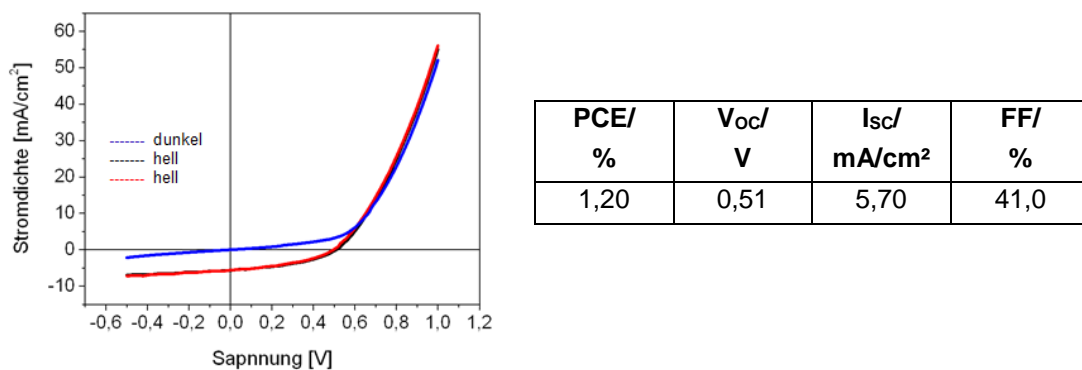


Abbildung 4: IV-Kurve plus Parameter einer organischen Solarzelle mit PEI/PCBM hergestellt am LIOS

Für den invertierten Aufbau – hier ist die transparente Elektrode die Kathode – wurde als Lochtransportschicht neben Molybdänoxid (MoO_x), welches als Referenz diente, auch eine wasserfreie PEDOT:PSS-Modifikation am Fraunhofer IAP (siehe unten) sowie Wolframoxid (WO_x) am NTC-Weiz verwendet. Letzteres wurde mit Hilfe des lösungsbasierenden Spin-Coating-Verfahrens aufgebracht. Die WO_x -Precursurlösung wurde aufgrund der benötigten Schichtdicke von wenigen nm mit Lösungsmittel verdünnt, wobei hier auf die Umweltverträglichkeit geachtet wurde. Die besten Ergebnisse konnten mit einer 1:20-Verdünnung in Ethanol erzielt werden. Als Elektronentransportschicht im invertierten Aufbau wurde ebenfalls PEI gewählt, aufgrund seiner Eigenschaft, die Austrittsarbeit von darunterliegenden Schichten zu reduzieren.³¹⁻³³ Zusätzlich zu dieser unumgänglichen

Eigenschaft kann man als Zusatz oder auch als Lösungsmittel Wasser³² verwenden, was hinsichtlich Umweltverträglichkeit und Kostenreduzierung entscheidend für dieses Material war. So konnten organische Solarzellen und Module hergestellt werden, bei denen alle benötigten Schichten, bis auf die Rückelektrode, durch lösungsmittelbasierende, kostengünstige Prozesse aufgebracht wurden.

Nachstehend sind die Ergebnisse des Modulaufbaus mit der monolithischen Verschaltung einer konventionellen (ITO - PEDOT:PSS - P3HT/PCBM - Al) und einer invertierten (ITO - PEDOT:PSS - PEI - P3HT/PCBM - MoO_x - Ag) Solarzelle gezeigt (siehe Abbildung 5). Auf Indium-Zinnoxid (ITO) folgte eine PEDOT:PSS-Schicht, die durch eine schmale Linie getrennt ist, um den Ladungsträgerfluss zu gewährleisten. Um jetzt die Funktionalität der Elektroden zu beeinflussen, wurde auf eine PEDOT:PSS-Seite Polyethylenimin aufgebracht, wodurch sich die Austrittsarbeit von PEDOT:PSS verringerte und es als Elektronentransportschicht und nicht mehr als Lochtransporter fungierte. Als photoaktives Material diente Poly(3-hexylthiophen-2,5-diyl) (P3HT) als Elektronendonator und [6,6]-Phenyl-C61-Buttersäuremethylester (PCBM) als Elektronenakzeptor. P3HT ist ein Standardmaterial, welches in Kombination mit PCBM sehr gut erforscht ist und daher optimal als Referenz geeignet ist.

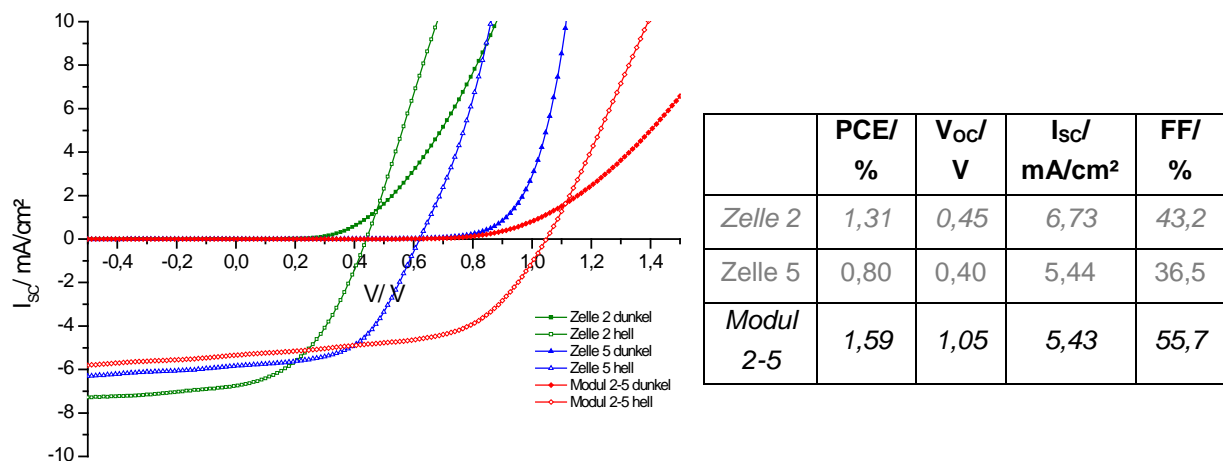


Abbildung 5: IV-Charakteristik der Einzelzellen sowie des Moduls hergestellt am NTC-Weiz

Mit diesem Aufbau konnte ein Effizienzverlust von unter 40% erreicht werden. Tabelle 2 zeigt die bisherigen Erfolge durch das neue Verschaltungskonzept.

Tabelle 2: Vergleich Einzelzellen und Modul mit Wirkungsgradverlust unter 40%

| PCE_{EINZELZELLEN}/ % | PCE_{MODUL}/ % | Verschaltungsverlust/ % |
|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 2,20 | 1,63 | 35,0 |
| 2,11 | 1,59 | 32,7 |
| 2,13 | 1,57 | 35,7 |
| 1,45 | 1,06 | 36,8 |

Um den Wirkungsgradverlust noch weiter zu senken, ist es unbedingt nötig, die vorhandenen Grenzflächendefekte genauestens zu eruieren und die möglichen Ursachen dafür restlos zu klären. Nur so ist es möglich, Zellen mit gleicher Stromstärke zu verbinden und die Vorteile der monolithischen Verschaltung bestmöglich auszuschöpfen.

Die crystalsol CZTS-PV-Membrane ist keine klassische Dünnschichtsolarzelle. Die besondere Topologie der eingebetteten Kristalle erfordert eine angepasste Lösung zur Zellverschaltung. Bedingt durch die Kristallgröße von etwa 60 μm müssen bei der Verbindung von Frontkontakt zu Rückkontakt relativ große Distanzen überbrückt werden. Im Rahmen von *flex!PV.at* wurde eine sehr effektive Verschaltung entwickelt, die direkt in das Polymer eingearbeitet wurde. Auf der Rückseite erfolgte die Kontaktierung mit einer gedruckten Doppelschicht, die bereits strukturiert abgeschieden wurde. Durch eine Weiterentwicklung des Konzepts konnte das Strom- Spannungsverhältnis flexibel angepasst werden. Mit diesem Konzept konnte ein geometrischer Füllfaktor von 95% erreicht werden. Zwar erhöhte sich dadurch der Druckaufwand für die Zellverbindung und Isolierung, zugleich verbesserte sich aber die Leistungsdichte bei größtmöglicher Flexibilität im Moduldesign. In Abbildung 6 ist zu sehen, wie sich das Layout auf das Strom/Spannungsverhältnis auswirkt.

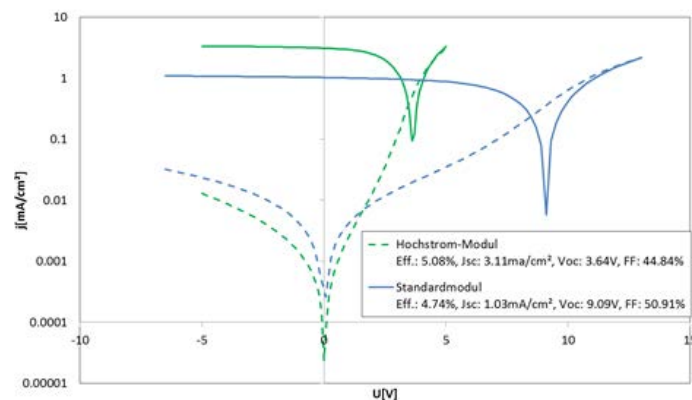


Abbildung 6: IV-Kurven mit und ohne neuentwickelte Verschaltung

(b) Entwicklung von lösungsbasierten Prozessen für transparente Elektroden

Ein weiterer Fokus in *flex!PV.at* war die lösungsmittelbasierende Herstellung von transparenten leitfähigen Elektrodenmaterialien um das standardmäßig verwendete ITO, welches mittels kosten- und energieintensiven Produktionsprozessen hergestellt wird, zu ersetzen. Hierzu wurden zwei Ansätze gewählt. Einerseits wurden Silbergitterelektroden durch materialsparende Druckprozesse hergestellt, andererseits wurden transparente elektrisch leitfähige Oxide mit Hilfe des sehr kostengünstigen Verfahrens der chemischen Badabscheidung (CBD) produziert.

Für die gedruckten Silbergitterelektroden wurde eine Linienbreite der Gitter im Bereich von unter 150 μm und eine Linienhöhe von nicht mehr als 200 nm benötigt. Um solch dünne Linien mittels Inkjet-Druck herzustellen, ist es notwendig das Zusammenspiel von Substrat, Tinte und Druckkopf bestens zu verstehen. Wichtige Faktoren hierfür sind neben den

chemischen Eigenschaften der Substratoberfläche, die Tintenparameter (z.B. Viskosität, Funktionalität, Oberflächenspannung) und die Druckerkenngößen, wie Druckgeschwindigkeit, Anzahl der Nozzles, Auflösung und Drucktemperatur.

Die Silbergitter wurden am NTC-Weiz und am Fraunhofer IAP (siehe unten) gedruckt. Am NTC-Weiz wurde die in Abbildung 7 dargestellte Gitterstruktur gewählt und realisiert.

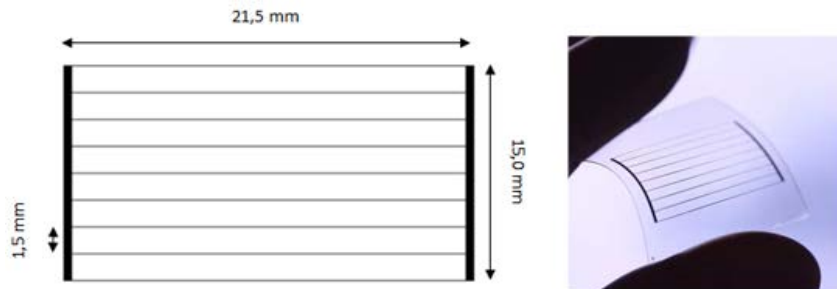


Abbildung 7: links: Gitterelektrodenstruktur am NTC-Weiz, rechts: gedrucktes Gitter auf flexiblem Substrat

Die Trocknung der Gitter ist entscheidend für ihre Leitfähigkeit. Sie erfolgte im Niedrigvakuum bei 150°C, womit Widerstände von 100 Ω auf Glassubstraten und 350 Ω auf flexiblen Substraten erreicht wurden. Um die Leitfähigkeit dieser Gitterelektroden zu erhöhen, wurde, wie schon in Punkt (a) erwähnt, hochleitfähiges PEDOT:PSS gewählt. Es wurde hierzu eine 1:1 Mischung von Clevios™ PH 1000 (hc-PEDOT:PSS) und Clevios™ F CE von Heraeus verwendet. Mit diesem innovativem Elektrodenkonzept konnte gezeigt werden, dass für organische Solarzellen nicht länger das kosten- und energieintensive ITO verwendet werden muss. In den nachstehenden Abbildungen (Abbildung 8 und Abbildung 9) sind die IV-Kurven mit den dazugehörigen Parametern von konventionellen und invertierten Solarzellen mit den gedruckten Silbergittern als transparente Elektroden abgebildet.

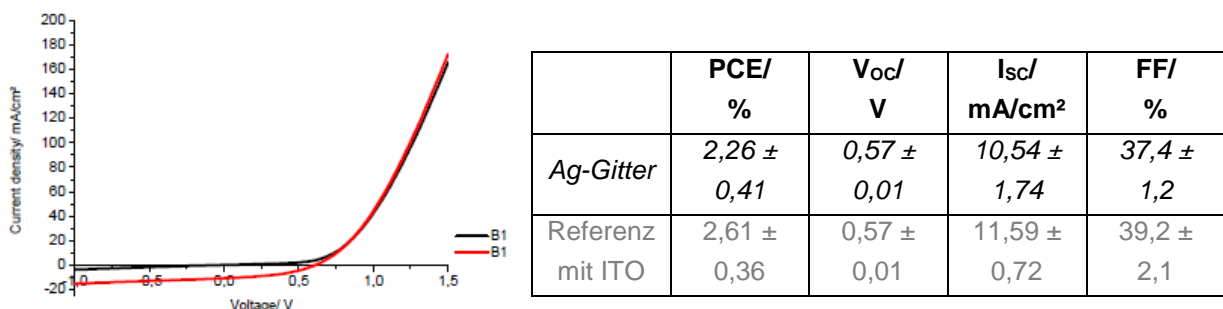
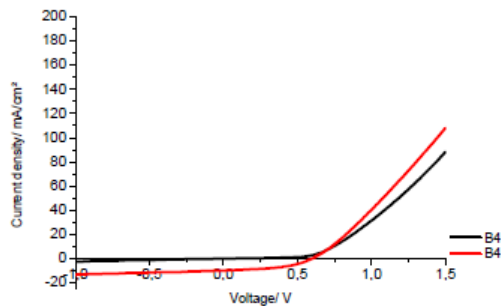


Abbildung 8: links: IV-Kurve einer konventionellen organischen Solarzelle auf einem flexiblen Substrat; rechts: durchschnittliche Solarzellenparameter von konventionellen organischen Solarzellen auf flexiblen Substraten hergestellt am NTC-Weiz

e!Mission.at - 1. Ausschreibung

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



| | PCE/ % | V _{oc} / V | I _{sc} / mA/cm ² | FF/ % |
|---------------------|----------------|------------------------|---|---------------|
| Ag-Gitter | 2,73 ± 0,19 | 0,60 ± 0,00 | 9,77 ± 0,33 | 47,0 ± 2,4 |
| Referenz mit ITO | 2,72 ± 0,11 | 0,60 ± 0,00 | 8,07 ± 0,42 | 56,1 ± 3,0 |

Abbildung 9: links: IV-Kurve einer invertierten organischen Solarzelle auf einem flexiblen Substrat; rechts: durchschnittliche Solarzellenparameter von invertierten organischen Solarzellen auf flexiblen Substraten hergestellt am NTC-Weiz

Die zweite, in diesem Projekt gewählte und am AIT umgesetzte Option für einen ITO-Ersatz war die Herstellung von transparenten leitfähigen Oxiden mittels chemischer Badabscheidung. Diese eignet sich sehr gut für die Aufbringung von dünnen Schichten. Zudem ist sie ein sehr kostengünstiges Verfahren, welches leicht vom Labormaßstab auf industrielle Anwendungen hochskaliert werden kann. Die so hergestellten transparenten Elektroden wurden in diesem Projekt für die CZTS-Technologie verwendet. Die zur Herstellung von Aluminium-, Gallium- und Indium-dotierten Zinkoxid-(ZnO) Filmen angewandte Chemie basiert auf der retrograden Löslichkeit von ZnO in einer Ammoniak-Lösung, wobei die Dotierstoffe in Form von Salzen eingebracht wurden. Die Prozesstemperatur überschreitet dabei nicht 90°C. Qualitativ hochwertige Schichten wurden auf Glas und auf CZTS/CdS Körnern aufgebracht (siehe Abbildung 10), mit einer Transmission von über 85% im sichtbaren Bereich und einem niedrigen Schichtwiderstand von 40 Ω. Die Resultate ermöglichten den Ersatz von gesputterten AZO-Schichten in der crystalsol-Technologie mit einer günstigen lösungsbasierten Alternative.

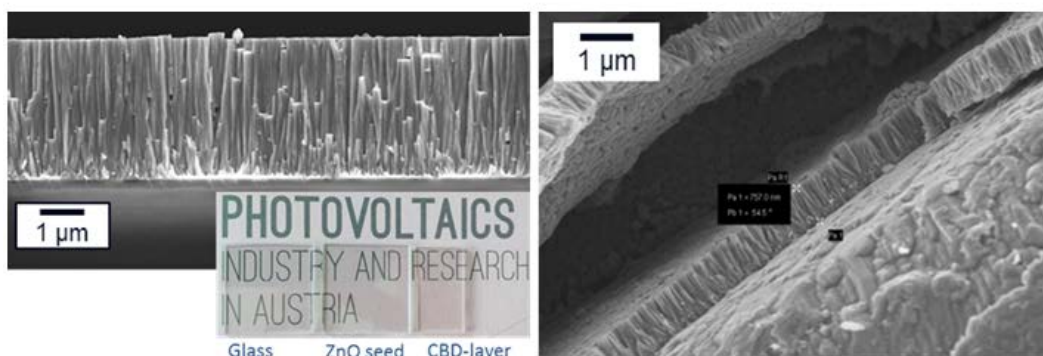


Abbildung 10: Al:ZnO-Schichten hergestellt am AIT mit chemischer Badabscheidung auf Glas und auf CZTS/CdS-Körnern von crystalsol

Zusätzlich wurden am AIT gesputterte transparente leitfähige Elektroden (TCO) mit einem TCO/UTM/TCO-Schichtaufbau hergestellt, wobei UTM eine ultradünne Metallschicht aus Gold (Au), Silber (Ag), Kupfer (Cu), Aluminium (Al) oder Nickel (Ni) ist. Die Schichtdicke des

Metalls betrug dabei weniger als 10 nm, was eine hohe Transparenz bei gleichzeitig hoher Leitfähigkeit ermöglichte (siehe Abbildung 11). Die Gesamtschichtdicke der Struktur war ~100 nm, wobei eine hohe Robustheit gegenüber mechanischer Biegung aufgrund der Duktilität des Metalls gegeben ist. AZO/AU/AZO-Elektroden auf einer Kunststoffolie (PET) zeigten eine Figure-of-Merit vergleichbar mit der von ITO und überdies auch eine außergewöhnliche Stabilität des Widerstandes gegenüber mehrfacher Biegung. Des Weiteren ermöglichte der Einsatz einer TCO mit hoher Austrittsarbeit, wie z.B. Nickeloxid (NiO), die Anwendung der Elektrode als Kathode oder als Anode.

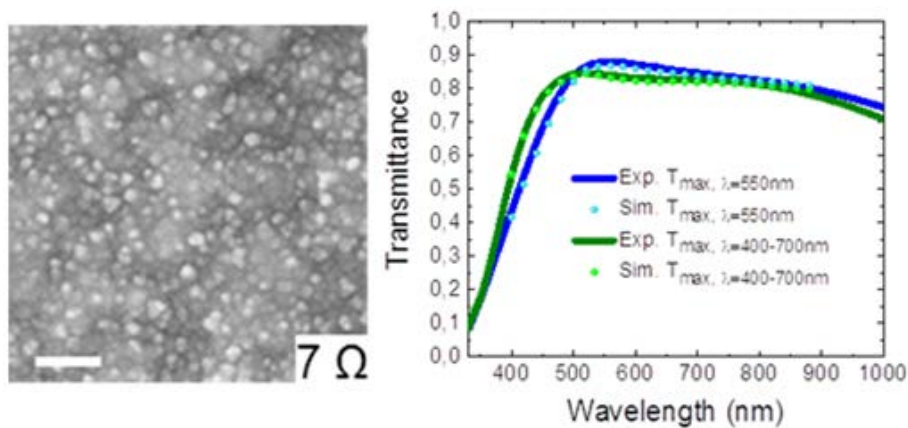


Abbildung 11: links: AFM-Aufnahme der TCO/Metall/TCO-Elektrode mit 7 Ω Flächenwiderstand; rechts: experimentelle und simulierte Transmissionspektren

(c) Finale Prozessüberführung in einen vollständig kontinuierlichen Prozess

Die organischen „bulk-heterojunction“-Solarzellenmodule wurden schlussendlich bei Fraunhofer IAP in einer kontinuierlich geführten Laboranlage prozessiert. Zu diesem Zweck wurden aus den Vorarbeiten zur Prozessierung der einzelnen Schichten die Parameter ausgewählt. Hierzu wurde zunächst der Device-Aufbau auf kleinen Substraten (50 x 50 mm) optimiert. Im nächsten Schritt wurde der Aufbau der gleichen Layouts auf eine Substratgröße von 150 x 150 mm übertragen. Das endgültige Layout wurde in Absprache mit den Kooperationspartnern LIOS und NTC-Weiz festgelegt und ist in Abbildung 12 dargestellt.

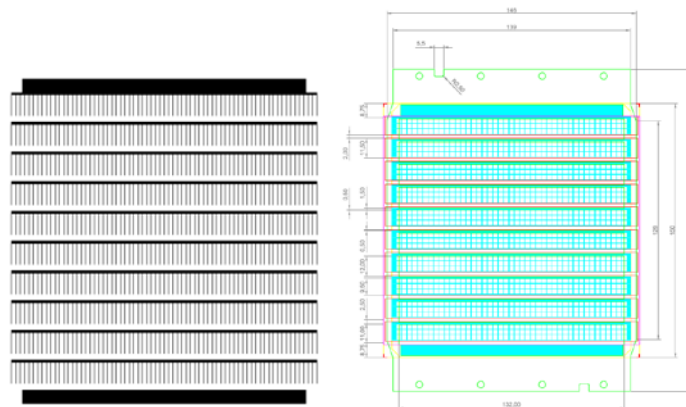


Abbildung 12: links: Layout für die am Fraunhofer IAP gedruckten Silbergitter ; rechts: Layout für die am Fraunhofer IAP gedruckten Solarzellen

Zunächst erfolgte die Prozessierung auf Glassubstraten, da die sheet-to-sheet- (S2S) Pilotanlage auf die Prozessierung fester Substrate ausgelegt ist. Dies betraf insbesondere den Substrattransport mit einem Handling-Roboter sowie die Prozessierung mittels Schlitzdüse. Letztere ist auf eine hohe Oberflächenhomogenität der Substrate angewiesen, die bei flexiblen Substraten nicht gewährleistet ist. Daher wurden die flexiblen Substrate (PET- und PEN-Folien von DuPont Teijin Films™, welche mit einem speziellen Klebstoff versehen sind) auf Glas fixiert. Der Klebstoff ist so temperaturstabil, dass alle Prozessschritte bei erhöhten Temperaturen durchführbar sind. Nach Beendigung aller Prozessschritte einschließlich der Verkapselung konnte das flexible Bauelement einfach vom Glasträger getrennt werden.

Der Druck des Silbergitters erfolgte mittels Inkjet-Druck. Die Tinte wurde bei maximal 150°C für Glas bzw. 120°C für PET für 15 Minuten gesintert. Im nächsten Schritt wurde PEDOT:PSS mittels Schlitzdüsendruck aufgetragen. Die angestrebte Schichtdicke beträgt ca. 120-180 nm. Das Trocknen und Tempern der PEDOT:PSS-Schicht erfolgte bei 130°C unter Vakuum für 15 Minuten. Zur Auftragung des PEI wurde sowohl der Inkjet-Druck als auch der Schlitzdüsendruck eingesetzt, die Trocknung erfolgte bei 150°C respektive 120°C für 10 Minuten. P3HT/PCBM wurde wieder mittels Schlitzdüse aufgebracht. Die Trocknung und das Tempern erfolgten bei 130°C für 15 Minuten. Als HTL-Schicht im invertierten Aufbau wurde Clevios™ HTL-Solar von Heraeus mittels Schlitzdüsendruck aufgebracht, alternativ wurde eine MoO_x-Schicht mittels Aufdampfen hergestellt, um die Leistungsfähigkeit der alternativen HTL-Materialien zu überprüfen, insbesondere im Hinblick auf die Lebensdauer. Die Trocknung der Top-PEDOT:PSS-Schicht erfolgte ebenfalls bei 130°C für 15 Minuten. Als Top-Elektrode wurde Silber mittels Inkjet-Druck aufgebracht und mit gedampften Silberschichten verglichen. Für die Herstellung von Modulen mit monolithischer Verschaltung wurden alle Schichten mittels Inkjet-Druck hergestellt, da hierzu jede zweite Zelle invertiert bzw. konventionell aufgebaut ist, was von der Prozessführung mittels Inkjet-Druck einfacher einzurichten war. Mit dieser Prozessierung konnten Solarzellenmodule (siehe Abbildung 13) mit einer Effizienz von 3,17% und einem Füllfaktor von über 61% hergestellt werden, V_{OC} und I_{SC} lagen bei 7,91 V respektive 0,067 A (bezogen auf die aktive Fläche).

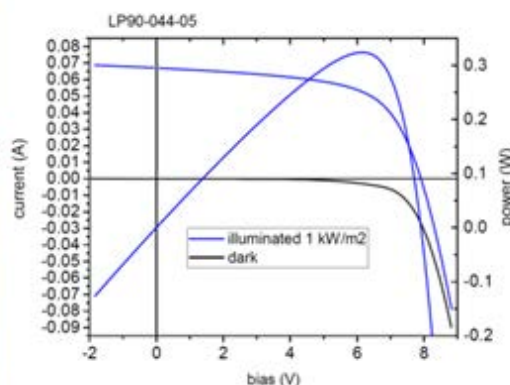
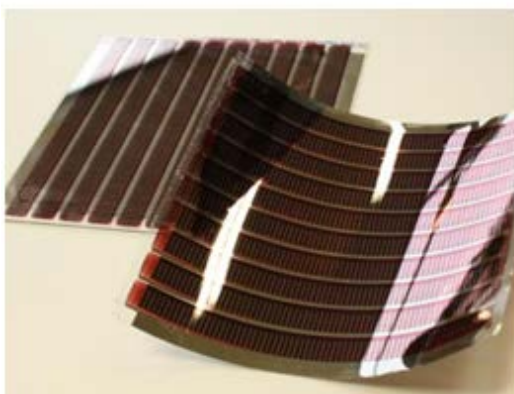


Abbildung 13: links: Solarmodule hergestellt mittels S2S-Anlage am Fraunhofer IAP; rechts: IV-Charakteristik eines OPV-Moduls auf Glas, charakterisiert am AIT

(d) Entwicklung lösungsbasierter Cadmium-freier Pufferschichten

Ein wichtiger Punkt für das Konzept von umweltfreundlichen Kesterit-Solarzellen ist die Entwicklung von Cd-freien Pufferschichten. CZTS-Dünnschichtsolarzellen enthalten in der Regel eine Cadmiumsulfidpufferschicht, bei der es sich um eine n-Halbleiterschicht handelt und die für den Aufbau eines p-n-Überganges in der Solarzelle essentiell ist. Diese sind aufgrund des Schwermetalls Cadmium allerdings umweltschädlich und somit nicht nachhaltig vertretbar. Das Ziel in diesem Projekt war daher eine umweltfreundlichere und lösungsbasierte Alternative zu den herkömmlichen CdS-Schichten zu finden. Hierfür wurden vor allem Indiumsulfid- (In_2S_3 ; $(\text{In}_x(\text{OH})_y\text{S}_z)$) und Zinksulfid- (ZnS ($\text{Zn}(\text{O},\text{OH})\text{S}$)) Pufferschichten durch das kostengünstigen Verfahren der CBD bei relativ niedrigen Temperaturen hergestellt. Eine gezielte Bandanpassung von In_2S_3 und ZnS zur CZTS-Absorberschicht, die für die Optimierung hinsichtlich guter Zelleffizienzen eine wesentliche Rolle spielt, konnte durch den Einbau von Sauerstoffatomen in die Pufferschichten bzw. durch die Variation der Stöchiometrie der Schichten erreicht werden. Durch die Variation von Abscheidungsparametern im CBD-Prozess (Temperatur, pH-Wert, Abscheidungszeit, Konzentrationen, Metallsalze, Schwefelquelle und Komplexierungsmittel) konnte eine gezielte Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Pufferschichten und somit der Bandlückenenergie erzielt werden. Des Weiteren konnte durch die Dotierung der $\text{In}_x(\text{OH})_y\text{S}_z$ Schichten mit Sn^{4+} und der $\text{Zn}(\text{O},\text{OH})\text{S}$ Schichten mit In^{3+} eine Verbesserung der Leitfähigkeit und eine Veränderung der Bandlücke erreicht werden. Die so am ICTM und am AIT hergestellten Cadmium-freien Schichten wurden bei den crystalsol-Solarzellen eingesetzt. In Versuchsreihen mit $\text{In}_x(\text{OH})_y\text{S}_z$ -Schichten mit unterschiedlichen Sn^{4+} -Dotierungsgehalten konnte die Effizienz der Referenzzelle bisher nicht übertroffen werden, aber vergleichbare Effizienzen (95% der Referenz) erzielt werden.

(e) Lebensdauererhöhung

Hierzu wurde das Verhalten der Solarzellen bei verschiedenen Szenarien wie z.B. trockene Wärme und feuchte Wärme untersucht. Ein Beispiel dafür ist die feuchte Wärmeprüfung (85% relative Feuchtigkeit und 85°C) von verschiedenen Kantendichtungsmaterialien für die CZTS-Module, um das Eindringen von Wasserdampf in das Modul zu testen. Es zeigte sich, dass nach über 1000 Stunden sowohl mit dem „double butyl edge“-Kantendichtungsmaterial als auch dem „single butyl edge“-Material die Effizienz der Kesterit-Dünnschichtsolarzellen um weniger als 20% sinkt. Die Lebensdauer konnte also mit der richtigen Wahl der Dichtungsmaterialien deutlich verbessert werden.

Zudem wurde auch die Stabilität von am Fraunhofer IAP hergestellten Solarzellen mit den Front- und Rückseitenverkapselungen von ISOVOLTAIC unter Realbedingungen getestet. Abbildung 14 zeigt die Beständigkeit der Solarzellen sowie die zu diesem Zeitpunkt herrschenden Wetterbedingungen.

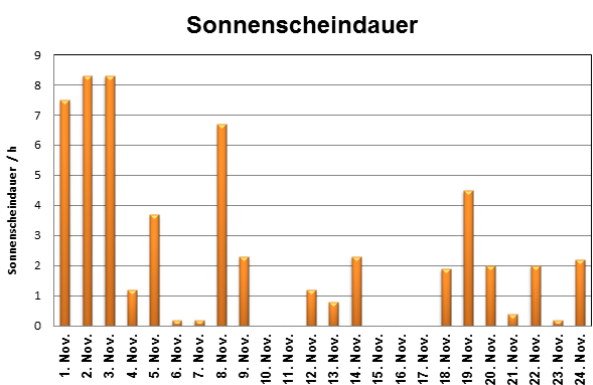
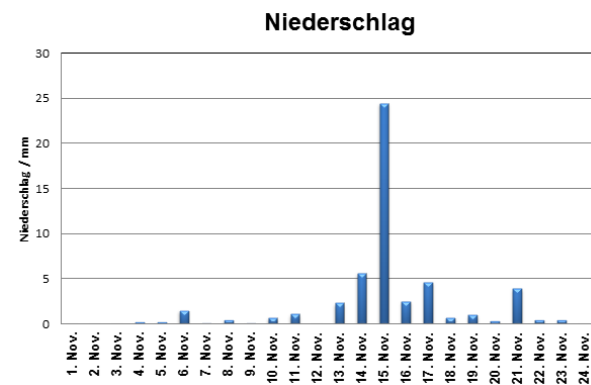
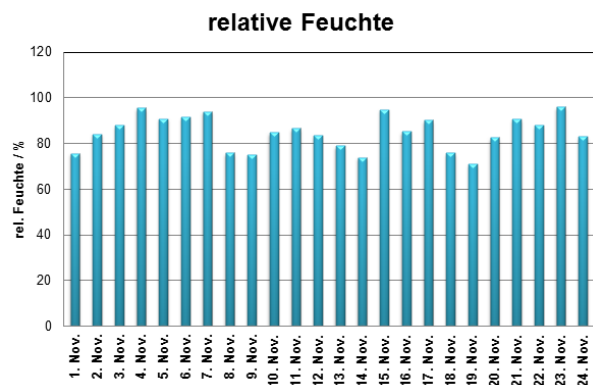
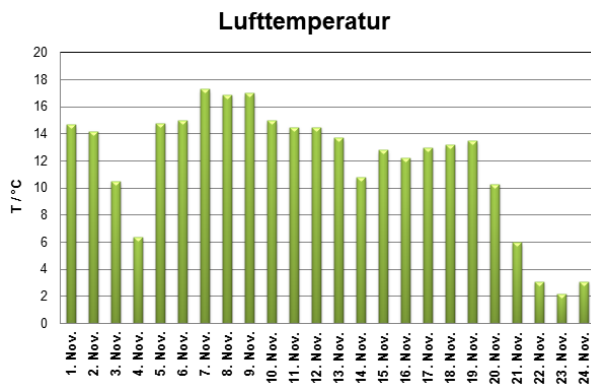
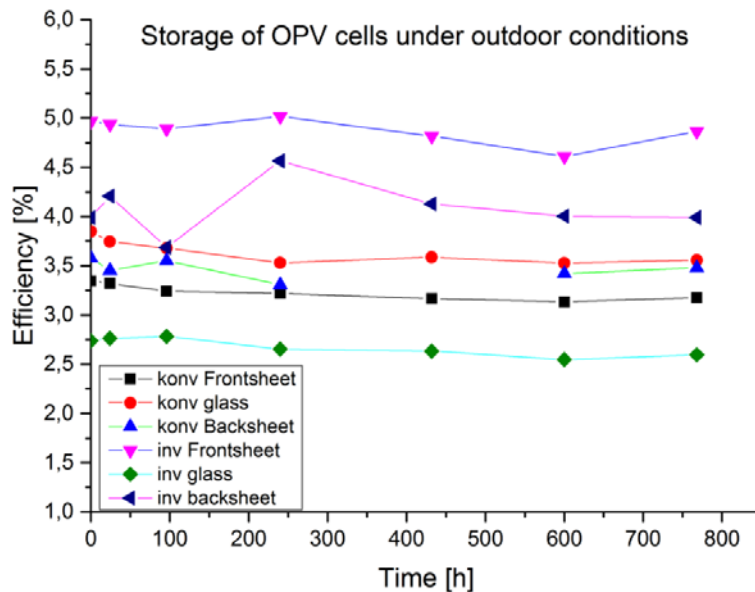


Abbildung 14: oben: Stabilität von organischen Solarzellen hergestellt am Fraunhofer IAP; unten: herrschende Wetterbedingungen

Entscheidend für die Lebensdauererhöhung der Module ist auch eine geeignete Einkapselung. Hierfür wurden basierend auf den im Anfangsstadium des Projektes angefertigten Anforderungskatalog und nach Evaluierung erster Laborhandmuster entsprechende und an die, in diesem Projekt entwickelten, Zelltechnologien angepasste Einkapselungsmaterialien bei ISOVOLTAIC hergestellt. Des Weiteren wurden geeignete Prozessparameter für die Lamination mit einer Doppelbandpresse (Hymmen), einem Standardindustrielaminator (ISOVOLTAIC) und der Laminationsvorrichtung bei crystalsol

ermittelt. Mit den im Rahmen des Projektes entwickelten und optimierten Frontsheet-, Encapsulant- und Backsheetmaterialien wurden verschiedene Alterungstests entsprechend den zuvor festgelegten Prüfbedingungen durchgeführt. Mit den Einkapselungsmaterialien konnten die im Anforderungskatalog definierten Eigenschaften und Ziele erreicht werden. Darüber hinaus wurden Module bestehend aus crystalsol-Zellen und den entwickelten Einkapselungsmaterialien über 1500 Stunden im Xenon und UV-Test untersucht, wobei keine Veränderungen festgestellt werden konnten.

5 Ausblick

Die in *flex!PV.at* erzielten Ergebnisse waren trotz der äußerst ambitionierten Ziele sehr beeindruckend. Mit der Erforschung alternativer Zell- und Moduldesigns für die flexible Gestaltung der Solarzellenmodule, die Entwicklung von lösungsprozessierbaren transparenten Elektroden sowie Cadmium-freien Pufferschichten, Konzepte zur Lebensdauererhöhung und schlussendlich die finale Prozessüberführung in eine vollständig kontinuierliche Fertigung konnten sowohl im Bereich der Kesterit- als auch der organischen Solarzellen sehr gute Fortschritte erreicht werden.

Durch die Encapsulant-Entwicklung und die Entwicklung der Beschichtung für Backsheets im Laufe des Projektes *flex!PV.at* wurden wichtige Grundsteine für weitere Entwicklungsprojekte bei ISOVOLTAIC gelegt.

Im Rahmen von *flex!PV.at* wurden wichtige Meilensteine erreicht. Besondere wirtschaftliche Relevanz für *crystalsol* hat die Entwicklung alternativer Pufferschichten, die vielversprechenden Ergebnisse mit $\text{In}_x(\text{OH})_y\text{S}_z$ -Pufferschichten zeigen einen Weg zu CdS-freien *crystalsol* Modulen auf. Nicht weniger relevant sind die guten Ergebnisse mit lösungsbasierten Frontkontakten, welche eine Produktion ganz ohne Vakuumprozess ermöglichen. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen werden die Forschungsaktivitäten intensiviert um die Prozesse, die Module und Zellfertigung bei *crystalsol* zu integrieren.

Aufbauend auf den hier erzielten Erfolgen wird sich das Nachfolgeprojekt **flex!PV_2.0** einerseits mit der Effizienzverbesserung von schwermetallfreien Kesteritzellen und –modulen beschäftigen und andererseits sollen die gewonnenen Erkenntnisse auf die derzeit sehr erfolgreiche Perowskit-PV-Technologie übertragen werden. Es wird hier wieder auf umweltverträgliche Materialien als auch auf kosten- und energieeffiziente Prozesse geachtet. Mit der Weiterentwicklung der von *crystalsol* konzipierten PV-Folien kann nicht nur der Durchsatz erhöht werden, sondern gleichzeitig auch die Produktionskosten aufgrund des schon heute größtenteils in die Druckanlage integrierten Herstellungsprozesses gesenkt werden. Herzstück ist hierbei die lichtabsorbierende Monokernmembran bestehend aus CZTS-Kristallen, die mit Cadmiumsulfid beschichtet sind, wobei hier vor allem die Forschung im Bereich der Cadmium-freien Pufferschichten intensiviert wird. Des Weiteren wird die Entwicklung innovativer Elektrodenmaterialien – zum einen die lösungsprozessierten, zum anderen ultradünne Metallschichten mit transparenten leitfähigen Oxiden – forciert. Darüber hinaus wird ein Schwerpunkt sein, die Erfolge von *flex!PV.at* auf Perowskitsolarzellen umzuwandeln. Herausforderungen hier sind die Entwicklung von Niedertemperaturprozessen für Elektronentransportschichten, Stabilitätsverbesserungen des Absorbers, erstens durch neue Synthesewege und zweitens durch Passivierungsschichten. Hauptziele sind hier die vollständige R2R-Prozessierung von Perowskit-PV-Modulen und die Entwicklung von Perowskit-Monokern-Solarzellen, um die Materialherstellung und Kristallisation von der Modulherstellung zu trennen.

6 Literaturverzeichnis

- 1) Konarka Press Release, 28.2.1012,
http://www.konarka.com/index.php/site/pressreleasedetail/konarka_technologies_advances_award_winning_power_plastic_solar_cell_effici (Zugriff am 24.8.2012)
- 2) Z. He, C. Zhong, S. Su, M. Xu, H. Wu, Y. Cao, Nature Photon., 2012,
doi:10.1038/nphoton.2012.190
- 3) T.K. Todorov, J. Tang, S. Bag, O. Gunawan, T. Gokmen, Y. Zhu, D. B. Mitzi, Adv. Energy Mater. 2012, doi:10.1002/aenm.201200348
- 4) Dennler, G.; Scharber, M.C.; Brabec, C.J. Adv. Mater. 2009, 21, 1323-1338
- 5) Thompson, B.C.; Frechet, J.M.J. Angew. Chem. Int. Ed. 2008, 47, 58-77
- 6) Krebs, C.F.; Jorgensen, M.; Norman, K.; Hagemann, O.; Alstrup, J.; Nielsen, T. D.; Fyenbo, J.; Larsen, K.; Kristensen, J. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 2009, 93, 422-441.
- 7) Krebs, F.C.; Gevorgyan, S.A.; Alstrup, J. J. Mater. Chem. 2009, 19, 5442-5451.
- 8) Krebs, F.C.; Sol. Energy Mater. Sol. Cells 2009, 93, 394-412.
- 9) Krebs, F.C.; Sol. Energy Mater. Sol. Cells 2009, 93, 465-475.
- 10) Krebs, F.C.; Tromholt, T.; Jorgensen, M. Nanoscale, 2010, 2(6), 873-886.
- 11) Jacobson, M.Z. Energy Environ. Sci. 2009, 2, 148-173
- 12) K. Ito and T. Nakazaw: "Electrical and Optical Properties of Stannite-Type Quaternary Semiconductor Thin Films", Jpn. J. Appl. Phys. 27, 2094-2097, (1988).
- 13) H. Katagiri, K. Jimbo, W. S. Maw, K. Oishi, and M. Yamazaki, H. Araki, and A. Takeuchi: "Development of CZTS-based thin film solar cells", Thin Solid Films 517, 2455-2460, (2009).
- 14) K. Ito and T. Nakazaw: "Electrical and Optical Properties of Stannite-Type Quaternary Semiconductor Thin Films", Jpn. J. Appl. Phys. 27, 2094-2097, (1988)
- 15) T. M. Friedlmeier, N. Wieser, T. Walter, H. Dittrich, H.-W. Schock: "CZTS thin films by thermal evaporation", Proceedings of the 14th European Conference of Photovoltaic Science and Engineering, Bedford, 1242, (1997).
- 16) S. Schorr, H.-J. Hoebler, and M. Tovar: "A neutron diffraction study of the stannite-kesterite solid solution series", Eur. Journal of Mineralogy 19, 65-75, (2007).
- 17) K. Ito and T. Nakazaw: "Electrical and Optical Properties of Stannite-Type Quaternary Semiconductor Thin Films", Jpn. J. Appl. Phys. 27, 2094-2097, (1988).
- 18) H. Katagiri: "Cu₂ZnSnS₄ thin film solar cells", Thin Solid Films 480-481, 426-432, (2005).

- 19) H. Katagiri, N. Ishigaki, T. Ishida, and K. Saito: "Characterization of Cu₂ZnSnS₄ Thin Films Prepared by Vapor Phase Sulfurization", Jpn. J. Appl. Phys. 40, 500-504, (2001).
- 20) H. Katagiri, N. Sasaguchi, S. Hando, S. Hoshino, J. Ohashi, and T. Yokota: "Preparation and evaluation of Cu₂ZnSnS₄ thin films by sulfurization of E-B evaporated precursors", Solar Energy Materials and Solar Cells 49 407-414, (1997).
- 21) H. Katagiri, K. Jimbo, W. S. Maw, K. Oishi, N. Yamazaki, H. Araki, A. Takoichi, Development of CZTS-Based Thin Films Solar Cells, Thin Solid Films 517, 2455-2460 (2009)
- 22) C. Steinhagen, M. G. Panthani, V. Akhavan, B. Goodfellow, B. Koo,
- 23) Y.B.K. Kumar, G. S. Babu, P.U. Bhaskar, and V.S. Raja: "Preparation and characterization of spray-deposited Cu₂ZnSnS₄ thin films", Solar Energy Materials & Solar Cells 93, 1230–1237, (2009).
- 24) D. B. Mitzi, Adv. Mater. 2009, 21, 3141.
- 25) T. K. Todorov, J. Tang, S. Bag, O. Gunawan, T. Gokmen, Y. Zhu, and D. B. Mitzi, Beyond 11% Efficiency: Characteristics of State-of-the-Art Cu₂ZnSn(S,Se)₄ Solar Cells. Advanced Energy Materials, August, 2012.
- 26) http://files.shareholder.com/downloads/FSLR/2061985481x0x587754/43642762-a08b-47d3-bc57-62ee73d6b300/Q2_2012_Web_Schedule_final.pdf (10.09.2012)
- 27) Photon International, 07/2011, page 124
- 28) R.M. Pasquarelli, D.S. Ginley, R. O'Hayre, Chem. Soc. Rev., 2011, 40, 5406-5441.
- 29) M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, Wilhelm Warta, E.D. Dunlop, Prog. Photovolt: Res. Appl., 2012, 20, 606-614.
- 30) http://www.heraeusclevios.com/en/technik/productdetail_1034017.aspx?psMarketId=1286&psApplicationId=
- 31) ACS Appl. Mater. Interfaces, 2014, 6, 22628
- 32) J. Mater. Chem. A, 2014, 2, 7788
- 33) Adv. Mater., 2012, 24, 3005

7 Anhang

7.1 Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Zusammenstellung des Konsortiums und Kernkompetenzen der Projektpartner | 6 |
| Abbildung 2: links: crystalsols R2R-Produktionsprozess; rechts: Herstellungsprozess für OPV | 11 |
| Abbildung 3: Vereinfachte Darstellung der monolithischen Verschaltung einer OPV | 13 |
| Abbildung 4: IV-Kurve plus Parameter einer organischen Solarzelle mit PEI/PCBM hergestellt am LIOS | 14 |
| Abbildung 5: IV-Charakteristik der Einzelzellen sowie des Moduls hergestellt am NTC-Weiz | 15 |
| Abbildung 6: IV-Kurven mit und ohne neuentwickelte Verschaltung | 16 |
| Abbildung 7: links: Gitterelektrodenstruktur am NTC-Weiz, rechts: gedrucktes Gitter auf flexiblem Substrat | 17 |
| Abbildung 8: links: IV-Kurve einer konventionellen organischen Solarzelle auf einem flexiblen Substrat; rechts: durchschnittliche Solarzellenparameter von konventionellen organischen Solarzellen auf flexiblen Substraten hergestellt am NTC-Weiz | 17 |
| Abbildung 9: links: IV-Kurve einer invertierten organischen Solarzelle auf einem flexiblen Substrat; rechts: durchschnittliche Solarzellenparameter von invertierten organischen Solarzellen auf flexiblen Substraten hergestellt am NTC-Weiz | 18 |
| Abbildung 10: Al:ZnO-Schichten hergestellt am AIT mit chemischer Badabscheidung auf Glas und auf CZTS/CdS-Körnern von crystalsol | 18 |
| Abbildung 11: links: AFM-Aufnahme der TCO/Metall/TCO-Elektrode mit 7 Ω Flächenwiderstand; rechts: experimentelle und simulierte Transmissionsspektren | 19 |
| Abbildung 12: links: Layout für die am Fraunhofer IAP gedruckten Silbergitter ; rechts: Layout für die am Fraunhofer IAP gedruckten Solarzellen | 19 |
| Abbildung 13: links: Solarmodule hergestellt mittels S2S-Anlage am Fraunhofer IAP; rechts: IV-Charakteristik eines OPV-Moduls auf Glas, charakterisiert am AIT | 20 |
| Abbildung 14: oben: Stabilität von organischen Solarzellen hergestellt am Fraunhofer IAP; unten: herrschende Wetterbedingungen | 22 |

7.2 Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Übersicht Arbeitspakete..... | 8 |
| Tabelle 2: Vergleich Einzelzellen und Modul mit Wirkungsgradverlust unter 40%..... | 15 |

8 Kontaktdaten

KF:

DI Birgit Six
NTC-Weiz - NanoTecCenter Weiz Forschungsges mbH
Franz-Pichler-Straße 32
8160 Weiz
TEL: +43 316 876 8021
FAX: +43 316 876 8040
birgit.six@ntc-weiz.at

P1:

Dr. Theodoros Dimopoulos
AIT - Austrian Institute of Technology
Giefinggasse 2
1210 Wien
TEL: +43 50550 6201
FAX: +43 50550 6390
Theodoros.Dimopoulos@ait.ac.at

P2:

Assoc.Prof. Dr. Gregor Trimmel
ICTM - Institute for Chemistry and Technology of Materials
Graz University of Technology
Stremayrgasse 9, A-8010 Graz, Austria
TEL: +43 316 873 32281
FAX: +43 316 873 1032281
gregor.trimmel@tugraz.at

P3:

Dr. Markus C. Scharber
Linz Institute for Organic Solar Cells (LIOS) / Institute of Physical Chemistry
Johannes Kepler University Linz
Altenbergerstraße 69
4040 Linz
TEL: +43 732 2468 8712
FAX: +43 732 2468 8770
Markus.Clark.Scharber@jku.at

e!Mission.at - 1. Ausschreibung

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

P4:

Dr. Christine Boeffel
Fraunhofer IAP - Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung
Geiselbergstraße 69
14476 Potsdam-Golm
TEL: +49 331 568 1112
FAX: +49 331 568 3000
christine.boeffel@iap.fraunhofer.de

P5:

DI Lukas Plessing
crystalsol GmbH
Simmeringer Hauptstraße 24
1110 Vienna, Austria
TEL: +43 1 890 18 79 11
FAX: +43 1 890 18 79 99
lukas.plessing@crystalsol.com

P6:

Dr. Verena Schenk
ISOVOLTAIC AG
Isovoltaicstraße 1
8403 Lebring
TEL: +43 5 9191 9972
FAX: +43 5 9191 79972
verena.schenk@isovoltaic.com