

Abschlussbericht
zum BMW-geförderten Projekt

**Verbundvorhaben: Hochleitfähige transparente Oxide für die
Photovoltaik**

**Teilvorhaben: Anwendung auf Tandemsolarzellen,
Modulintegration und Charakterisierung von Siebdruck-freien
Solarzellen**

Kurzbezeichnung: **TOP**

Förderkennzeichen: **03EE1080C**

Projektdurchführung:

Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/Emmerthal (ISFH)

Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal

Projektleiter: Dr. Felix Haase

Autoren: Dr. Felix Haase, Malte Brinkmann

Projektlaufzeit: 01.12.2020 – 30.11.2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1. KURZDARSTELLUNG	3
1.1 AUFGABENSTELLUNG.....	4
1.2 VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE.....	4
1.3 PLANUNG UND ABLAUF VORHABENS.....	5
1.4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND, AN DEN ANGEKNÜPFT WURDE	9
1.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN	11
2. EINGEHENDE DARSTELLUNG DER ERZIELTEN ERGEBNISSE	12
AP3 INDIUMFREIE TCO-SCHICHTEN, HERGESTELLT MITTELS SPUTTERN	12
AP4 ANWENDUNG DER INDIUMFREIEN TCO-SCHICHTEN AUF SOLARZELLEN	15
AP4.1 ANWENDUNG DER INDIUM-FREIEN TCO-SCHICHTEN AUF HJT-SOLARZELLEN.....	15
AP4.2 ANWENDUNG DER INDIUM-FREIEN TCO-SCHICHTEN ALS GRENZSCHICHT IN SILIZIUM/PEROWSKIT-	20
TANDEMSOLARZELLEN	20
AP4.3 ANWENDUNG DER INDIUM-FREIEN TCO-SCHICHTEN ALS GRENZSCHICHT IN SILIZIUM/PEROWSKIT-	28
TANDEMSOLARZELLEN	FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.
AP5 DIREKTE KONTAKTIERUNG DER TCOs DER SOLARZELLEN	30
AP5.1 KONTAKTIERUNG VON TCOs METALLFREIER SOLARZELLEN	30
AP5.2 MESSUNG VON METALLFREIEN HETEROJUNCTION SOLARZELLEN.....	34
AP5.3 LANGZEITSTABILITÄT DER KONTAKTE	39
3. VERWENDUNGSNACHWEIS	40
4. NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT	41
5. DARSTELLUNG DES VORAUSSICHTLICHEN NUTZENS, INSBESONDERE DER VERWERTBARKEIT DES ERGEBNISSES IM SINNE DES FORTGESCHRIEBENEN VERWERTUNGSPLANS	41
6. ERFOLGTE ODER GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNG DES ERGEBNISSES.....	42
7. WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG DES VORHABENS DEM ZUWENDUNGSEMPFÄNGER BEKANNT GEWORDENER FORTSCHRITT AUF DIESEM GEBIET BEI ANDEREN STELLEN	44

1. Kurzdarstellung

Im Projekt TOP sollten Heterojunction (HJT) Solarzellen mit hohen Wirkungsgraden für die Massenproduktion entwickelt werden. Dabei sollten Lösungen entwickelt werden, um die Materialkosten zu senken durch den Einsatz alternativer Materialien bei den leitfähigen transparenten Oxiden (TCOs) und durch die Vermeidung einer Siebdruckmetallisierung. Für diese Solarzellen ohne Metallstruktur sollten zur Zellcharakterisierung und Modulintegration angepasste Kontaktierungsverfahren entwickelt werden. Ein weiterer Aspekt betrifft die weitere Steigerung des Wirkungsgrads durch die Stapelung der HJT Zelle mit einer Perowskitsolarzelle, ebenfalls mit Indium freien TCOs.

Dazu wurde am ISFH ein Indium freies TCO mittels Sputtern entwickelt. Nach einer Literaturrecherche haben wir uns am ISFH für Aluminium dotiertes Zinkoxid (AZO) entschieden. Auf einer industriellen Durchlaufanlage wurden AZO Schichten mit einer Mobilität von $\sim 17 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ bei einer durchschnittlichen Transmission im Bereich 300 1300 nm von $\sim 92 \%$ bei 200°C entwickelt. Diese Ergebnisse wurden dann auf eine Anlage bei Meyer Burger übertragen. Dort wurden Solarzellen mit über 24% Wirkungsgrad hergestellt, bei der das Rückseiten ITO komplett durch AZO ersetzt wurde.

Das AZO wurde auch für die Perowskit-Siliziumtandemsolarzellen eingesetzt. Dafür stellte Meyer-Burger HJT-Bottomsolarzellen mit AZO auf der Vorderseite her und am ISFH wurde die Perowskit-Topsolarzelle hergestellt. Die Haftung der Perowskitschicht auf dem AZO konnte durch eine Ozon-Vorbehandlung optimiert werden, sodass die texturierte Siliziumoberfläche vollständig durch den Perowskiten bedeckt ist. Die Tandemsolarzelle zeigte eine gute offene Klemmspannung von 1744 mV. Der Wirkungsgrad der besten Perowskit-Siliziumsolarzelle beträgt 21% und ist durch den geringen Füllfaktor von 62% limitiert. Die Ursache hierfür sind vermutlich Stromtransportprobleme, da der pFF bei 82% liegt und somit die Rekombination oder ein Kurzschluss kein Problem zu sein scheint. Die pseudo Effizienz der Solarzelle liegt bei 27,7%.

Zur Charakterisierung von Perowskitsolarzellen wurde ein IV-Tester in einer Handschuhbox aufgebaut, um diese unabhängig von Umwelteinflüssen in definierter sauerstoff- und wasserfreien Atmosphäre messen zu können. Der IV-Tester wurde in über 50 Chargen genutzt und trug dazu bei, den Fortschritt der Perowskitsolarzellen unabhängig von Degradation durch die normale Atmosphäre beurteilen zu können.

Zur Kostenreduktion von Heterojunction (HJT)-Solarzellen soll das Metallgitter aus Silber weggelassen werden. Dafür ist bei der Verschaltung der Zellen zum Modul ein niedrigohmiger elektrischer Kontakt von ITC-mantelten SmartWire-Drähten zum TCO der Heterojunction-Zellen notwendig. Ohne weitere Modifikation war der Kontaktwiderstand um mehr als eine Größenordnung zu hoch. Es wurden verschiedene Modifikationen an der Siliziumoberflächenstruktur, den TCO Eigenschaften und des Lots vorgenommen. Diese Änderungen führten jedoch nicht zur notwendig niedrigen Kontaktwiderständen. Die Beschichtung mit extrem dünnem Ag und ZnO war die einzige Kombination, die zu einem sehr guten Kontaktwiderstand von $(8.5 \pm 0.1) \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ und einer Schichtleitfähigkeit von 1-5 Ohm geführt hat, welches für eine siebdruckfreie Kontaktierung notwendig ist.

Hohe laterale Leitfähigkeiten im Front-TCO der Solarzelle und hohe Kontaktwiderstände von Nadel zu TCO erschweren die Messung siebdruckfreier Solarzellen und die korrekte Beurteilung der Messung. Deswegen wurden in TOP eine neue Kontakteinheit entwickelt mit möglichst sanften Kontaktleisten, um die Zelle nicht zu beschädigen. Der Messrahmen verfügt über zwei unabhängige Sensekontakte an verschiedenen Positionen, die alternierend geschaltet werden können. Beim ersten Sensekontakt wird der Widerstand der Vorderseite vernachlässigt, wie bei Zellmessungen

üblich. Mit dem zweiten Sensekontakt wird der Widerstand mitgemessen, sodass ein für ein Modul realistischer Füllfaktor gemessen wird.

1.1 AUFGABENSTELLUNG

Im TOP Projekt ging es darum, die bereits sehr guten HJT Zellen von Meyer-Burger noch kostengünstiger herzustellen, indem die teuersten Komponenten, das ITO und der Silbersiebdruck ersetzt werden. Das Indium im ITO ist ein seltenes und teures Material, was durch ein häufiges und günstigeres Material ersetzt werden sollte. Dabei mussten die Anforderungen des alternativen TCOS an die Leitfähigkeit, Transparenz und Zuverlässigkeit erfüllt werden. Des Weiteren musste auch ein geeignetes Beschichtungsverfahren für das alternative TCO gefunden werden. Dabei konzentrierte sich das FZJ auf die Entwicklung mittels PECVD und das ISFH mittels Sputtern.

Um noch mehr Kosten zu senken, war eine weitere Aufgabe des ISFH, Zellen ohne Silbersiebdruck ins Modul zu integrieren. Dabei gab es mehrere große Herausforderungen. Erstens musste ein niederohmiger, direkter und zuverlässiger Kontakt vom Smartwire-Draht zum neuen TCO der Zelle hergestellt werden. Zweitens musste das TCO dadurch deutlich leitfähiger werden, um die Leitfähigkeit der Silberfinger zu kompensieren. Und drittens musste für die elektrische Charakterisierung der silberfreien Solarzellen eine Kontakteinheit entwickelt werden.

Um den Wirkungsgrad noch weiter zu steigern, sollte auf die HJT Zelle mit dem neuen TCO eine Perowskitsolarzelle abgeschieden werden. Das ISFH sollte dazu die passende indium-freie Rekombinations- und Fenster-TCO Schicht entwickeln.

1.2 VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE

Das TOP-Projekt wurde auf Basis der Förderbekanntmachung Angewandte nichtnukleare Forschungsförderung im 7. Energieforschungsprogramm – „Innovationen für die Energiewende“ vom 1. Oktober 2018 [1] beantragt. Es adressierte dabei wichtige F&E-Themen die Kapitel 4.2.1 des 7. Energieforschungsprogramm [2] gefordert wurden, die wir hier zitieren:

- (a) „...neue Materialien und Technologien bis zur Produktionsreife weiterzuentwickeln und deren Kosteneffizienz nachzuweisen...“
- (b) „...für die Weiterentwicklung von Prozessen vom Material bis ins Modul sowie des zugehörigen Prozessequipments [sind] Pilotversuche mit vorindustriellen Demonstrationsanlagen von großer Bedeutung...“
- (c) „...Entwicklung hocheffizienter Tandemsolarzellen auf Basis des kristallinen Siliziums (z. B. in Kombination mit Perowskit-Halbleitern) ...“
- (d) „...Steigerung des Wirkungsgrads und der Produktivität ...(bei) verminderten Flächenverbrauch...“,

[1] BMWi, Förderbekanntmachung Angewandte nichtnukleare Forschungsförderung im 7. Energieforschungsprogramm „Innovationen für die Energiewende“ vom 1. Oktober 2018, Bundesanzeiger (2018).

[2] BMWi, 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung. (Frankfurt, 2018).

- (e) „...dass sich die heimischen Unternehmen stets mit Innovationen von der internationalen Konkurrenz abheben, um in kürzeren Zeiträumen über effizienzsteigernde technologische Weiterentwicklungen Kostensenkungspotenziale zu erzielen.“

Das Vorhaben TOP entsprach den obigen Förderzielen in mehrerlei Hinsicht:

- (a) In diesem Vorhaben wurden neue Indium-frei und somit kostengünstige Materialsystem zur Kontaktierung von hocheffizient HJT und Tandemsolarzellen entwickelt. Ziel war den PECVD-Prozess für diese neuen Schichten im Rahmen des Projektes auf eine industrielle Pilotanlage bei Meyer Burger zu übertragen und somit die Produktionsreife zu demonstrieren. Neben Indium sollte auch auf die kostenintensive Silbersiebdruckmetallisierung für HJT-Zellen verzichtet werden.
- (b) Mit den neuartigen Schichtsystemen sollten angepasste Solarzellen und insbesondere ihre Modulintegration unter Verwendung industrietauglicher Prozesse und Anlagen entwickelt werden.
- (c) Die Siebdruck-freie Kontaktierung der TCO-Schichten war ein Schlüsselprozess zur Modulintegration großflächiger Silizium/Perowskit-Tandemsolarzellen, da bisher keine Prozesse zur Modulintegration hierfür vorhanden war.
- (d) Sowohl die Module mit Siebdruck-freien HJT-Solarzellen wie auch die Tandemmodule zeichneten sich durch einen deutlich höheren Wirkungsgrad im Vergleich zum damaligen Standard aus und sollte somit die Anlagenfläche effizienter zu nutzen und die Systemkosten senken. Zudem weisen die bifazialen HJT Zellen einen höheren Ertrag als monofaziale Homojunction Zellen je Nennleistung auf bedingt, durch den geringen Temperaturkoeffizienten und dem zusätzlichen rückseitigen Ertrag.
- (e) Die neuen TCO-Schichten in Kombination mit der direkten Kontaktierung ohne Silber-Siebdruck sollten die Produktionskosten deutlich reduzieren, da auf teure und seltene Materialien wie Indium und Silber verzichtet werden könnte. Des Weiteren würde der Produktionsprozess deutlich verschlankt. Die Umsetzung dieser Methode auf innovativen Prozessanlagen sollte Meyer Burger einen umfangreichen internationalen Wettbewerbsvorsprung ermöglichen.

1.3 PLANUNG UND ABLAUF VORHABENS

Im TOP Projekt kam es bedingt durch die Corona Pandemie zu einigen Verzögerungen, die vor allem das erste Projektjahr stark beeinflussten. Aufgrund von Lieferschwierigkeiten bei Material und Ersatzteilen sowie eingeschränktem Zugang zu den Laboren konnte der ursprüngliche Arbeitsplan nicht eingehalten werden. Durch eine kostenneutrale Verlängerung, konnten jedoch fast alle Meilensteine erfüllt werden innerhalb des neuen Projektzeitraums.

AP 1: Projektleitung

Ziel: Koordination innerhalb der ISFH Arbeitspakete als auch mit den Projektpartnern

In diesem Arbeitspaket wurden die Arbeiten in den folgenden Arbeitspaketen des ISFHs koordiniert. Z.B. wurden die TCO Beschichtungen, die in AP3 entwickelt wurden, in AP4 und AP5 eingesetzt. Die in AP 4 hergestellten Zellen sollten in AP5 gemessen und ins Modul integriert werden.

Des Weiteren ergab sich auch Abstimmungsbedarf mit den anderen Projektpartnern, da sowohl die Heterojunctionsolarzellen als auch die Tandemsolarzellen kreuzprozessiert werden sollten. In AP5 wurden Zellen von Meyer-Burger mit einer Messeinheit vom ISFH gemessen und sollten ins Modul eingebaut werden.

AP 3: Indium-freie TCO-Schichten, hergestellt mittels Sputtern

Ziel: In diesem Arbeitspaket sollten vielversprechende Materialien für einen Ersatz für Indium in TCO-Schichten identifiziert werden und mittels Ko-Sputtern hergestellt werden. Diese TCO Schichten sollten sowohl für HJT Zellen als auch für Tandemsolarzellen eingesetzt werden.

Planung:

In diesem AP sollten zunächst die erforderlichen Zielparameter für die zu entwickelnden TCOs für die 3 Anwendungsszenarien aus AP4 spezifiziert werden. Aufbauend darauf sollten auf der Grundlage des aktuellen Kenntnisstands die aussichtsreichsten gesputterten TCO-Materialien im Hinblick auf die zu erwartenden optischen und elektrischen Eigenschaften sowie die zu erwartende Kompatibilität zur Anwendung in Si-HJT-Solarzellen wie auch in Perowskit-Solarzellen unter Berücksichtigung der voraussichtlichen Kosten identifiziert werden. Für die Entwicklung der unterschiedlichen In-freien TCO-Schichten sollte am ISFH ein Ko-Sputter Prozess genutzt werden, d.h. aus zwei unterschiedlichen Targets gleichzeitig gesputtert werden. Dies sollte eine möglichst flexible Herstellung verschiedener TCOs ermöglichen.

Eine weitere Möglichkeit, die TCO-Schicht sehr leitfähig zu machen besteht darin, eine sehr dünne Ag-Legierung in die TCO-Schicht zu integrieren. Die Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminde/Göttingen (HAWK) hatte bereits für CIGS-Dünnschichtsolarzellen einen entsprechenden Prozess entwickelt, den sie auf die Si-Heterojunction-Solarzellen anpassen können. Innerhalb des Projektes sollten in einem Auftrag von der HAWK solche Schichten auf Heterojunction-Solarzellen von Meyer-Burger beschichtet werden.

Ablauf:

Es wurden beim Ko-Sputtern von ZnO:Al-basiert erst erfolgreiche Ergebnisse in einer Laboranlage erzielt, die sich jedoch nicht reproduzieren ließen. Nach einigen fehlgeschlagenen Verbesserungsversuchen, wie z.B. einem Targettausch nach eventueller Verunreinigung durch die Mehrfachnutzung der Anlage wurden die Arbeiten am Ko-Sputtern eingestellt und der ZnO:Al-basierte Prozess direkt in der Hochdurchsatzanlage (AMAT ATON) weiterentwickelt. Diese Schichten kamen dann bei der HJT Zelle als auch als Rekombinationsschicht bei der Tandemzelle zum Einsatz.

Die TCO Schichten mit der Ag-Legierung wurden ebenfalls entwickelt. Das HAWK entwickelte diese dünnen leitfähigen und transparenten Schichten zusammen mit einem schwedischen Unternehmen Mimsi Materials. Dieses hat die Ausstattung, um Beschichtung von etwas größeren Probenstückchen durchzuführen. Es entwickelte sich eine sehr konstruktive Kooperation mit diesem Unternehmen. Es wurden HJT Zellen von Meyer-Burger beschichtet und am ISFH charakterisiert. Gegen Ende des TOP Projektes wurde zusammen mit Mimsi Materials ein Antrag zur Weiterentwicklung dieser Schichten auf Solarzellen im Rahmen eines EU-Projekts eingereicht, das bewilligt wurde.

AP 4: Anwendung der Indium-freien TCO-Schichten auf Solarzellen

Ziel: Dieses Arbeitspaket diente der Entwicklung von HJT-Solarzellen mit einer Indium-freien TCO-Schicht (AP3) mit einem Wirkungsgrad von $> 24,0 \%$. Außerdem sollten Indium freie TCO Schichten für die TCO Grenzsicht und Fensterschicht bei Tandemsolarzellen entwickelt werden.

Planung:

In diesem Arbeitspaket wurde der Einsatz der Indium-freien TCOs aus AP 3 in HJT-Solarzellen untersucht. Ziel war es, die Schichten und deren Herstellungsprozess so anzupassen, dass die HJT-Solarzellen einen Wirkungsgrad von mehr als $24,0 \%$ erreichten.

Außerdem sollt die Ankopplung der TCO-Schichten an verschiedene Topzellstacks in einer Tandemsolarzelle untersucht werden. Für einen schnellen Iterationszyklus sollte ein nasschemischer Prozess für die Topzellstacks entwickelt werden. Die Bedeckung nasschemisch hergestellter (Perowskit-) Schichten ist auf planaren Oberflächen einfacher als auf texturierten Oberflächen. Da HJT Zellen standardmäßig auf der Vorderseite texturiert sind, sollten vom FZ Jülich planare HJT Zellprekursoren zur Verfügung gestellt werden.

Des Weiteren sollte die Auswirkungen der Abscheidung von TCOs auf die sensitiven Schichtfolgen der Perowskitsolarzellen beim Einsatz als Fensterschicht untersucht werden. Es sollte vor allem der elektronensammelnden Kontakt und die Absorberzusammensetzung variiert werden. Dadurch sollten verschiedene Schädigungsmechanismen untersucht werden, wobei vor allem die Segregation der Halide und die Eindiffusion von Metallatomen aus dem TCO zu nennen sind.

Um die Tandemsolarzellen direkt nach der Prozessierung messen zu können, sollte in die Handschuhbox ein IV-Messplatz integriert werden. Dies war wichtig, da die Perowskitsolarzellen einerseits schnell degradieren können und andererseits vor allem an der Umgebungsluft nicht stabil sind.

Ablauf:

Die in AP3 hergestellten Aluminium dotierten Zinkoxid-Schichten (AZO) TCO Schichten wurden auf die HJT Zellen aufgebracht und charakterisiert. Nach der Übertragung des AZO Prozesses zu Meyer Burger wurden die AZO Schichten direkt in einer Sputteranlage bei Meyer Burger beschichtet. Nach einigen Optimierungsschritten, erreichten die Solarzellen über 24% Wirkungsgrad.

Zudem wurde der Einsatz von AZO als Grenzsicht für Perowskit-HJT Tandemsolarzellen entwickelt. Durch geeignete Vorbehandlung können nicht nur planare, sondern auch Oberflächen mit Submikrometer großen Pyramiden konform von einer nasschemischen Schicht bedeckt werden. Dafür wurde ein Prozess zur Reduktion der Größe der Pyramiden von 3 bis $5 \mu\text{m}$ auf $1-2 \mu\text{m}$ bei Meyer Burger eingefahren. Auf dieser relevanteren Oberfläche, wurde die Entwicklung der AZO Schichten vorzugsweise weitergeführt. Es konnte eine offene Klemmspannung von 1744 mV erreicht werden, womit der Meilenstein 4.2 ($V_{\text{OC}} > 1,7 \text{ V}$) erfüllt wurde. Lediglich das Front TCO enthält noch Indium. Insgesamt konnte eine Indium Reduktion von 70% erreicht werden.

Der Messplatz für die IV Messung wurde geplant, angeschafft und in eine vorhandene Handschuhbox aufgebaut. Die Messung der Zellen in Schutzatmosphäre erlaubte direkte Rückschlüsse auf die Wechselwirkung zwischen TCO und Perowskit ohne den Einfluss äußerer Faktoren wie Sauerstoff oder Wasser.

AP.5: Direkte Kontaktierung der TCOs der Solarzellen

Ziele: Es sollte eine widerstands- und schädigungsarmen Kontaktierung zur Modulintegration von HJT und Perowskitezellen mit TCO-Frontkontakten ohne Metallgitter entwickelt werden. Zur Messung dieser Solarzellen sollte eine Kontakteinheit entwickelt werden. Die kontaktierten Solarzellen sollten dann in ein gegenüber Umwelteinflüssen alterungsstabiles Modul eingebaut werden.

Planung:

Eine starke Erhöhung der Leitfähigkeit der TCO-Schichten ermöglicht den Verzicht auf ein Metallgitter, da dann die laterale Leitfähigkeit der TCO-Schichten ausreicht, um die Ladungsträger zu den Verbindern transportieren. Dafür ist ein direkter Kontakt zwischen TCO und Draht notwendig. Die SmartWire Verbindungstechnologie bot sich hierfür besonders an, da sie die Solarzelle mit einer Vielzahl an Drähten kontaktiert.

Die wesentlichen Charakterisierungsverfahren von Solarzellen erfordern einen temporären elektrischen Kontakt zu der Solarzelle. Hier mussten die TCO-Schichten direkt, homogen und mit geringem Widerstand elektrisch kontaktiert werden. Um auch Zellen mit TCOs geringer lateraler Leitfähigkeit präzise zu messen ist es notwendig, die Anzahl der Stromabgriffspunkte zu erhöhen. Für diese Kontakteinheit wurde im Projekt ein Auftrag an PASAN SA eingeplant.

Für den Test der Stabilität der Module gegenüber Umwelteinflüssen sollten Feuchte-Wärme-Tests, Temperaturwechsellastzyklen und Feuchte-Frost-Zyklen durchgeführt werden. Neben den Kontaktwiderständen zwischen den TCO-Schichten und Drähten können auch die TCO-Schichten selbst durch die Umwelteinflüsse verändern. Die elektrischen und optischen Eigenschaften der TCO Schichten sollte nach Alterung geprüft werden. Die Kontaktwiderstände der Drähte zum TCO sollten ebenfalls in Testmodulen auf Alterung hin untersucht werden.

Ablauf:

Es wurden sehr viele Testmodule mit verschiedenen Variationen im TCO, in den Drähten und im Lot hergestellt und die Kontaktwiderstände von Draht zu TCO vermessen. Die Kontaktwiderstände überschreiten bereits initial den erforderlichen Widerstand um mehr als eine Größenordnung. Alterung in Temperaturwechselzyklen und Feuchte-Frost Zyklen führt zu einem Anstieg um mehr als eine Größenordnung nach wenigen Zyklen. Weitere Alterungsuntersuchungen wurden nur an Proben mit initial relevanten Widerständen durchgeführt.

Die Zellen ohne Metallsiebdruck wurden an zwei verschiedenen Systemen mit unterschiedlicher temporärer Kontaktierung gemessen. Dabei ergeben sich große Abweichungen in den gemessenen Füllfaktoren. Des Weiteren änderte Meyer-Burger die Wafergröße von M6 zu M10. Für diese neue Wafergröße und die sanfte und homogene Kontaktierung wurde nach einer aufwändigen Simulationsstudie eine Kontakteinheit für das LOANA Messsystem anstatt des Pasan-Testers in Auftrag gegeben.

1.4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND, AN DEN ANGEKNÜPFT WURDE

TCOs für Si-basierte Tandemsolarzellen

In Perowskit/Silizium-Tandemsolarzellen werden TCOs auf Vorder- und Rückseite sowie als Rekombinationsschicht zwischen Bottom- und Topsolarzelle eingesetzt [Fehler! Textmarke nicht definiert.,3,Fehler! Textmarke nicht definiert.,4,5]. Das zu Projektbeginn am häufigsten für die Rekombinationsschicht und die Rückkontakte in Tandemsolarzellen eingesetzte TCO war Zinn-dotiertes Indiumoxid $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (ITO), das eine hohe Leitfähigkeit und Transparenz bei geringen Prozesstemperaturen bietet. Der Einbau von Wasserstoff in (dotiertes) Indiumoxid kann die Ladungsträgerbeweglichkeit und damit die elektrische Leitfähigkeit erhöhen, ohne die Transparenz zu beeinträchtigen. Interessante Kandidaten waren hier $\text{IO}:\text{H}$, Cer-dotiertes Indiumoxid ($\text{ICO}:\text{H}$), und Wolfram-dotiertes Indiumoxid ($\text{IWO}:\text{H}$). Die Verwendung von TCOs auf der Vorderseite von Perowskit/Silizium-Tandemsolarzellen erfordert noch geringere Prozesstemperaturen ($< 150^\circ\text{C}$), um eine Degradation des Perowskitabsorbers zu vermeiden. Die Vorderseiten TCOs haben außerdem die höchsten Anforderungen an Transparenz und Leitfähigkeit. Häufig wurden daher Mischoxide wie Indiumzinkoxid (IZO) [11,4,5,6] oder wasserstoffdotiertes Indiumoxid ($\text{IO}:\text{H}$) [7] verwendet, die bereits im amorphen Zustand optimale Eigenschaften aufweisen. Um die Schädigung der Perowskitsolarzellen beim Sputtern der TCOs zu verhindern, war oft eine Pufferschicht erforderlich. Hier wurde z.B. WO_x [8], VO_x [9], MoO_x [10] und SnO_x [11] eingesetzt, die meist mit Atomlagenabscheidung (ALD) oder lösungsbasierten Verfahren (z.B. Spin-Coating) aufgebracht wurden. Durch die Entwicklung besonders schonender Beschichtung des Front-TCOs oder schädigungsarmer PECVD- oder Sputterabscheidung der Pufferschicht bestand hier besonderes

[3] E. Köhnen et al., “Highly efficient monolithic perovskite silicon tandem solar cells: analyzing the influence of current mismatch on device performance”, *Sustainable Energy Fuels*, 3, 1995 (2019).

[4] M. Jošt et al., “Textured interfaces in monolithic perovskite/silicon tandem solar cells: advanced light management for improved efficiency and energy yield”, *Energy Environ. Sci.* 11, 3511 (2018).

[5] J. Werner et al., “Sputtered rear electrode with broadband transparency for perovskite solar cells”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 141, 407–413 (2015).

[6] M. Morales-Masis et al., “Low-Temperature High-Mobility Amorphous IZO for Silicon Heterojunction Solar Cells”, *IEEE J. Photovolt.* 5(5), 1340–1347 (2015).

[7] J. Werner et al., “Zinc tin oxide as high-temperature stable recombination layer for mesoscopic perovskite/silicon monolithic tandem solar cells”, *Applied Physics Letters* 109, 233902 (2016).

[8] J. Werner et al., “Parasitic Absorption Reduction in Metal Oxide-Based Transparent Electrodes: Application in Perovskite Solar Cells”, *Applied Materials and Interfaces* 8(27), 17260-17267 (2016).

[9] J. A. Raiford et al., “Atomic layer deposition of vanadium oxide to reduce parasitic absorption and improve stability in n-i-p perovskite solar cells for tandems”, *Sustain. Energy Fuels* 3(6), 1517–1525 (2019).

[10] M.M. Lee et al. “Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites”, *Science* 338 (6107), 643–647 (2012).

Einsparungspotential. Aufgrund von möglichen Verlusten bei einer geringen Querleitfähigkeit in der Rekombinationsschicht, wurde eine Alternative zu dem häufig verwendeten ITO gesucht [7,11].

TCOs werden auch als Ladungstransportschichten (CTLs) in Perowskit/Silizium-Tandemsolarzellen eingesetzt. Typische Materialien sind TiO_x [11,12], AZO und NiO_x [13]. Sie werden durch lösungsbasierte Verfahren (z.B. Spin-Coating), Sputtern, ALD oder Aufdampfen aufgebracht und gelten als kostengünstige Alternative zu den organischen Ladungstransportschichten wie z.B. Spiro-MeOTAD, PTAA oder C60.

Siebdruck-freie Zellverbindung

Die Verschaltung der Solarzellen mittels SmartWire ermöglicht neben einer schonenden Verschaltung eine deutliche Reduktion des benötigten Silbers für die Zellmetallisierung [14]. Es wurde gezeigt, dass eine Verschaltung von Heterojunction-Solarzellen ohne Silbersiebdruck möglich ist [15]. Um die geringe laterale Leitfähigkeit eines TCOs im Vergleich zu siebgedruckten Silberfingern auszugleichen ist jedoch eine hohe Anzahl an Drähten notwendig. Der hohe Kontaktwiderstand zwischen Draht und TCO erhöht den Serienwiderstand zusätzlich. Neben den Einflussfaktoren auf den Kontaktwiderstand wurde die Alterungsstabilität der Verbindung bislang kaum untersucht.

Temporäre Kontaktierung von Solarzellen zu Charakterisierungszwecken

Zur Reduktion der Verschattung und Erhöhung des Kurzschlussstromes werden zum Teil die Busbare weggelassen. Die Querverbindung wird dann durch die Zellverbinder erzielt, indem jeder Finger einzeln kontaktiert wird. [16,17]. Für die temporäre Kontaktierung während der Zellmessung wurden typischerweise auch die Busbare kontaktiert. Um busbarlose Zellen zur Charakterisierung temporär zu kontaktieren wurden spezielle Kontakteinheiten entwickelt. Diese beruhen entweder auf

[11] F. Salih et al., “Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency”, *Nature Mater* 17, 820–826 (2018).

[12] H.-S. Kim et al., “Lead Iodide Perovskite Sensitized All-Solid-State Submicron Thin Film Mesoscopic Solar Cell with Efficiency Exceeding 9%”, *Science Reports* 2(1), 591 (2012).

[13] T. Abzieher et al., “Electron-Beam-Evaporated Nickel Oxide Hole Transport Layers for Perovskite-Based Photovoltaics”, *Advanced Energy Materials* 9, 1802995 (2019).

[14] T. Söderström, P. Papet, J. Ufheil, “Smart Wire Connection Technology”, in Proc. 28th EUPVSEC, 495–499 (2013).

[15] A. Faes et al., “Direct contact to TCO with SmartWire Connection Technology”, in Proc. 7th WCPEC, 1998–2001 (2018).

[16] A. Schneider, L. Rubin, and G. Rubin, Solar cell efficiency improvement by new metallization techniques - the day4 electrode concept, Proceedings of the 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference, 1095 (2006).

[17] T. Söderström, P. Papet, and J. Ufheil, Smart wire connection technology, Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 495 (2013)

speziellen Kontakteleisten [18,19,20] oder auf Drähten [21] die dann statt der Busbare die Kontaktfinger der Solarzelle verbinden.

Eine direkte Kontaktierung von TCO-Schichten mit dem Ziel Stromdichten von bis zu 40 mA/cm² aus einer Solarzelle abzuleiten und gleichzeitig die Verschattung der Solarzelle auf ein weniger als 10% zu beschränken, wurden bisher nicht realisiert.

1.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN

Bei der Entwicklung der hochleitfähigen, transparenten TCO Schichten wurde intensiv mit dem HAWK und Mimsi Materials zusammengearbeitet. Herkömmliche TCOs erreichten zwar auch schon sehr gute Leitfähigkeiten bei guter Transparenz, was für eine über 24% HJT Zelle mit Metallisierung ausreicht, aber für eine Zelle ohne Metallgitter bedarf es weit höherer Leitfähigkeiten, damit die Widerstandsverluste bis zu den Drähten nicht zu hoch werden. Sehr dünne Ag-Schichten (<20nm) bieten eine deutliche Steigerung der Leitfähigkeit bei vergleichbaren Transparenzen zu den herkömmlichen TCOs. Die Schwierigkeit dabei liegt darin, die sehr dünnen Ag-Legierungs-Schichten so homogen zu beschichten, dass keine Unterbrechungen oder Inselwachstum auftreten, um eine gleichmäßige Leitfähigkeit über den gesamten Wafer zu erreichen. Des Weiteren muss diese Schicht auch gegenüber Umwelteinflüssen stabil sein. Genau dieses Know-How besitzt die HAWK. Hier wurden diese dünnen Ag-Legierungen bereits für CIGS Dünnschichtsolarzellen entwickelt. Da die Anlagen zur Beschichtung allerdings nur sehr kleine Proben beschichten kann, wurden die Schichten nicht bei der HAWK, sondern bei dem schwedischen Unternehmen Mimsi Materials beschichtet. Mimsi Materials hat eine enge Kooperation mit der HAWK und den Beschichtungsprozess bereits für Wärmebeschichtungen bei großen Fenstergläsern erfolgreich industrialisiert. Dieser wurde im Projekt auf die amorphen oder mikrokristallinen Kontaktschichten der HJT Zellen angepasst. Die Industrialisierung dieses Prozesses für Solarzellen ist Thema eines erfolgreich eingereichten EU Antrags.

Im Bereich der Perowskit-Siliziumtandemsolarzellen gibt es schon seit längerem eine Kooperation mit dem KIT und HZB. Während das ISFH Experte für die Siliziumsolarzellen ist und die Si-Bottomsolarzelle für die Tandems entwickelte, haben das KIT und HZB die Perowskitsolarzellen

[18] S. Dauwe, K. Ramspeck, T. Horn, S. Schenk, and A. Metz, Precise IV-measurement of busbarless solar cells including process control methods for production, 6th Workshop on Metallization & Interconnection for Crystalline Silicon Solar Cells, Konstanz (2016).

[19] K. Ramspeck, P. Waleska, S. Schenk, M. Alt, R. Jakob, and M. Meixner, Contacting new solar cell metallization layouts and contact quality surveillance in solar cell production, Proceedings of the 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 443 (2019).

[20] K. Kamatani, Y. Fujita, Y. Takeda, K. Shibamoto, H. Kojima, Y. Nakamichi, and K. Iwamoto, Development of new probe bar for c-Si PV cells with unique electrode design such as busbar-less, multi busbar and complicated busbar, Proceedings of the 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibitionp. 384 (2019)..

[21] N. Bassi, C. Clerc, Y. Pelet, J. Hiller, V. Fakhfour, C. Droz, M. Despeisse, J. Levrat, A. Faes, D. Bätzner, and P. Papet, GRIDTOUCH: Innovative solution for accurate IV measurement of busbarless cells in production and laboratory environments, Proceedings of the 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1180 (2014).

darauf appliziert. Während des Besuchs von ISFH Mitarbeitern in den Laboren des HZB und KIT konnten diese einiges über die Herstellung von Perowskiten lernen, was nicht in den Veröffentlichungen zu finden ist. Dies half sehr beim Fortschritt der Entwicklung der TCO Schichten und der Perowskitsolarzellen in den Laboren des ISFH.

Mit dem Institut für Organische Chemie and der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover gab es eine Kooperation mit Dr. G. Dräger, der für das ISFH eine Chemikalie zur Passivierung der Grenzflächen zur Verfügung stellte. Er synthetisierte dafür Piperaziniodid, welches nicht käuflich zu erwerben war und die offene Klemmspannung der Solarzellen erhöhte.

2. Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

AP3 Indiumfreie TCO-Schichten, hergestellt mittels Sputtern

Aufbauend auf der Literaturrecherche von Dezember 2020 fiel die Entscheidung eines Indium-freien TCOs auf Aluminium dotiertes Zinkoxid (AZO). Es wurden Versuche mittels Kosputtern an einer Laboranlage von Dreebit im Rahmen von AP 3 durchgeführt. Für die Prozesse wurde die Leistung am ZnO Target auf 200 W festgesetzt, lediglich die Leistung am Al Target wurde im Bereich von 18 W bis 200 W variiert für unterschiedliche Dotierungen im AZO. Außerdem wurde der Sputterdruck auf $3,5 \times 10^{-3}$ mbar und die Rotationsgeschwindigkeit der Substrattellers auf 13 Umdrehungen/min festgesetzt. Damit konnte über die Dauer des Prozesses die Schichtdicke eingestellt werden. Dabei betrug die Zielschichtdicke zunächst etwa 200 nm (durch Literaturrecherche als geeignete Startdicke gewählt). In dem aufgezeigten Parameterraum wurden verschiedenen Prozesse durchgeführt. Dabei zeigte ein Prozess mit einer Leistung am Al Target von 18 W die höchste Beweglichkeit von etwa $6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. 30 min Tempern bei 200°C erhöht die Beweglichkeit auf etwa $8 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Damit lag die Beweglichkeit jedoch unter dem Projektziel von mindestens $15 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Die optische Anforderung eine mittlere Transmission von mehr als 80% im spektralen Bereich von 300 bis 1300 nm wurde mit 85% erreicht. Der Tempersschritt erhöht die Transmission auf 90%.

Diese anfänglich vielversprechenden Ergebnisse waren nicht reproduzierbar. In der Regel ergaben sich Schichten mit einer Beweglichkeit $< 4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ und einer durchschnittlichen Transmission von weniger als 20 %. Einen Zusammenhang mit einem der oben beschriebenen Prozessparametern ist nicht zu erkennen. 2021 haben wir uns zusammen mit Meyer Burger entschieden, die Entwicklung der TCOs mit der Anlage ATON von AMAT fortzuführen, eine industriennahe Durchlaufanlage, in der auch gesputtert werden kann.

Für die genaue Bestimmung der Schichtdicke des AZOs, welches in der ATON beschichtet wurde, wurde ein Ellipsometer verwendet. Dafür war es notwendig, zunächst ein neues Modell zu erstellen, um die optischen Parameter der Schichten beschreiben zu können. Mithilfe des Modells und den Messdaten der hergestellten Schichten auf polierten Si-Substraten konnte dann die Schichtdicke genau bestimmt werden. Für eine Probe ist das Ergebnis in Abbildung 1 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Schichtdicke über die gesamte Probe sehr homogen ist. Zusätzlich lassen sich die optischen Parameter der gemessenen Schicht extrahieren, die für eventuelle Simulationen genutzt werden können.

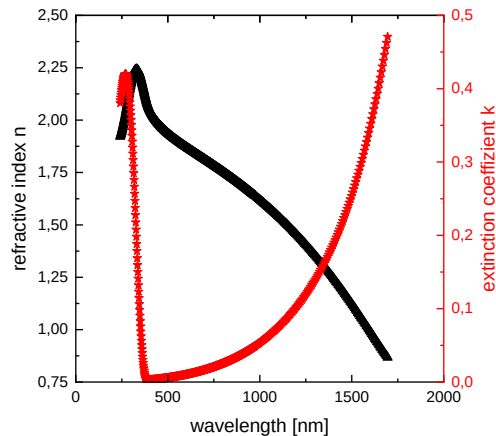
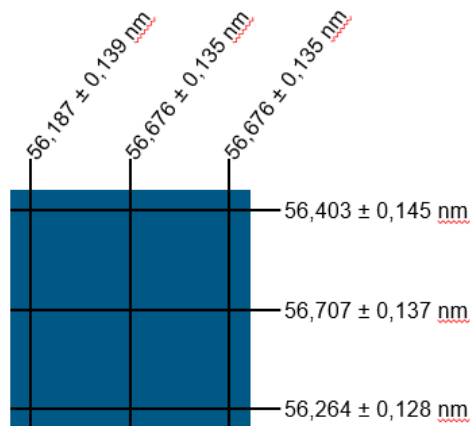


Abbildung 1: Schichtdickenbestimmung mittels Ellipsometrie. Die mittlere Dicke über die gezeigte Probe beträgt 56,5 nm.

Dabei galt es den Meilenstein 3.3 (Mobilität $\geq 15 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ und Transmission $\geq 80 \%$) zu erreichen. Abbildung 2 lässt sich entnehmen, dass diese Ziele erreicht und sogar deutlich überschritten worden. Für die Precursoren kann eine Temperatur bis 200°C verwendet werden. Dabei konnte eine Mobilität von $\sim 17 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ bei einer durchschnittlichen Transmission im Bereich 300-1300 nm von $\sim 92 \%$ erreicht werden. Darüber hinaus konnten noch höhere Mobilitäten in 300°C Prozessen erzeugt werden. Die beste AZO Schicht hat eine Mobilität von $20,55 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ und eine durchschnittlichen Transmission von $\sim 92 \%$. Hierbei zeigt sich auch, welchen Einfluss die Temperatur tendenziell auf die Schichteigenschaften hat.

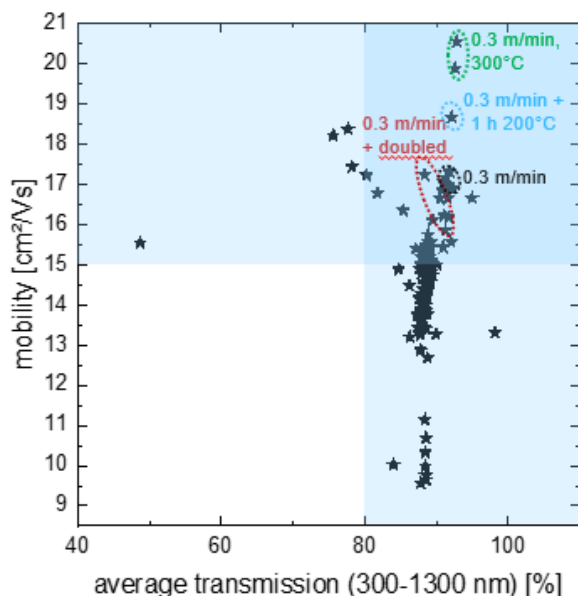


Abbildung 2: Erzielte durchschnittliche Mobilität und Transmission im Bereich 300-1300-nm. Höchste Mobilität von $20,55 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ bei Transmission von 92 % bei 300°C und einer Bandgeschwindigkeit von 0,3 m/min.

Bei der Entwicklung des TCOs an der AMAT ATON konnten verschiedene, einflussreiche Parameter ermittelt werden. Der kritischste Parameter ist der Basisdruck. Steigt dieser an, lässt sich eine

Abnahme der Mobilität erkennen (Abbildung 3: lila Sterne). Aus diesem Grund ist es anlagenseitig besonders wichtig, das Vakuum stabil niedrig zu halten.

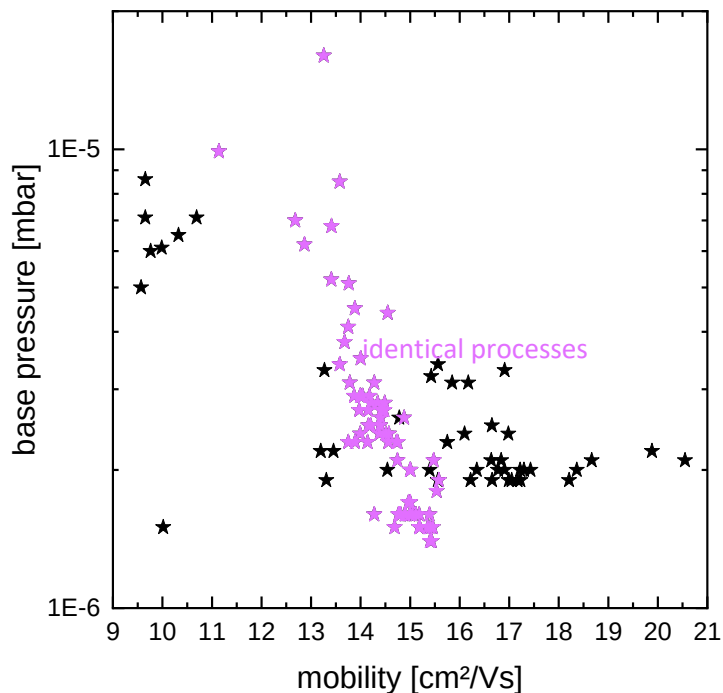


Abbildung 3: Zusammenhang Basisdruck und Mobilität. Mit sinkendem Basisdruck steigt die Mobilität für ansonsten gleiche Prozessparameter.

Als weiterer Parameter hat die Wachstumsrate, die über die Bandgeschwindigkeit geregelt wird, einen starken Einfluss auf die Schichteigenschaften. In Abbildung 4 ist die Mobilität über der Bandgeschwindigkeit aufgetragen, wobei die Mobilität von der Bandgeschwindigkeit abhängt. Das Maximum von 17 cm²/Vs wird bei einer Bandgeschwindigkeit von 0.3 m/min. Ein Wiederholungsversuch (Abbildung 4 orangene Sterne) bestätigte diese Beobachtung. Grund dafür könnte ein optimales Schichtwachstum bei den gewählten Prozessparametern sein.

Der AZO Prozess wurde erfolgreich zu Meyer Burger (MB) nach Hohenstein-Ernstthal übertragen und weiterentwickelt. Da der bisher bei MB bevorzugte PVD AZO-O₂ Prozess für die Rückseite noch etwas schlechtere IV Ergebnisse erzielt (0.1%_{abs} im Wirkungsgrad weniger im Vergleich zu ITO), wurde in Anlehnung an Versuche beim FZJ, ein **AZO-H₂ Prozess** zur Verbesserung der Mobilität und Leitfähigkeit erprobt:

- AZO + O₂ = 6 sccm → gute Mobilität $\mu_e \approx 15$ (vergleichbar dem ISFH-Prozess)
- AZO + H₂ = 6 sccm → verbesserte $\mu_e \approx 35$ (besser als μ_e ITO ≈ 25)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass am ISFH sehr gute Indium freie TCO Schichten auf einer industrienahen Anlage entwickelt wurden, die weit über die geforderten Werte im Meilenstein hinaus gehen. Der Prozess wurde erfolgreich an MB übertragen und dort weiter optimiert. Trotzdem reichen die Schichteigenschaften nicht aus, um auf die Querleitfähigkeit der Finger zu verzichten.

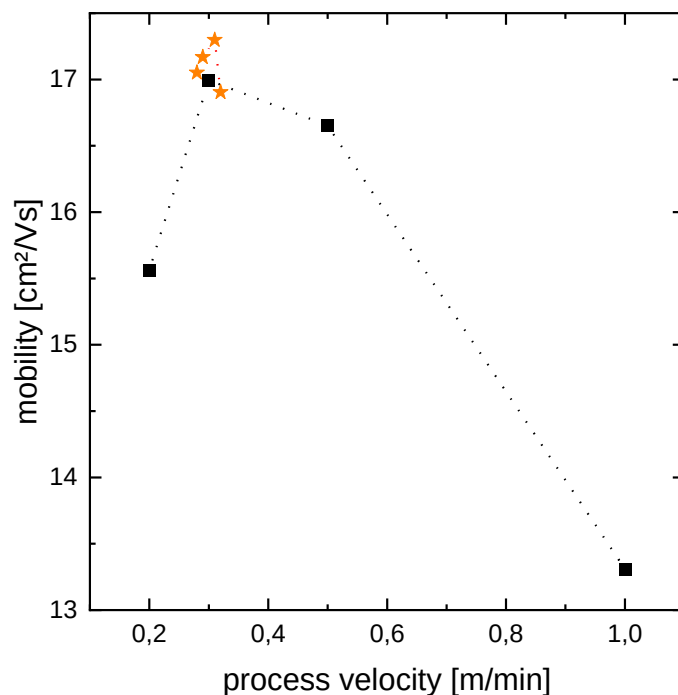


Abbildung 4: Zusammenhang Mobilität und Bandgeschwindigkeit. Für 0,3 m/min gibt es ein Maximum in der gemessenen Mobilität.

AP4 Anwendung der indiumfreien TCO-Schichten auf Solarzellen

AP4.1 Anwendung der Indium-freien TCO-Schichten auf HJT-Solarzellen

In AP 4.1 wurden die in AP3 entwickelten AZOs auf Siliziumheterojunction (SHJ) Precursoren integriert. Dafür sind in Abbildung 5 die aus Lebensdauermessungen ermittelten Werte der implizierten offenen Klemmspannung iV_{OC} für vor und nach Sputtern auf den unterschiedlichen Seiten der Zelle dargestellt. Die initialen iV_{OC} Werte liegen bei 735 mV. Nach dem Sputtern auf die n-Seite der SHJ ist eine Abnahme auf 727 mV messbar, während das Sputtern auf die p-Seite zu einer leichten Erhöhung auf 739 mV führt. Der Hauptgrund für das unterschiedliche Verhalten der beiden Seiten kann in der unterschiedlichen Schichtdicke liegen. Die n-Seite ist dabei mit 15 nm dünner als die p-Seite mit 22 nm, wodurch die Schädigung während des Sputterns zunimmt. Nach jedem Sputterprozess wird zwar ein Annealing bei 200°C für 4:40 min durchgeführt, allerdings scheint das für die n-Seite in der Gesamtheit nicht ausreichend zu sein, um die erzeugten Sputter-Schäden auszugleichen. Damit resultiert dieser Prozess in einer Abnahme des iV_{OC} . Für die p-Seite überwiegt der positive Effekt des Annealings die Schädigung, wodurch die leichte Zunahme im iV_{OC} erklärt werden kann. Beim Sputtern auf beide Seiten der SHJ überwiegt der Effekt von der n-Seite und das iV_{OC} nimmt im Vergleich zum initialen Wert ebenso ab.

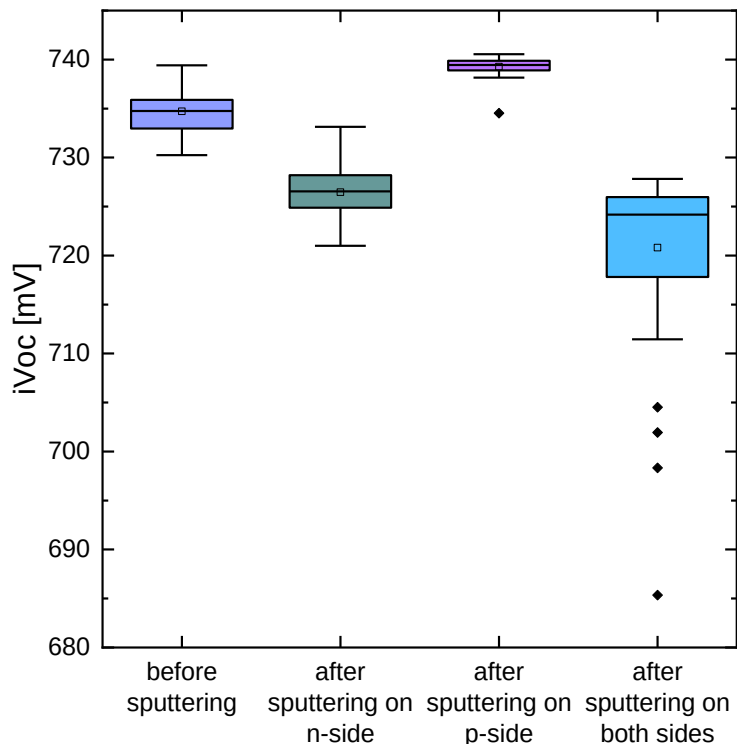


Abbildung 5: iV_{OC} aus den Lebensdauermessungen bei verschiedenen Prozessschritten.

Neben der dünneren Schichtdicke der a-Si Schicht auf der n-Seite gab es noch eine weitere Idee. Ein weiterer Grund für den reduzierten iV_{OC} könnte eine schädliche Kontaktspannung sein, die sich zwischen n-dotiertem a-Si und dem gesputterten AZO ausbildet. Um diese Idee zu untersuchen, wurde ein Wafer das AZO von einem Wafer mithilfe von HF wieder abgeätzt und das iV_{OC} erneut bestimmt. Die Ergebnisse dieses Versuchs sind in Abbildung 6 dargestellt. Zunächst zeigt sich wieder die Abnahme des iV_{OC} nach dem Sputtern (sowie vor dem Ätzen einige Zeit später im gleichen Zustand). Nach dem Ätzen lässt sich hingegen eine leichte Erhöhung im iV_{OC} feststellen, die aber nicht wieder den initialen Wert erreicht. Damit konnte aus diesem Versuch geschlossen werden, dass eine schädliche Kontaktspannung zur Reduktion der n-a-Si möglich ist, dass ein Großteil der Abnahme des iV_{OC} aber aus nicht ausheilbarem Sputterschaden kommt. Um diesen zu minimieren, könnte u.a. der Prozessdruck während des Sputterns erhöht oder eine zusätzliche „Schutz“-Schicht abgeschieden werden. Da an unserer ATON die Änderung des Prozessdrucks aktuell nicht gesondert möglich ist, sondern nur über die Durchflussmenge an Sputtergas eingestellt werden kann, wurde dieser Weg erstmal nicht weiterverfolgt.

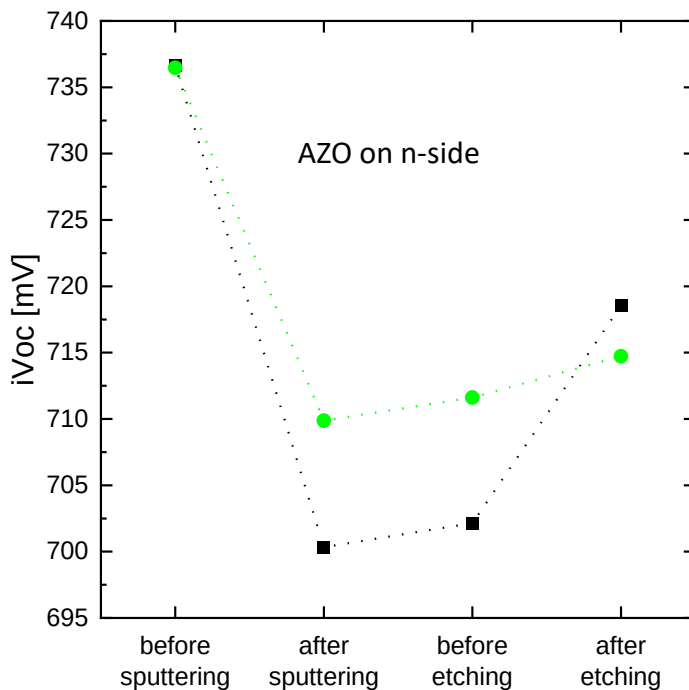


Abbildung 6: V_{oc} vor und nach dem Ätzen für AZO auf der n-Seite der SHJ.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen aus den Experimenten wurden erste Zellen hergestellt. Deren Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt. Zu sehen sind immer die drei Gruppen: AZO auf Vorder- oder Rückseite sowie auf beiden Seiten der SHJ. Den höchsten Wirkungsgrad erzielen die Zellen mit AZO auf der Rückseite, aber auch die anderen beiden Gruppen liegen in ähnlicher Höhe um die 21 %. Gründe für diesen Unterschied liegen neben den gezeigten Sputterschäden, in der zu dicken AZO Schicht (Vergleich Abbildung 7: I_{sc} mit Indiumzinnoxid (ITO) und AZO auf Vorderseite) als auch in der zu langen Lagerzeit der SHJ Precursoren vor dem Sputtern, was diversen Anlagenausfällen und Wartezeiten auf Ersatzteile geschuldet war. Letztendlich konnte aber aus diesen Versuchen gelernt werden, dass das AZO als indiumfreies TCO für SHJ Zellen geeignet ist, aber noch Optimierungspotential vorhanden ist.

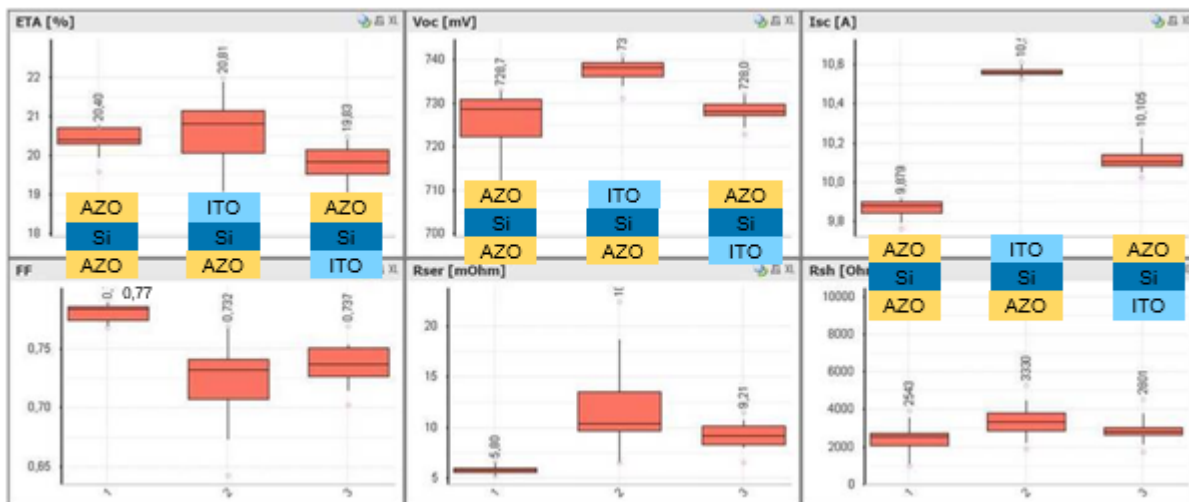


Abbildung 7: Zellergebnisse mit AZO auf Vorder- oder Rückseite sowie auf beiden Seiten der SHJ.

Auf Basis der vorherigen Zellversuche wurde eine erneute Zellfertigung mit AZO geplant. Dabei sollten die Unterschiede zwischen a-Si und nc-Si ermittelt sowie der Einfluss der Lagerdauer vor Sputtern reduziert werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 dargestellt. Leider kam es erneut zu Ausfall- und Wartezeiten vor dem Sputtern, so dass ein relevanter Vergleich unterschiedlicher Zeiten zwischen Prozessierung der Precursoren nicht wie geplant möglich war. Allerdings war immer eine Seite der Wafer vor diesem Einfluss geschützt, da bereits vor Versand ITO auf eine Seite gesputtert wurde. Damit konnte der Lagereinfluss vermutlich ein wenig reduziert werden.

Den höchsten Wirkungsgrad hatten die Zellen mit AZO auf der Rückseite und nc-Si mit fast 23 %. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Verwendung von nc-Si im Vergleich zu a-Si zu einer Verbesserung der Zellparameter führt. Vor allem im V_{OC} lässt sich der Unterschied feststellen, wenn das AZO auf der Vorderseite gesputtert wird. Für das a-Si ergibt sich ein V_{OC} von 734 mV, während mit nc-Si das V_{OC} 740 mV beträgt. Dies kann von einer Reduzierung des Sputterschadens kommen, da die nc-Si Schicht aufgrund anderer optischer Eigenschaften etwas dicker abgeschieden wird und dadurch mehr „Schutz“ bietet.

Da die Dicke des AZO auch bei diesen Zellprozessen noch zu dick war, sollte sie für zukünftige Zellprozesse weiter reduziert werden. Insgesamt werden die Zellergebnisse jedoch als vielversprechend bewertet, auch wenn noch ein wenig Optimierungsbedarf besteht.

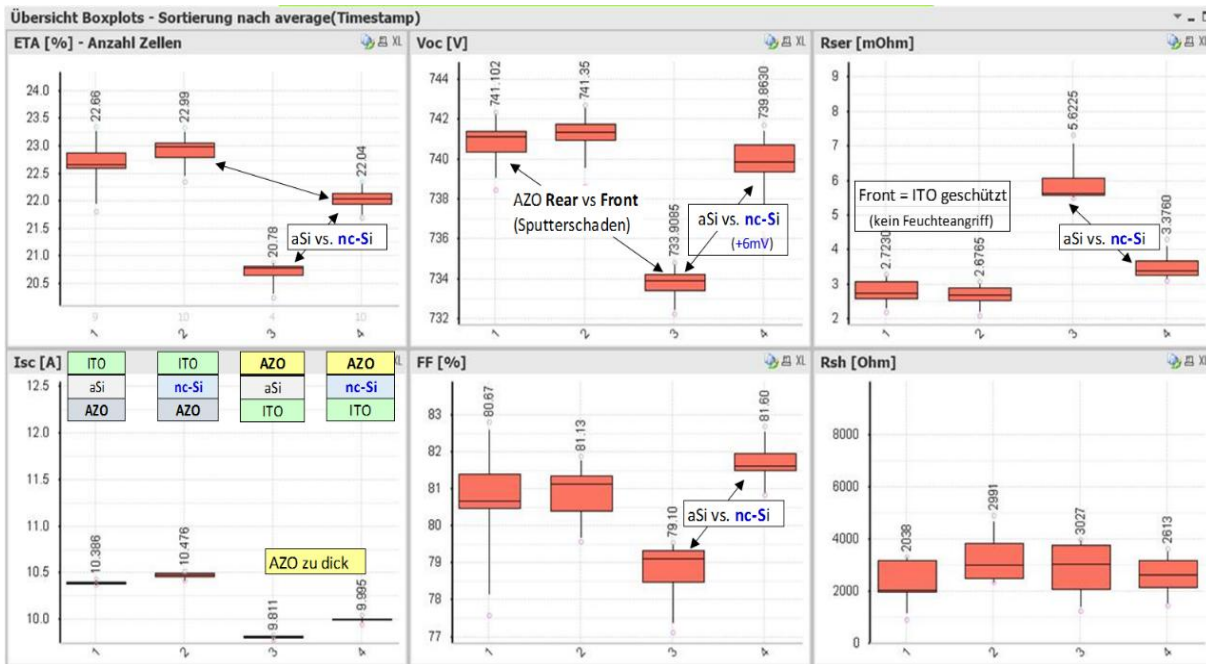


Abbildung 8: Zellergebnisse mit AZO auf der Vorder- oder Rückseite auf a-Si und nc-Si.

Zu den Zellversuchen wurden auch Untersuchungen am Rasterelektronenmikroskop (REM) durchgeführt, um die Homogenität der Beschichtungen auf den strukturierten Precursoren bewerten zu können. Abbildung 9 a) zeigt eine Übersicht der Probe, wobei keine Inhomogenitäten in der Beschichtung auffallen. Dies bestätigt auch die Detailaufnahme einer einzelnen Pyramide im Querschnitt (Abbildung 9 b)). Das AZO ist homogen über die gesamte Pyramide aufgewachsen.

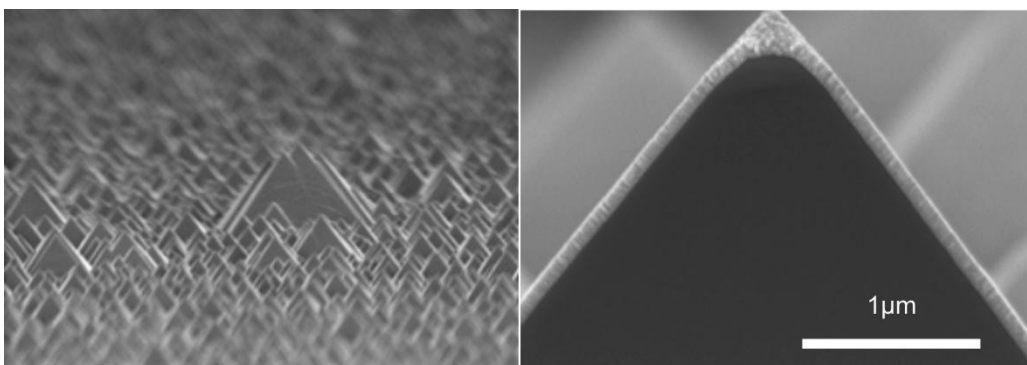


Abbildung 9: REM Aufnahmen an beschichteten SHJ Precursoren. a) Übersichtsaufnahme der Probe. b) Detailaufnahme einer einzelnen Pyramide im Querschnitt.

Nach der Übertragung der Ergebnisse an Jülich und Meyer-Burger und einer dortigen Optimierung der AZO Schichten wurden HJT Zellen mit einem Wirkungsgrad von über 24% erreicht. Bei den Solarzellen vom FZ Jülich wurden 85% des ITOs durch AZO ersetzt. Auf der Rückseite wurde das ITO vollständig ersetzt. Auf der Vorderseite braucht es für den guten elektrischen Kontakt noch eine Startschicht und eine Endsicht aus ITO. Bei MB wurde die komplette Rückseite des ITOs durch

AZO ersetzt. Die Zellen hatten dann nur 0,15% weniger Effizienz als die Referenzgruppe mit ITO. Somit wurde der Meilenstein 4.1 weitestgehend erfüllt.

AP4.2 Anwendung der Indium-freien TCO-Schichten als Grenzschicht in Silizium/Perowskit-Tandemsolarzellen

Entwicklung Perowskitsolarzelle

In AP4.2 wurde zum Test der TCOs ein Prozess für die Herstellung der Perowskitsolarzellen entwickelt. Dabei nutzen wir folgende Zusammensetzung des Perowskiten mit leichten Abweichungen im Mischungsverhältnis und der Lösungsansatzung: $\text{Cs}_{0.05}(\text{FA}_{0.77}\text{MA}_{0.23})_{0.95}\text{Pb}(\text{I}_{0.77}\text{Br}_{0.23})_3$. Abbildung 10 zeigt den Fortschritt der Effizienz während der Projektlaufzeit.

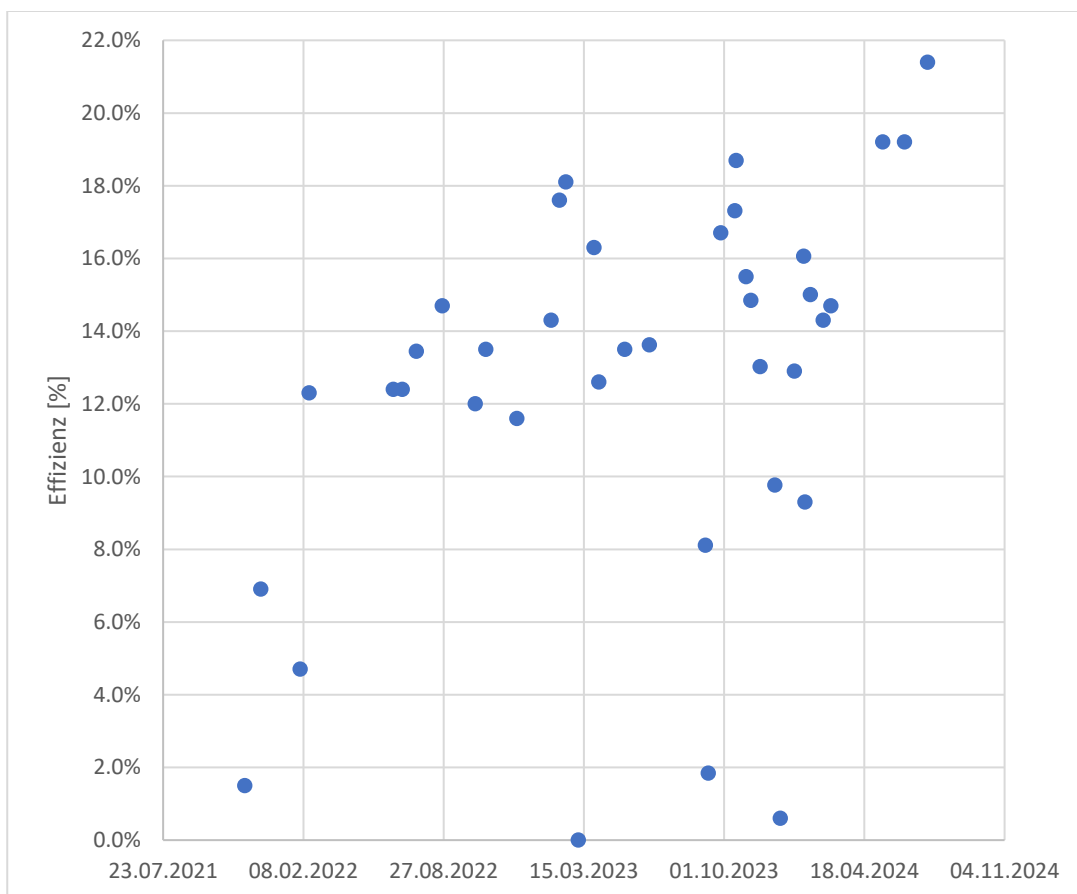


Abb. 10: Effizienz der Singlejunction Perowskitsolarzellen der einzelnen Chargen in Abhängigkeit der Zeit.

Dabei führten viele kleine Verbesserungen zu einer Effizienz von 21,4% am Ende des Projekts. Im Folgenden wird über die Hauptverbesserungen berichtet.

Im Jahr 2022 wurde die Effizienz auf 14,7% gesteigert. Das Lösungsmittel Isopropanol im Self-assembling-monolayer (SAM) wurde gegen Ethanol ersetzt, was die Benetzung des Perowskits deutlich verbessert. Die Waage zum Abmessen der Stoffmengen für die SAMs wurde auf eine Granitplatte gestellt, was die Genauigkeit der Waage deutlich erhöhte. Dies war besonders für die kleinen Mengen an SAMs Pulvern im Milligramm Bereich sehr entscheidend. Die Metallisierung

erfolgte zuvor in einer Aufdampfanlage außerhalb einer Handschuhbox, womit der Perowskit bereits vor der Fertigstellung der Zelle der Umgebungsluft ausgesetzt war und potentiell degradierte. Nach der Installation einer Aufdampfanlage in der Handschuhbox konnte der gesamte Solarzellenprozess unter Stickstoffatmosphäre erfolgen.

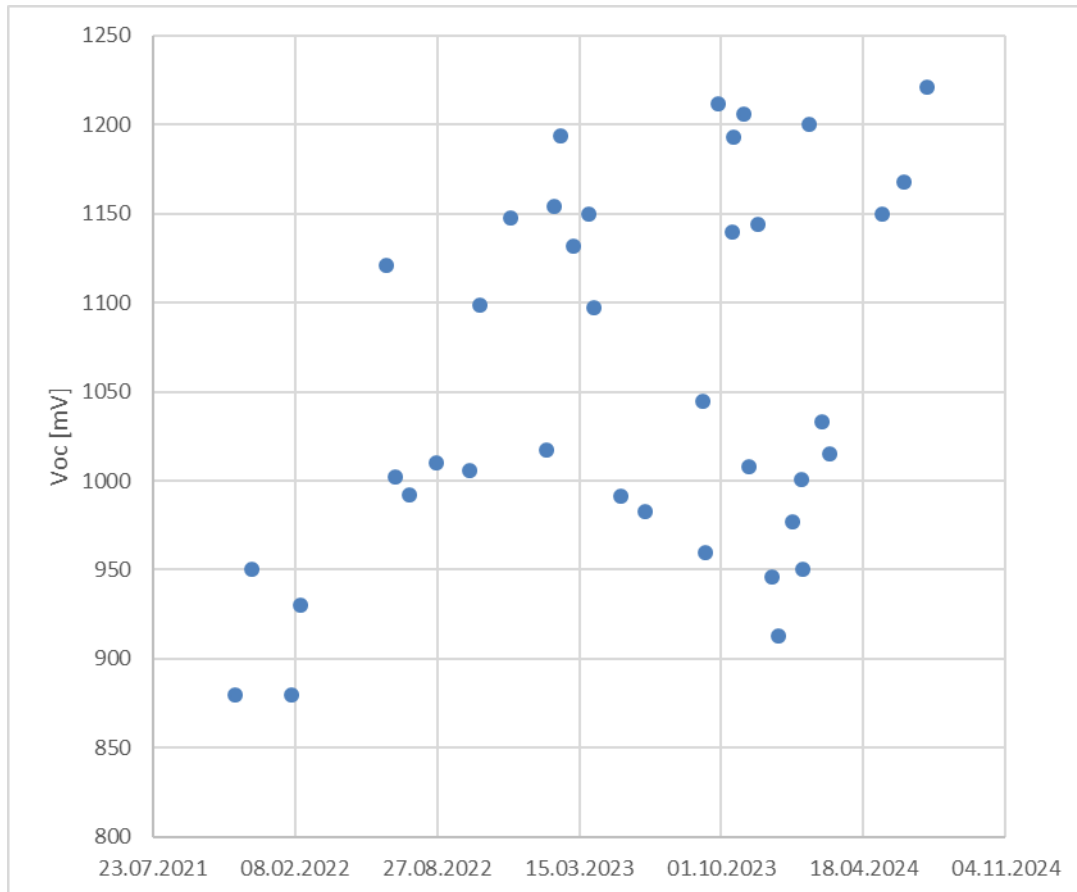


Abb. 11: Offene Klemmspannung der Singlejunction Perowskitsolarzellen der einzelnen Chargen in Abhängigkeit der Zeit.

Die Hauptverbesserung in der Effizienz kam durch die Steigerung im Füllfaktor (FF) und in der offenen Klemmspannung (V_{OC}). Die offene Klemmspannung konnte vor allem durch eine verringerte Rekombination durch das neue SAM mit Ethanol gesteigert werden und durch die Passivierung der Perowskit/ C_{60} Grenzfläche auf der Elektronentransportschicht (ETL) Seite. Am ISFH testeten wir dafür Piperazindiiodid. Dies wurde in Isopropanol gelöst und mit dem Spin-Coater auf die getemperte Perowskitschicht aufgebracht. Danach wurde wie bei der Referenz die ETL Schicht aufgebracht. Dies steigerte das V_{OC} in den Solarzellen bis auf 1148 mV im Vergleich zu ca. 1000 mV ohne Passivierschicht Ende 2022 (Abbildung 11). Die Passivierung der Grenzfläche war also erfolgreich. Gleichzeitig sank der FF und der Kurzschlussstrom J_{SC} , so dass keine Steigerung im Wirkungsgrad erfolgte.

Im Jahr 2023 wurde die Effizienz bis auf 18.1% gesteigert. Dabei wurde die Vorbehandlung der Lösungen optimiert. Unter anderem wurde die HTL Lösung mit MeO2-PACs zusätzlich zum Schütteln ins Ultraschallbad gestellt, damit sich die Chemikalie besser löst. Der FF konnte von 69,7% auf 75,3% und die offene Klemmspannung von 1010 mV auf 1135 mV gesteigert werden. Dies deutet auf eine deutliche Verbesserung der Selektivität der Kontakte hin.

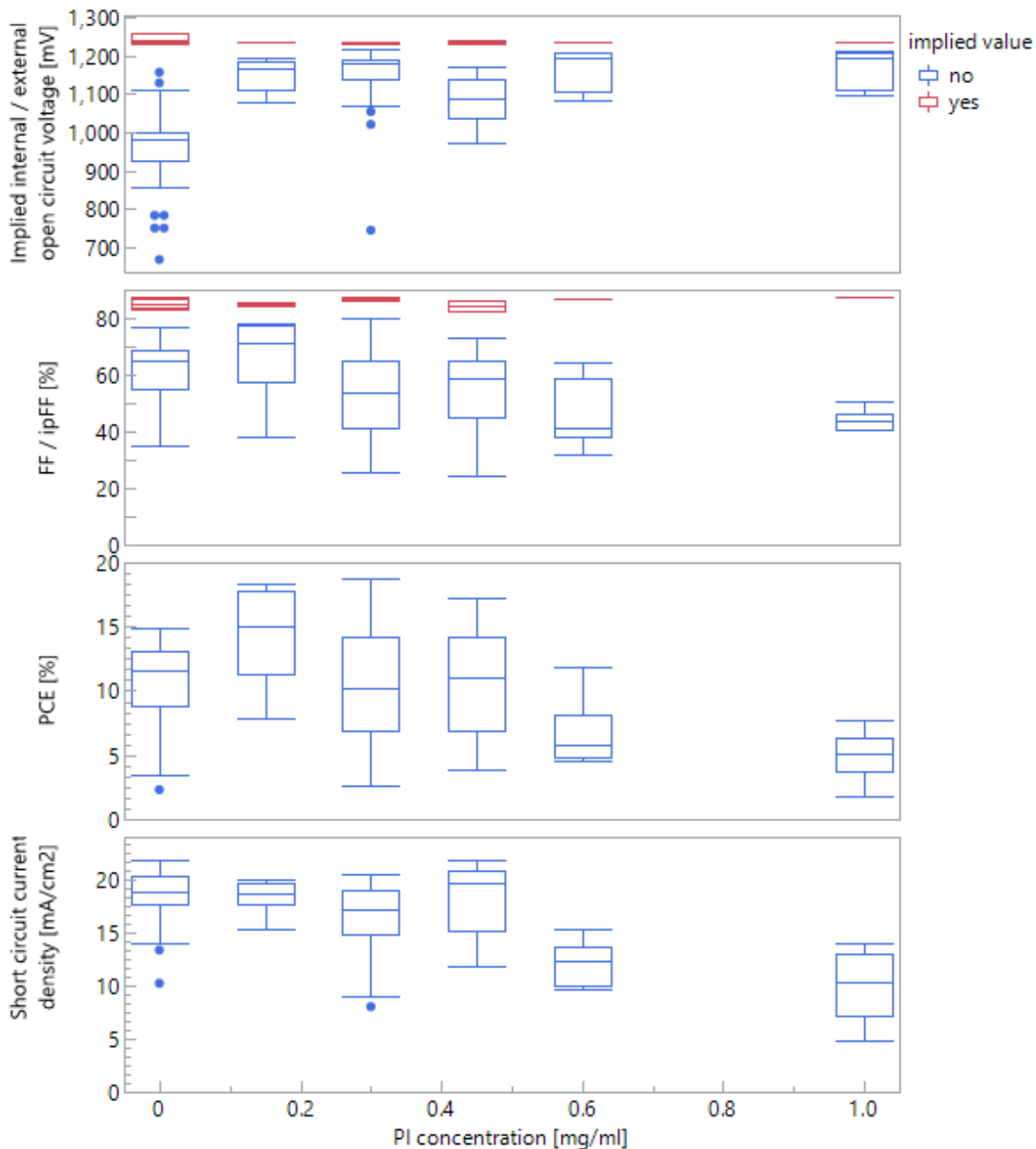


Abb. 12: Auswirkung der PI-Konzentration auf die implizite interne und externe Leerlaufspannung, FF und ipFF, Effizienz (PCE) und Kurzschlussstromdichte (J_{SC}). Die Daten zeigen die 75%-, 50%- und 25%-Perzentile sowie die Ausreißer. Insgesamt repräsentieren die Daten 114 Solarzellen.

Mit Piperazindiodid als Passivierschicht unter dem C_{60} konnte die offene Klemmspannung auf 1194 mV erhöht werden, allerdings reduziert die Piperazindiodid (PDI) den Stromtransport, wodurch der Wirkungsgrad auf 15,1% begrenzt war. Dagegen ermöglichte die Verwendung von Piperaziniiodid (PI) eine Solarzelle mit einem Wirkungsgrad von 18,7%. Dies wurde durch eine Optimierung der PI-Konzentration erreicht. Abb. 12 zeigt die Abhängigkeit der IV Parameter von der PI-Konzentration. Die externe Leerlaufspannung steigt von 980 mV Median (1150 mV max.) ohne PI auf 1170 mV Median (1200 mV max.) mit der niedrigsten PI-Konzentration von 0,15 mg/ml. Eine Erhöhung der PI-Konzentration hat keine Auswirkungen auf die externe V_{OC} , aber auf die J_{SC} - und FF-Werte. Während der FF von 65% ohne PI auf 70 % bei der niedrigsten PI-Konzentration ansteigt, sinkt er kontinuierlich auf 45% bei 1 mg/ml PI. Der J_{SC} -Wert bleibt bis zu einer PI-Konzentration von

0,45 mg/ml nahezu konstant bei etwa 19 mA/cm^2 und sinkt bei 1 mg/ml auf 10 mA/cm^2 . Damit erhöht sich der beste gemessene Wirkungsgrad von 14,9% ohne PI auf 18,7% mit 0,15 mg/ml PI.

Zur Analyse der Verluste messen wir die absolute Photolumineszenz (aPL) der Solarzelle. Die aus den aPL-Messungen extrahierte interne Quasi-Fermi-Level-Aufspaltung ergibt Werte für die implizierte Leerlaufspannung zwischen 1230 mV und 1260 mV unabhängig von der Verwendung von PI und der PI-Konzentration (Abb. 12). Bei den Referenzzellen besteht ein Defizit von 258 mV Median (123 mV max.) zwischen externer und interner V_{OC} . PI verringert den Spannungsverlust stark auf ein Defizit von 49 mV Median (17 mV min.) bis 150 mV Median in Abhängigkeit von der PI-Konzentration. Die implizierten Pseudo-Füllfaktoren, die aus den injektionsabhängigen aPL-Messungen gewonnen werden, liegen zwischen 83 % und 88 % und sind ebenfalls unabhängig von der Verwendung von PI und der PI-Konzentration. Dies bedeutet, dass der Potentialverlust nicht an der Grenzfläche selber auftritt (wie es bei gleichem internen und externen V_{OC} der Fall wäre), sondern ein Potentialgradient innerhalb der Ladungsträgerselektiven Schicht vorliegt.

Durch eine Variation des Zeitraums zwischen Ansetzen und Verarbeitung der Perowskitlösung wurde ein Optimum von ca. 1 Tag gefunden. Frisch verarbeitete Perowskitlösungen zeigten leicht schlechtere Ergebnisse und ältere Lösungen führten wiederum zu einer leichten Verschlechterung. Dabei spielte es keine Rolle, ob die darunter liegende SAMs Schicht schon einen Tag vorher oder frisch beschichtet wurde.

Im Jahr 2024 wurde die Effizienz auf 21,4% gesteigert. Dies wurde hauptsächlich durch die Veränderung des Perowskitabsorbers durch die Zugabe von Chlorid und durch die Passivierung der Perowskit/ C_{60} Grenzfläche mit Ethylenediammonium Diiodide ($EDAI_2$) erreicht. Die höchsten V_{OC} Werte lagen damit bei 1221 mV.

Entwicklung Perowskit-Silizium Tandemsolarzelle

Die Perowskitsolarzellen wurden in den verschiedenen Entwicklungsstadien auch in Perowskit-Silizium Tandemsolarzellen integriert, um das Indium freie TCO zu testen. Der Aufbau der Tandemsolarzelle ist in Abb. 13 gezeigt.

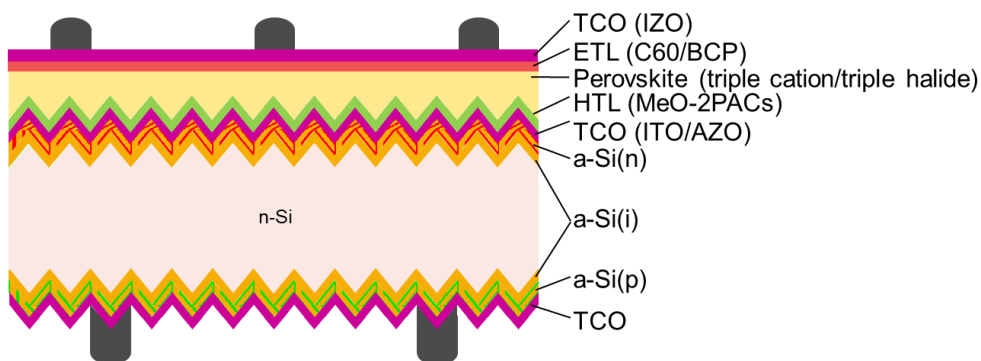
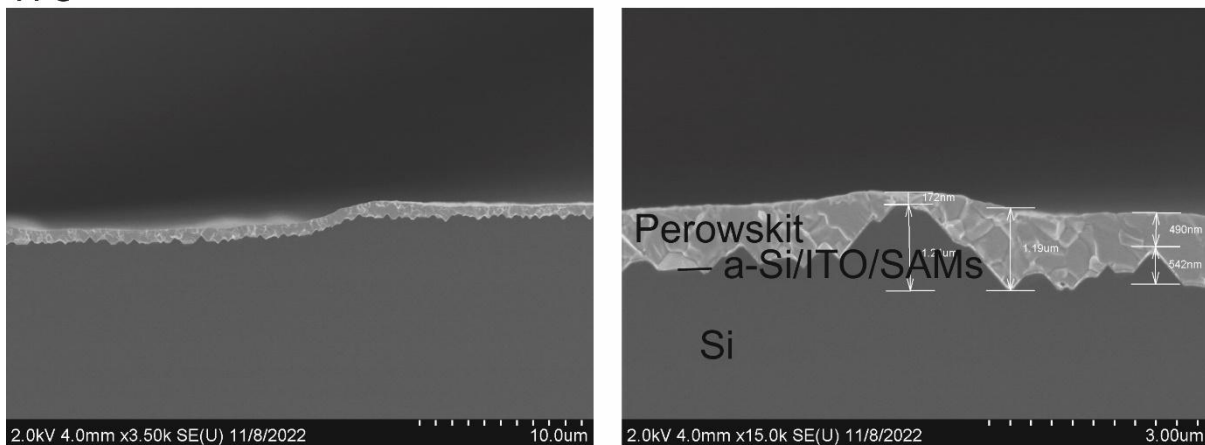


Abb. 13: Schematische Zeichnung des Aufbaus einer Perowskit-Silizium Tandemsolarzelle. Als Bottomsolarzelle wurden Solarzellenprecursoren von Meyer Burger bereitgestellt, die verschiedene TCOs auf Rück- und Vorderseite verwenden. Am ISFH wurde die TOP Solarzelle mit Frontkontakt hergestellt.

Als Bottomsolarzelle wurden Solarzellenprecursoren von Meyer Burger bereitgestellt. Diese hatten eine besonders kleine Texturierung der Oberfläche des Wafers, damit die dünne Perowskitschicht

die Pyramiden der Textur komplett bedeckt und eine geschlossene Schicht bildet, da andernfalls ein erhöhtes Risiko für Kurzschlüsse besteht. Um die Bottomzellen zu vervollständigen wurden die entsprechenden amorphen Siliziumschichten aufgetragen und mit einem TCO beschichtet. Es wurden Proben sowohl mit dem standardmäßigem ITO-Prozess von Meyer Burger hergestellt als auch mit indiumfreien AZO, das am ISFH prozessiert wurde. Die TCO Schichten wurden wahlweise mit Ozon behandelt. Anschließend wurde eine SAMs Schicht und eine Perowskitschicht mittels Spincoating aufgebracht. Abbildung 14 zeigt die Querschnitte der Proben aufgenommen mit dem REM. Die TCOs wurden in diesen Aufnahmen mit Ozon behandelt, was zu einer deutlich besseren Benetzung der Oberfläche führte. Wie in Abbildung 14 zu sehen ist, bedeckt die Perowskitschicht vollständig die Si-Oberfläche ohne Löcher bei ITO und AZO. Selbst Stufen, wie in der Übersicht links zu sehen, oder auch größere Pyramiden, wie rechts im Detail zu sehen, werden vollständig bedeckt. Ohne Ozon Behandlung bilden sich mehrere Löcher in der Perowskit Schicht.

ITO



AZO

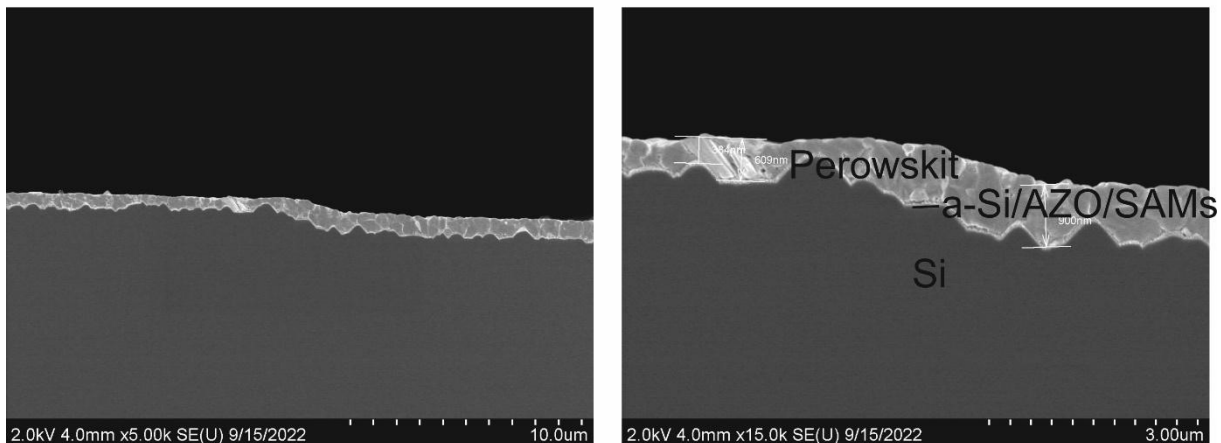


Abbildung 14: REM Aufnahmen von Perowskitschichten auf Silizium-HJT-Bottomzellen, oben mit ITO als Rekombinationsschicht und unten mit AZO als Rekombinationsschicht. Rechts jeweils eine Detailaufnahme.

Trotz der geschlossenen Schicht hatten die fertigen Tandemsolarzellen einen niedrigen Parallelwiderstand. Eine Analyse mit EL, PL und Dark-Lock-in-Thermographie (DLIT) ergab, dass sich die Kurzschlüsse meist im Randbereich unter der Metallisierung der Perowskitsolarzelle befinden. Die Front TCO Schicht war mit der Rekombinations TCO Schicht kurzgeschlossen. Zur Vermeidung dieses Kurzschlusses wurde auf das Rekombinations TCO ein isolierendes SiO₂ Pad

mittels PECVD aufgebracht. Dieses verhindert das Kurzschließen der Perowskitsolarzelle bei der Kontaktierung zur I-V Messung mit der Messnadel.

Als Rekombinations TCO Schichten wurde ITO und AZO bei Meyer Burger beschichtet. Nach der SiO_2 Pad Beschichtung wurden die TCO Schichten mit Ozon behandelt. Anschließend wurde eine SAM Schicht und eine Perowskitschicht mittels Spincoating aufgebracht. Danach wurde auf die Perowskitschicht C_{60} und BCP verdampft. Auf die Vorderseite wurde ein hochtransparentes und -leitfähiges IZO gesputtert. Die Schichtdicke wurde auf 40 nm reduziert, um die parasitäre Absorption zu verringern. Im Randbereich wurde die Zelle mit aufgedampftem Silber kontaktiert. Silberfinger leiten den Strom von der dünneren IZO Schicht mit niedrigen Widerstandsverlusten zum Randbereich. Im Zellbereich wurde für die optimale Lichteinkopplung ein 100 nm dickes MgF aufgedampft. Abbildung 15 zeigt eine Fotografie der fertiggestellten Tandemsolarzelle.



Abbildung 15: Fotografie der Vorderseite der HJT/Perowskit Tandemsolarzelle. Die Si-Bottomzelle ist $2,5 \times 2,5 \text{ cm}^2$ groß. Die aktive Tandemzellfläche innerhalb des Silberkontakts beträgt 1 cm^2 .

Abbildung 16 zeigt die IV-Kennlinien der bisher besten Tandemsolarzelle mit einer ITO Rekombinationsschicht. Der Kurzschlussstrom der Tandemsolarzelle beträgt ca. $21,5 \text{ mA/cm}^2$ und ist somit dank der texturierten Vorderseite und der damit einhergehenden Lichteinkopplung sehr hoch. Der Füllfaktor liegt bei 58,1% und ist damit deutlich niedriger als erwartet. Dies liegt an einer erhöhten Rekombination und an einem nicht idealen Stromtransport durch die ladungsselektiven Schichten. Die offene Klemmspannung betrug 1636 mV und die Effizienz 20.5%.

Abbildung 17 zeigt, die wellenlängenabhängige Reflektion, externe und interne Quanteneffizienz dieser Zelle. Die Reflektion der Solarzelle beträgt bis zu einer Wellenlänge von 900 nm weniger als 3% und unter 1000 nm weniger als 6%. Die Quanteneffizienzanalyse der Tandemsolarzelle zeigt, dass beide Zellen ihren Beitrag leisten. Die Perowskitsolarzelle hat eine Quanteneffizienz von ca. 0.8 und erreicht damit noch nicht das vollständige Potential. Die niedrigen Werte der Quanteneffizienz der Perowskitsolarzelle im langwelligen Bereich jenseits der Bandlücke zeigen aber auch, dass diese einen sehr hohen Parallelwiderstand haben und somit praktisch alle Kurzschlüsse beseitigt werden konnten.

Die Effizienz der Tandemsolarzelle ist durch die der Perowskitsolarzelle limitiert. Die offene Klemmspannung der Perowskitsinglejunction Solarzelle, welche zusammen mit der Tandemsolarzelle hergestellt wurde, beträgt ca. 950 mV. Bei der HJT-Bottomsolarzelle konnte mit Suns- V_{OC} eine offene Klemmspannung von ca. 720 mV gemessen werden. Aus der Summe dieser

beiden Spannungen ergibt sich eine offene Klemmspannung von ca. 1660 mV. Diese Spannung ist der gemessenen offenen Klemmspannung der Tandemsolarzelle von 1636 mV sehr nahe und zeigt, dass hier kaum Verluste entstehen. Die Verlustmechanismen sind für beide Zellen identisch und resultieren aus dem Unterschied der externen und internen Spannung.

Mit den verbesserten Perowskitsolarzellen und der Passivierung mit EDAI_2 konnte eine offene Klemmspannung von 1744 mV erreicht werden. Damit ist der Meilenstein „Die offene Klemmspannung einer Perowskit/Silizium Tandemsolarzelle mit einer vollflächigen TCO-Beschichtung und einer Absorberbandlücke von min 1,65 eV im Perowskit ist größer als 1,7 V.“ erreicht. Bei der Tandemsolarzelle wurde das ITO auf der Vorder- und Rückseite der Bottomsolarzelle durch AZO vollständig ersetzt. Lediglich das TCO auf der Oberseite des Perowskiten besteht noch aus IZO. Somit wurde 70% weniger Indium verbraucht als bei einer Solarzelle mit ITO für alle TCO Schichten. Abbildung 18 zeigt, dass die offene Klemmspannung ohne EDAI_2 ca. 60 mV niedriger liegt. Wenn ITO anstatt AZO als Rekombinationsschicht verwendet wird, sinkt die offene Klemmspannung bei den meisten Zellen deutlich weiter ab bis im Extremfall fast die komplette Perowskitsolarzelle kurzgeschlossen ist. Mit EDAI_2 liegt die höchste gemessene V_{OC} bei 1722 mV. Die lokalen Parallelwiderstände aller 4 Gruppen sind ähnlich. Die Flächenwiderstände sind beim ITO aber deutlich geringer, womit ein lokaler Parallelwiderstand deutlich besser an die Solarzelle angeschlossen ist, wohingegen bei einem hohen Flächenwiderstand im AZO ein lokaler Parallelwiderstand besser isoliert wird und sich somit nicht so deutlich auf die Kennlinie der Solarzelle auswirkt. Somit erklärt sich auch die große Streuung der offenen Klemmspannung bei der Variation ITO mit EDAI_2 , die wegen geringer Stückzahl von 2 bei der Variation ITO ohne EDAI_2 nicht auftaucht.

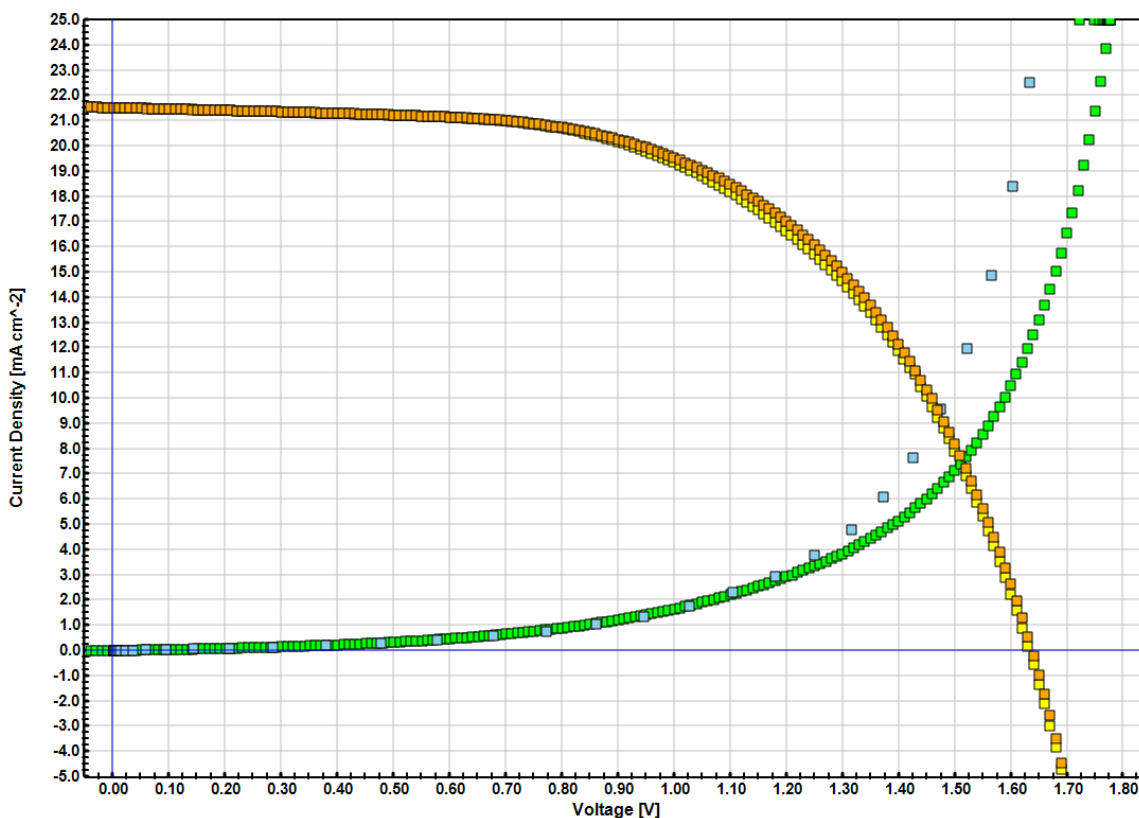


Abbildung 16: IV-Kennlinien der Tandemsolarzelle. Orange und gelb: Hellkennlinie vorwärts und rückwärts gemessen, grün: Dunkelkennlinie und blau $I_{sc}V_{oc}$ Kennlinie.

Der Wirkungsgrad der besten Perowskit-Siliziumsolarzelle beträgt 21% und ist durch den geringen Füllfaktor von 62% limitiert. Grund dafür sind Stromtransportprobleme, da der pFF bei 82% liegt und somit die Rekombination oder Kurzschluss kein Problem zu sein scheint. Die pseudo Effizienz der Solarzelle liegt bei 27,7%.

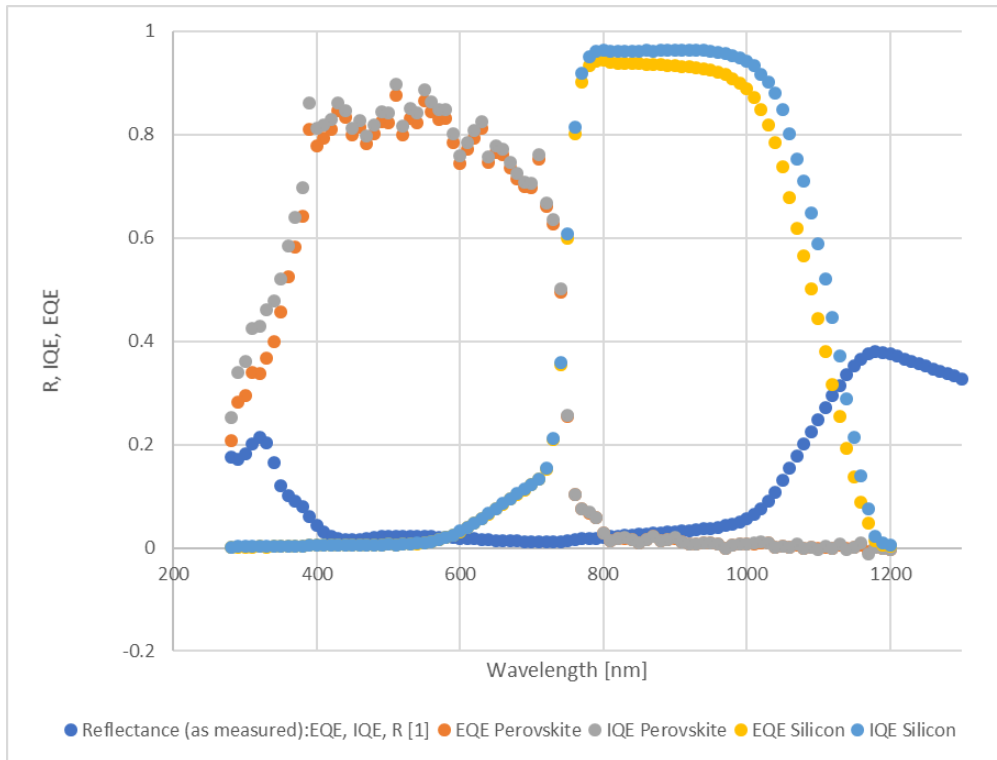


Abbildung 17: Wellenlängenabhängige Reflektion und interne und externe Quanteneffizienz der Tandemsolarzelle und deren Aufteilung.

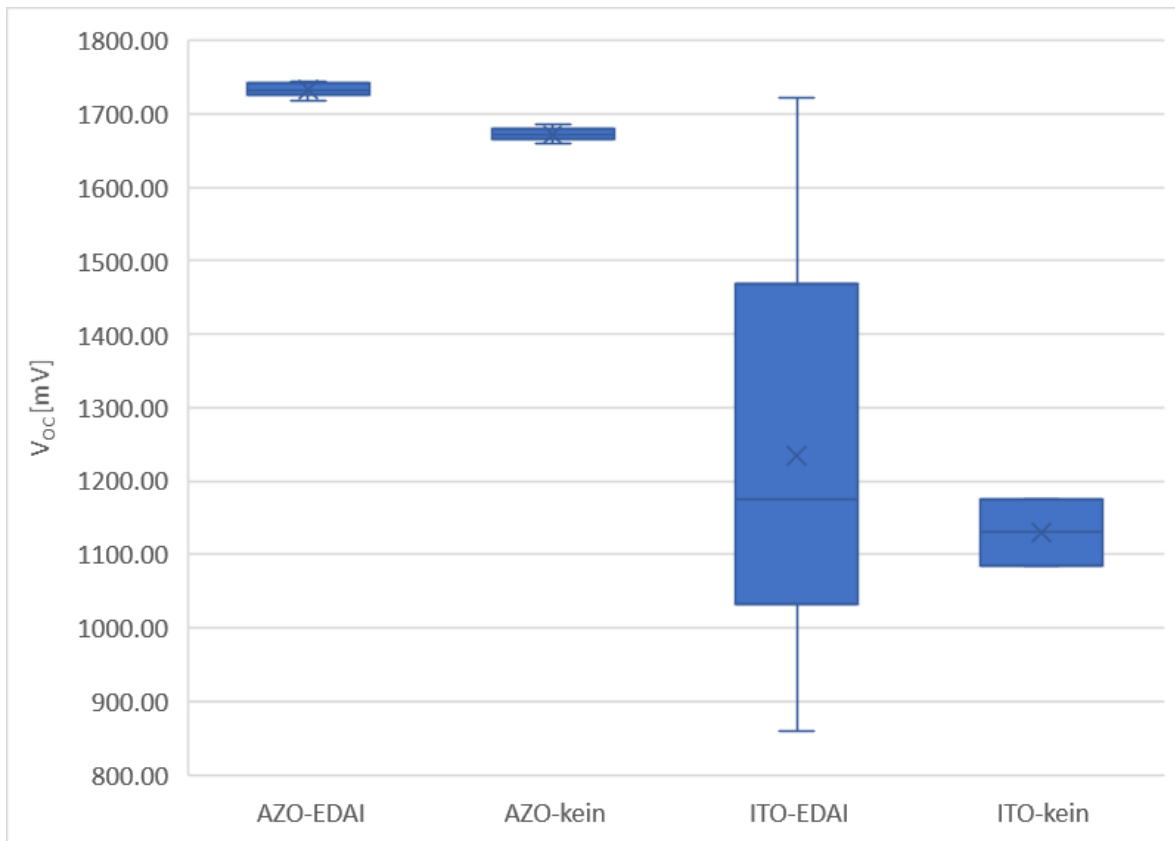


Abbildung 18: Offene Klemmspannung der Perowkit-Silizium Tandemsolarzellen in Abhängigkeit des TCOs und der Passivierung der Perowskit/C60 Grenzfläche mit EDAI_2 . Jede Variation umfasst 6 Solarzellen bis auf die Variation ITO-kein (2 Solarzellen).

AP4.3 Anwendung der Indium-freien TCO-Schichten als Fensterschicht auf Silizium/Perowskit-Tandemsolarzellen

In AP4.3 wurde ein IV-Tester in einer Handschuhbox aufgebaut, um Perowskitsolarzellen in sauerstoff- und wasserarmer Stickstoffatmosphäre messen zu können. Die Planung, Aufbau des Messplatzes und Programmierung der Messsoftware wurde intern am ISFH durchgeführt.

Nach erfolgreichem Test außerhalb der Handschuhbox wurde der IV-Tester in die Handschuhbox integriert (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** 19). Die Lichtquelle liegt dabei unterhalb der Handschuhbox. Somit musste ein Loch durch den Boden gebohrt werden, welches mit einer transparenten Scheibe versehen wurde, um die Stickstoffatmosphäre innerhalb der Handschuhbox zu gewährleisten. Die Messgeräte und der Computer stehen ebenfalls außerhalb der Handschuhbox. Dafür mussten die Kabel von innen nach außen geführt werden. Anfängliche Undichtigkeiten an Kabeldurchführungen wurden erfolgreich abgedichtet. Der IV-Tester wurde auch innerhalb der Handschuhbox erfolgreich getestet. Somit können nun die Solarzellen unter Ausschluss der atmosphärischen Einflüsse gemessen werden. Der IV-Tester wurde in über 50 Chargen genutzt und trug dazu bei, den Fortschritt der Perowskitsolarzellen unabhängig von Degradation durch die normale Atmosphäre beurteilen zu können. Er wird nach Projektende auch das Standardtool für die Charakterisierung der Perowskitsolarzellen in allen ISFH Projekten mit Perowskiten sein.

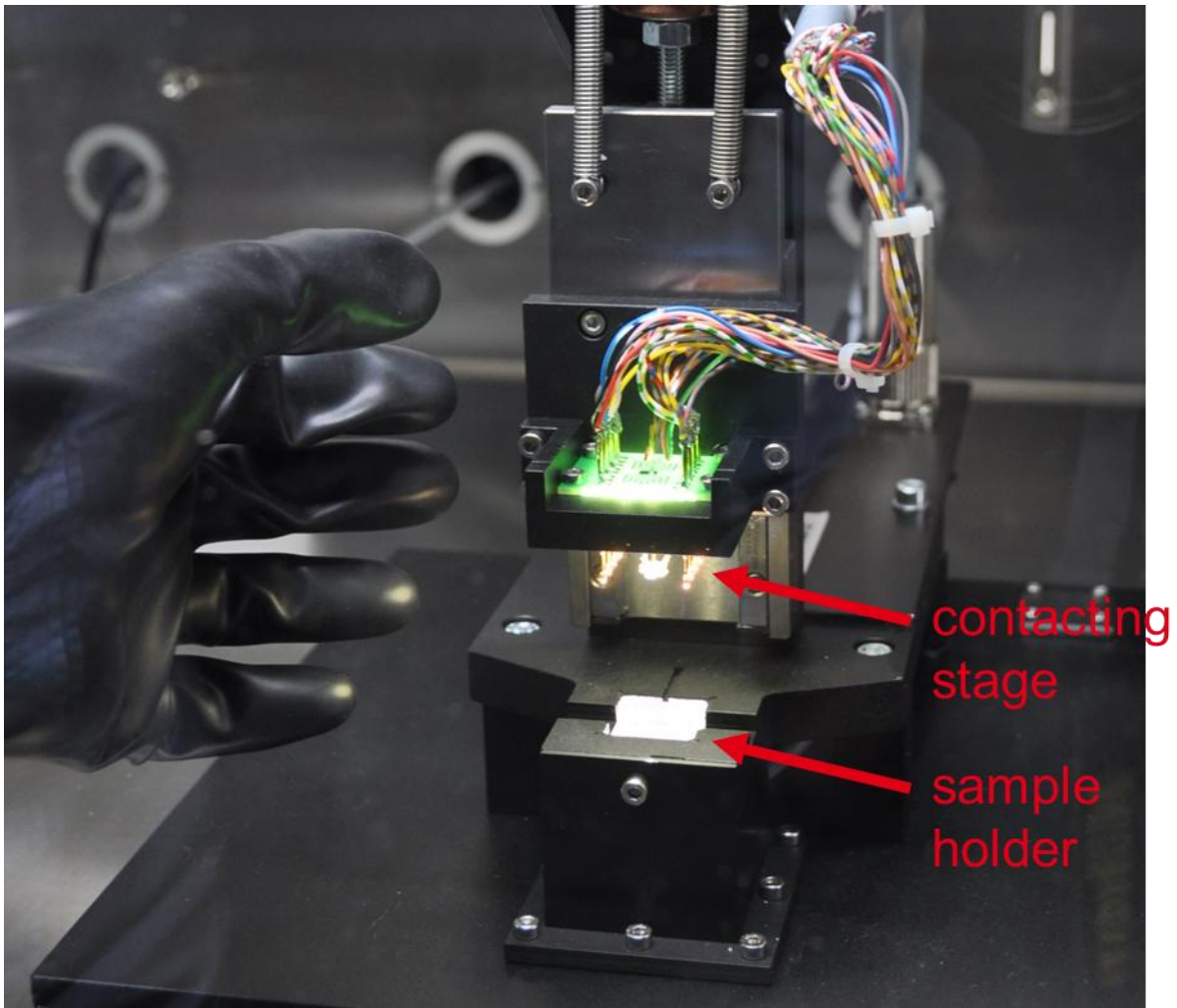


Abbildung 19: Aufbau IV-Tester für die Messung von Perowskitesolarzellen in der Handschuhbox unter Stickstoffatmosphäre.

AP5 Direkte Kontaktierung der TCOs der Solarzellen

AP5.1 Kontaktierung von TCOs metallfreier Solarzellen

Zur Kostenreduktion von Heterojunction (HJT)-Solarzellen soll das Metallgitter aus Silber, zunächst nur auf der Vorderseite der Zellen, weggelassen werden. Dafür ist bei der Verschaltung der Zellen zum Modul ein niedrigohmiger elektrischer Kontakt von lotummantelten SmartWire-Drähten zum TCO der Heterojunction-Zellen notwendig. Der flächengewichtete Kontaktwiderstand soll $25 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ bei 4 Drähten je Zentimeter Zellbreite nicht überschreiten

Ohne Optimierung zeigt sich, dass der flächengewichtete Kontaktwiderstand zwischen Draht und TCO (hier zinndotiertes Indiumoxid, kurz ITO) bei 4 Drähten pro Zentimeter mit $600\text{--}700 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ über eine Größenordnung zu hoch ist, sodass ein zu großer serieller Widerstandsbeitrag entsteht. Mit diesem hohen Kontaktwiderstand ist der Füllfaktor auf 70% limitiert. Dies wurde in Simulationen, sowie durch die Herstellung von Modulen mit siebdruckfreien Zellen nachgewiesen.

In diesem Arbeitspaket sollte dieser Widerstand reduziert werden, um eine serienwiderstandsarme Verschaltung der HJT Solarzellen zu realisieren.

Während des Projekts wurde dafür eine Vielzahl von Experimenten durchgeführt. Es folgt eine Übersicht der durchgeführten Versuche, sowie zum Abschluss eine mögliche Erklärung, warum die notwendige, signifikante Verbesserung nicht erreicht wurde.

1. Variation des zugeführten Sauerstoffs zur Änderung der Dotierung und Ladungsträgerkonzentration sowie Beweglichkeit
 - ➔ Minimale Reduktion des Kontaktwiderstands von Draht zu ITO mit höherer Dotierung von $600 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ auf $450 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$. Dabei ist der höchst-dotierten Schicht die Absorption bereits signifikant erhöht mit einem Verlust in der Kurzschlussstromdichte von 1 mA/cm^2 . Höhere Dotierungen waren technisch nicht möglich, ohne zu noch höhere Absorptionsverluste zu führen.
2. Kontaktwiderstand zu aluminiumdotierten Zinkoxid (AZO)
 - ➔ Obwohl AZO Schichten grundsätzlich geringere Leitfähigkeiten und Dotierkonzentrationen aufweisen, wurde der Kontaktwiderstand von Drähten zu AZO geprüft. Wie zu erwarten ist der Kontaktwiderstand jedoch gering und um eine Größenordnung auf $10 \text{ }\Omega\text{cm}^2$ erhöht.
3. Variation des Lotmaterials. Für SWCT Technologie sind niedrigschmelzende Lote notwendig, da der Kontakt während der Lamination ausgebildet wird. Dabei werden Temperaturen von 175°C nicht überschritten. Damit stehen nur SnIn und SnBi basierte Legierungen zur Verfügung.
 - ➔ Es wurden folgende Lotvariationen getestet: SnBi, SnBiAg, SnBiAgNiGe, SnBiAg mit geringerer und höherer Lotaufgabe, SnIn. Keine der Variationen hat einen messbaren Einfluss auf den Kontaktwiderstand.
4. Es wurde zudem getestet, ob der Probenaufbau einen Einfluss hat. Standardmäßig wurden Minimodule mit Glas-Backsheet und Polyolefin (POE) als Laminationsmaterial hergestellt. Das Modul-Layup (vom Laminator) ist folgendermaßen: Glas, POE, SWCT, Zelle, POE, BS
 - ➔ Die Reihenfolge des Modul-Layups wurde geändert, z. B. wurde SWCT und Zelle getauscht, sodass das in der Lamination flüssige Lot durch Gravitation nach unten auf die Zelle fließen kann. Das hat ebenso wie das Weglassen von der Laminationsfolie, der Verwendung von Glas auf der Rückseite und ein vollständiges

Drehen der Layups in der Lamination keine positiven Einfluss auf den ausgebildeten Kontakt. Ebenso führen höhere oder niedrigere Laminationstemperaturen, längere oder kürzere Laminationszeiten zu keiner Verbesserung.

5. Vorversuche haben gezeigt, dass dünne, gesputterte Silberschichten die Kontaktierung verbessern können.

➔ Rasterelektronenmikroskop (REM) Aufnahmen zeigen, dass bei hohen Durchlaufgeschwindigkeiten und geringen Sputterleistungen sich keine geschlossene Silberschicht bildet, sondern Inselwachstum stattfindet. Diese verhalten sich optisch wie eine dielektrische Schicht und sind sehr transparent. Allerdings ist auch der Einfluss auf den Kontaktwiderstand gering. Erst wenn eine geschlossene Schicht aufgetragen wird, was durch eine hohe Absorption bei optischen Messungen detektierbar ist, kann der Kontaktwiderstand auf $300 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ verbessert werden. Dies ist jedoch immer noch eine Größenordnung über dem Zielwert und aufgrund der schlechten optischen Eigenschaften nicht geeignet

6. Behandlung der Oberfläche. Für einen die Ausbildung eines Kontakts mit geringem Widerstand ist es vorteilhaft, wenn Oberflächenenergie des zu kontaktierenden Materials höher ist als die Oberflächenspannung des Lots [1]. Bei ITO ist die Oberflächenenergie allerdings um 2 Größenordnungen geringer als die Oberflächenspannung von Lot [2, 3]. Dies ist eine mögliche Erklärung für die schlechte Kontaktierung. Aus der Literatur gibt es Methoden, die Oberflächenenergie von ITO zu erhöhen [4].

➔ In Tabelle 1 sind die durchgeführten chemischen und plasmabasierten Ätzprozesse aufgelistet. Keine der Behandlungen führt zu einer Verbesserung des Kontaktwiderstands.

Tabelle 1: Durchgeführte Experimente zur Verbesserung der Oberflächenenergie von ITO

Oberflächenbehandlung	Parameterbereich	Dauer
Wasserstoff-Plasma	Leistung: 125 – 300W, Temperatur: 150 – 350°C, Gasfluss: 25 – 100%	2 – 30 Minuten
Stickstoff-Plasma	Leistung: 125 – 300W, Temperatur: 150 – 350°C, Gasfluss: 50 – 100%	5 – 30 Minuten
Phosphorsäure	Konzentration: 5 %, Temperatur: 25 – 50°C	2 – 10 Minuten
Salzsäure	Konzentration: 0.5%, Temperatur: 25°C	30 – 300 Sekunden
Aceton	Reinigung im Ultraschallbad und ohne	5 – 10 Minuten
Isopropanol	Reinigung im Ultraschallbad und ohne	5 – 10 Minuten

7. Anpassung der Oberflächengeometrie. Führen unterschiedlich starke Texturierungen oder planare Oberflächen zu einer Änderung des Kontaktierungsverhaltens?

➔ Es wurden Proben mit Texturgrößen von 3 bis 5 μm , 1 bis 3 μm , <1 μm und polierte Oberflächen verglichen. Es ist kein Einfluss auf den Kontaktwiderstand messbar, obwohl erwartbar wäre, dass bei texturierten Proben die Kontaktfläche vergrößert wird.

8. ITO-Schichten auf Glas

- Da die bisherigen Versuche zu keiner Verbesserung geführt haben, wurden hochdotierte Schichten auf ITO Gläsern getestet. Diese werden bei hohen Temperaturen $>500^{\circ}\text{C}$ hergestellt und sind somit nicht geeignet für HJT Solarzellen.

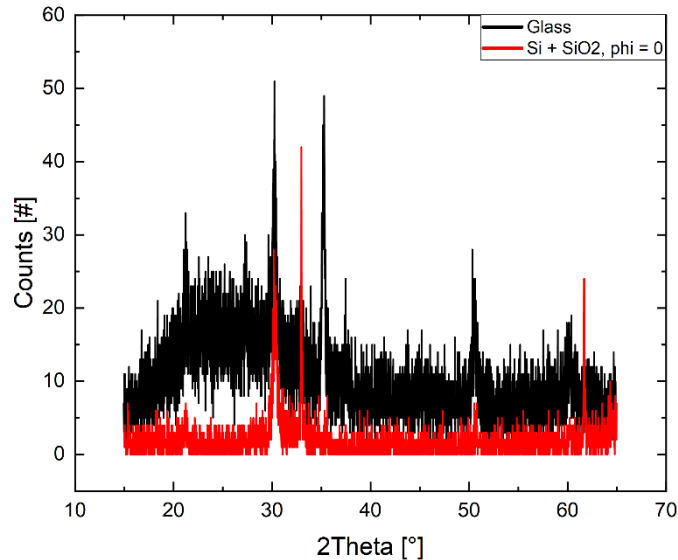


Abbildung 20: Messung der Kristallorientierung von ITO abgeschieden auf Glas (Schwarz) und auf Silizium (rot).

Allerdings bieten sie deutlich verbesserte elektrische Eigenschaften. Die Messung der Kontaktwiderstände zeigt, dass hier Kontaktwiderstände von $10 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ erreicht werden können, allerdings mit Schichtwiderständen von $7 \text{ }\Omega/\text{sq}$ und $15 \text{ }\Omega/\text{sq}$. Basierend auf diesen guten Ergebnissen wurden von FZJ „Standard“-ITO Schichten auf Glas abgeschieden ($R_{\text{Sheet}} = 40 \text{ }\Omega/\text{sq}$). Auch zu diesen Schichten wurden Kontaktwiderstände im Bereich von $20 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ gemessen, obwohl die gleichen Prozessparameter wie für die Schichten auf Siliziumproben verwendet wurden. Messungen der Kristallstruktur der Schichten auf Silizium und Glas zeigen, dass sich bei Glas eine zusätzliche Kristallorientierung bildet (s. Abbildung 20). Der Peak bei 35° kann der ITO Kristallorientierung 400 zugeordnet werden. Diese hat bessere elektrische Eigenschaften als die 222 Phase (bei 30°) [5]. Die 222 Phase ist die einzige Kristallorientierung von ITO, die sich auf Siliziumsubstraten ausbildet.

9. Anpassung der Kristallstruktur auf Silizium zur Ausbildung der 400 Phase

- Der Grund, warum der Kontakt von Drähten zu ITO auf Glas besser ist als zu ITO auf Silizium, liegt an der unterschiedlichen Kristallorientierung. Mehrere Hypothesen, warum sich die verschiedenen Phasen ausbilden wurden überprüft. Zum einen wurde getestet, ob die Beschichtungstemperatur einen Einfluss hat. Der Sputterprozess führt bei den $150 \text{ }\mu\text{m}$ dünnen Si Wafern zu einer starken Erhöhung der Temperatur. Das ist bei den Gläsern mit 1.1 mm Dicke nicht zu erwarten. Es wurden ITO-Schichten bei Raumtemperatur, bei 200°C (Standard) und bei 400°C abgeschieden. Allerdings führen kalte Temperaturen lediglich zu einer Verschlechterung des Kontakts. Höhere Temperaturen führen zu keiner Verbesserung des Kontaktwiderstands. Die zweite Hypothese ist, der Unterschied durch das amorphe Glas gegenüber dem kristallinen Silizium bedingt wird. Dafür wurden SiO_2 auf Siliziumwafern abgeschieden, um eine amorphe Oberfläche auf

Silizium zu generieren. Allerdings ist auch hier kein Unterschied zu erkennen. Als letztes sollte überprüft werden, ob die Unterschiede durch Aufladung der Substrate während der Beschichtung die Orientierung beeinflusst. Glas als nicht leitfähiges Material kann sich während des Sputterprozesses, elektrisch aufladen. Da die Ladungen nicht abgeführt werden können, bildet sich ein elektrisches Potential, dass das Schichtwachstum potentiell beeinflusst. Diese Hypothese sollte sich auch durch das thermisch aufgewachsene SiO_2 prüfen lassen, da dieses nicht elektrisch leitfähig ist. Allerdings konnte auch hier keine Verbesserung des Kontaktes und der Kristallinität erreicht werden. Es wurde die Möglichkeit geprüft, die Siliziumsubstrate einem externen elektrisches Potential auszusetzen, um die Aufladung des Glas zu simulieren. In der Literatur sind auch Hinweise zu finden, dass sich durch Anlegen eines DC Potentials die Kristallorientierung verändern lässt [6]. Bei den Projektpartnern konnte jedoch keine Anlage gefunden werden, die so einen Versuch zulassen würde.

10. Ultradünne Silberschichten. Im Rahmen des Projekts wurde Beschichtungen bei einem externen Partner in Auftrag gegeben, die wenige Nanometer Dicke Silberschichten produzieren. Der Prozess erreicht sehr gute Schichtwiderstände ($1\text{-}5\ \Omega/\text{sq}$) bei weiter hoher Transmission. Da diese Schichten typischerweise sehr schnell korrodieren werden sie mit einem Cappinglayer aus ZnO vor Sauerstoff und Feuchtigkeit geprüft. Es ist möglich diese Schichten mit Drähten zu kontaktieren. Abbildung 21 zeigt die Kontaktwiderstände. Für die blanken Silberschichten kann grundsätzlich ein guter Kontakt erreicht werden mit Kontaktwiderständen von bis zu $0.6\ \text{m}\Omega\text{cm}^2$. Allerdings degradieren die Schichten ohne Capping während des Transports oder während der Prozessierung so stark, dass 2 Kontakte sehr hohe Widerstände haben und 6 von 10 Kontakten überhaupt nicht mehr messbar sind. Im Gegensatz dazu sind für die Schicht mit Capping alle Kontakte messbar und es wird ein Widerstand von $(8.5 \pm 0.1)\ \text{m}\Omega\text{cm}^2$ erreicht.

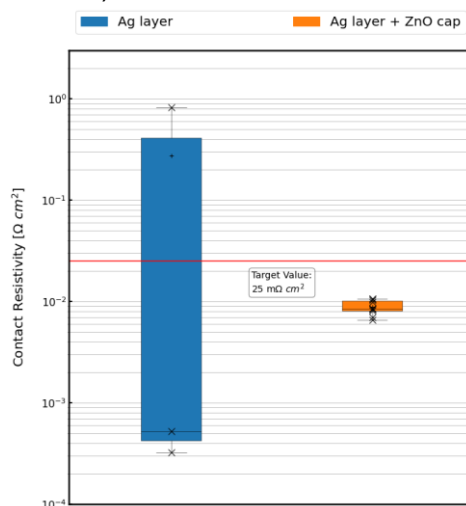


Abbildung 21: Kontaktwiderstände von lotummantelten Drähte zu ultradünnen Silberschichten. Mit (orange) und ohne (blau) ZnO Cap.

Mit dieser Auflistung haben wir dargelegt, warum zu ITO, dessen Beschichtung für die Massenproduktion in der PV ausgelegt ist, mit Drähten kein ausreichender geringer Kontaktwiderstand erreicht werden kann. Es wurde allerdings im Rahmen des TOP Projekts ein

Schichtsystem ermittelt, zu dem sich bei deutlich verringertem Silberverbrauch ein guter Kontaktwiderstand bei niedrigem Schichtwiderstand erreichen lässt.

Es wurden Zellen mit Ag + ZnO Doppelschicht auf beiden Seiten hergestellt, um die verlustarme Integration ins Modul nachzuweisen. Diese Schicht konnte im Rahmen des Projekts nicht mehr auf den Kontakt zur Zelle sowie die optischen Eigenschaften optimiert werden. Die Zellen haben eine Größe von $2.2 \times 4.8 \text{ cm}^2$. Es wurden 5 Module hergestellt. Modul 1 und 2 bestehen aus einer einzelnen Solarzelle, für Modul 3 wurden zwei Solarzellen in Reihe geschaltet. Module 5 und 6 sind auf die gleiche Größe zugeschnittene Standard Heterojunction Zellen mit Metallisierung auf Vorder- und Rückseite als Referenz. Randverluste sind zum Beispiel bei der kleineren Zellfläche verstärkt. Die I-V Daten sind in Tabelle 2 aufgelistet. Der geringe Füllfaktor liegt vermutlich am nicht optimierten Kontakt der Schicht zu der Solarzelle. Messungen auf Zellebene im I-V Tester ergeben Füllfaktoren von ~40%. Das liegt vermutlich an der schlechten Kontaktierung der Schichten, gerade zu dem Messingtisch auf der Rückseite. Leitsilber und eine gesputterte Silberschicht wurde auf der Rückseite von einigen Zellen aufgetragen, um den Rückseitenkontakt zu verbessern. Auch hier liegen die Füllfaktoren der Zellen unter den Modul-Füllfaktoren mit 55% und 59%. Aus diesem Grund vermuten wir, dass der Kontakt durch den Übergang von Metallisierung zur Ag + ZnO Schicht limitiert wird. Aus diesen Gründen ist es nicht möglich, den limitierenden Kontakt (Ag + ZnO Schicht zur Zelle vs. Draht zu Ag + ZnO Schicht) festzustellen. Trotz allem erscheint es eine siebdruckfreie Verschaltung der Zellen mit der beschriebenen Doppelschicht ohne größere Verluste machbar zu sein. Der Vergleich mit den metallisierten HJT Solarzellen der gleichen Größe zeigt, dass die Effizienz und der Füllfaktor bei der kleine Zellen limitiert ist.

Tabelle 2: I-V Daten von siebdruckfreien mit ultradünner Ag Schicht als TCO

	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF (%)	Efficiency (%)
Module 1	30.2	689.3	61.68758	12.7
Module 2	29.8	690.6	67.82851	13.8
Module 3+4	30.2	1379.6	65.47475	13.5
Module 5	37.1	734.9	73.74	20.1
Module 6	37.0	738.9	72.88	19.9

AP5.2 Messung von metallfreien Heterojunction Solarzellen

Solarzellen müssen zur Kontrolle bei der Produktion sowie zur Überprüfung von optimierten Produktionsverfahren charakterisiert werden. Dafür wird insbesondere die Strom-Spannungskennlinie genutzt. In diesem Arbeitspaket wurden die bekannten und etablierten Messmethoden überprüft, ob sie für metallfreie Zellen mit deutlich verringerter lateraler Leitfähigkeit und höheren Kontaktwiderständen weiterhin geeignet sind.

Es wurden HJT Solarzellen ohne Metallisierung auf der Vorderseite mit unterschiedlich dotierten ITO-Schichten und entsprechend unterschiedlichen Schichtwiderständen an zwei verschiedenen Messsystemen gemessen. Das LOANA Messsystem verfügt über 12 Messleisten zur Stromextraktion und 2 Sense Kontakten für die Spannung. Der PASAN SpotLight Tester hat 30

Drähten zur Stromextraktion und 5 Spannungs-Sense Kontakte. Dabei wurden signifikante Unterschiede im Füllfaktor gemessen wie in Abbildung 22 gezeigt ist.

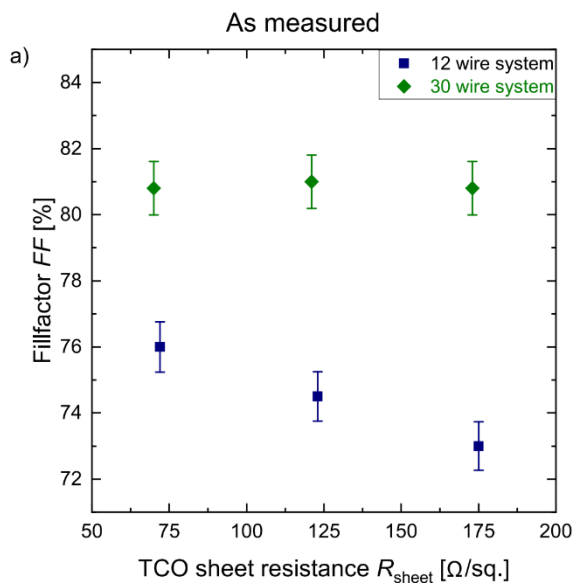


Abbildung 22: Unterschiede der Füllfaktor Messung

Es wurden Simulationen mit dem kommerziellen Tool Quokka3 durchgeführt, um die Ursache der Unterschiede zu ermitteln. Dabei wurde ein hoher Einfluss des Abstands der Messleisten und der Position des Spannungs-Sense-Kontakt zwischen den Messleisten festgestellt, der mit steigendem Schichtwiderstand des TCOs größer wird. Abbildung 23 zeigt, dass bei einem Schichtwiderstand von 200 Ohm/sq ein Füllfaktor von 50 – 87 % gemessen werden kann, je nachdem wo der Spannungskontakt platziert wird. Bei einem Schichtwiderstand von 1 Ohm/sq²² zeigt sich, dass nahezu unabhängig von der Drahtanzahl der identische Füllfaktor bei einer relativen Position des Sensekontakts von 0.2 gemessen wird, der dem Füllfaktor ohne Gridwiderstand entspricht. Bei höheren Schichtwiderständen gibt es diese Position nicht mehr. Der Fehler in der Füllfaktormessung, wenn die Spannung bei einer relativen Position von 0.2 zwischen den Stromleisten gemessen wird, ist in Abbildung 24 dargestellt. Zusammen mit Abbildung 23 wird gezeigt, dass mehr Stromkontakte, also ein geringerer Abstand zwischen den Leisten zu einem deutlich robusterem Messsystem führt. Zudem ist der Fehler bei einer relativen Position von 0.2 bei vielen Stromleisten verhältnismäßig gering.

²² Diese Art der Messung wurde in [1] für Solarzellen ohne Busbare aber mit Fingergrid gezeigt. Deswegen wurden diese niedrigen Schichtwiderstände simuliert, um den Übergang von Zellen mit Metallgrid zu Zellen ohne Metallgrid zu prüfen

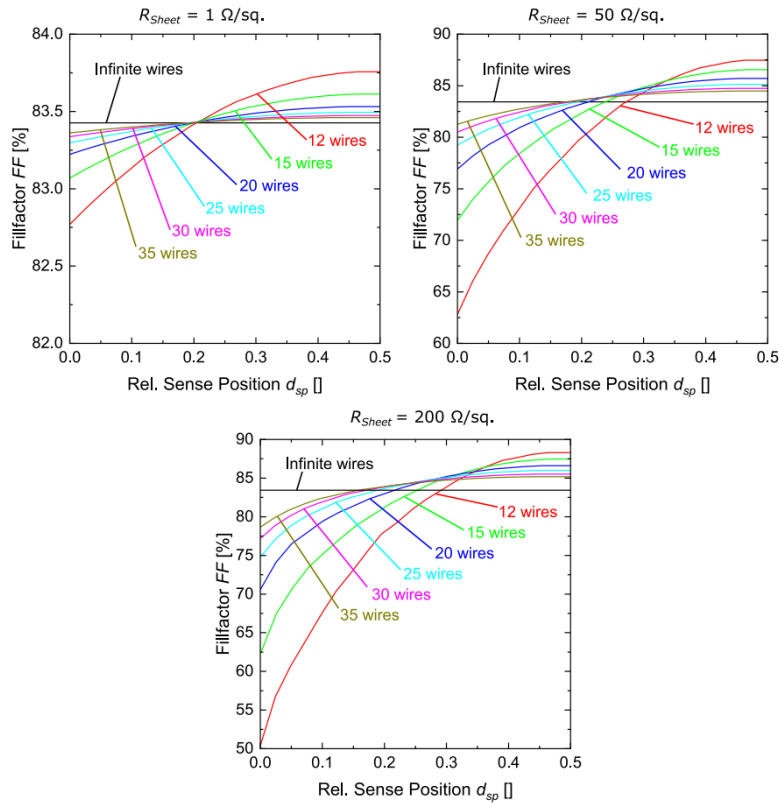


Abbildung 23: Simulierter Füllfaktor in Abhängigkeit der relativen Position des Spannungsmesskontakts zwischen zwei Stromleisten für unterschiedlich viele Drähte und verschiedene TCO-Widerstände

Basierend auf diesen Simulationen wurde eine neue Kontakteinheit für die Messung von siebdruckfreien HJT Solarzellen entwickelt. Der Rahmen ist für den Einsatz am LOANA System vorgesehen. Er verfügt über 23 Stromleisten, mit einem Abstand von 9 mm. Der Messrahmen ist in Abbildung 25 zu sehen. Aus den Simulationen hat sich ergeben, dass sich bei diesem Abstand die

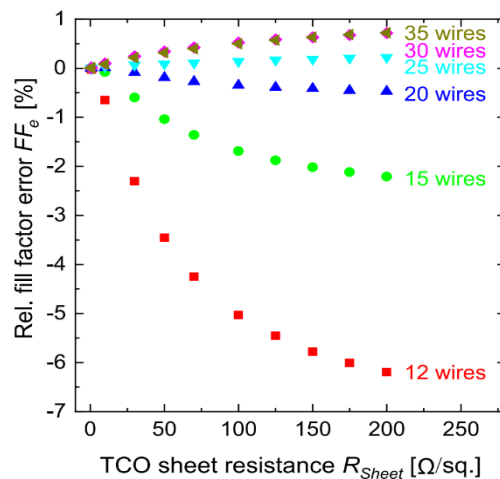


Abbildung 24: Fehler in der Füllfaktormessung in Abhängigkeit des TCO Schichtwiderstands, wenn die Spannung an der gleichen relativen Position von 0.2 zwischen zwei Stromdrähten gemessen wird.

relative Position des Spannungs-Sense Kontakts für eine gridwiderstandsfreie Messung bei unterschiedlichen Schichtwiderständen des Front-TCOs nicht verschiebt, siehe lila Rauten in Abbildung 26.

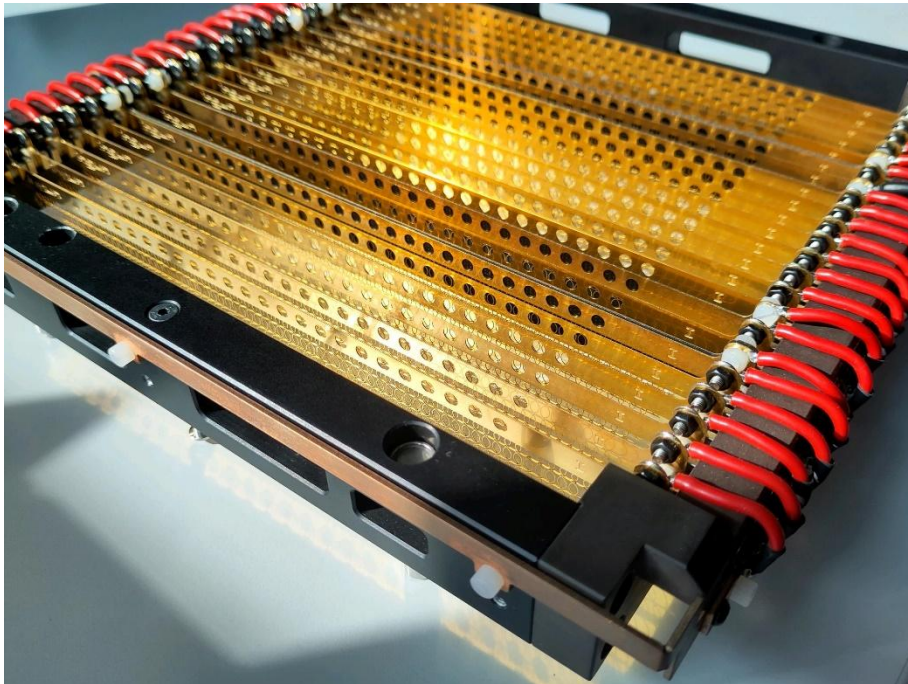


Abbildung 25: Neue Kontakteinheit zur Messung metallfreier HJT Solarzellen.

Die Strom- und Spannungskontakte werden über Federkontaktleisten realisiert, die eine Zelle über die komplette Länge kontaktieren können. Insgesamt verfügt der Rahmen über vier Spannungskontakte, wovon jeweils zwei im gleichen Abstand zu den Stromleisten angebracht sind. Zwei Sense Kontakte haben einen Abstand von 1.5 mm zu einer der Stromleisten. Dies entspricht einer relativen Position von 0.12 für eine gridwiderstandsfreie Messung. Die optimale Position von 0.2 konnte aus Fertigungsgründen nicht exakt erreicht werden. Die zusätzlichen zwei Spannungskontakte sind mit 0.1 mm Abstand möglichst nah an jeweils eine Stromleiste gesetzt. Dies ermöglicht, die Effizienz und insbesondere den Füllfaktor vergleichbar zur Modulintegration zu messen.

Verschiedene Zellen ohne Frontseiten-Siebdruck wurde mit dieser Kontakteinheit gemessen. Die gemessenen und simulierten Füllfaktoren von Zellen mit einem Schichtwiderstand von 40 Ω/sq sind in Abbildung 27 gezeigt. Der Füllfaktor wurde für die gridwiderstandsfreie und die modulnahe Sense

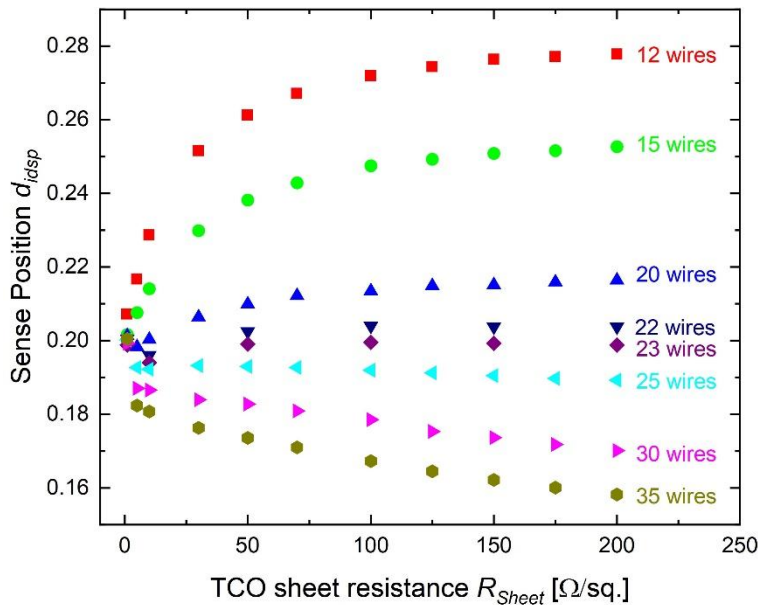


Abbildung 26: Position des Spannungs-Sense Kontakts für eine gridwiderstandsfreie Messung des Füllfaktors in Abhängigkeit des Schichtwiderstands des Front-TCOs für verschiedene Drahtanzahlen/Abstände

Position gemessen. Die Simulationen und die Messungen sind in guter Übereinstimmung, wodurch Zellen sowohl für Zellvergleiche als auch für die voraussichtliche Verhalten im Modul mit einem System gemessen werden können.

Zudem wurde im Rahmen dieses Arbeitspakets und der Entwicklung des neuen Messrahmens ein Upgrade für das LOANA System für Zellgrößen bis zu M10 installiert, sodass mittlerweile ein deutlich

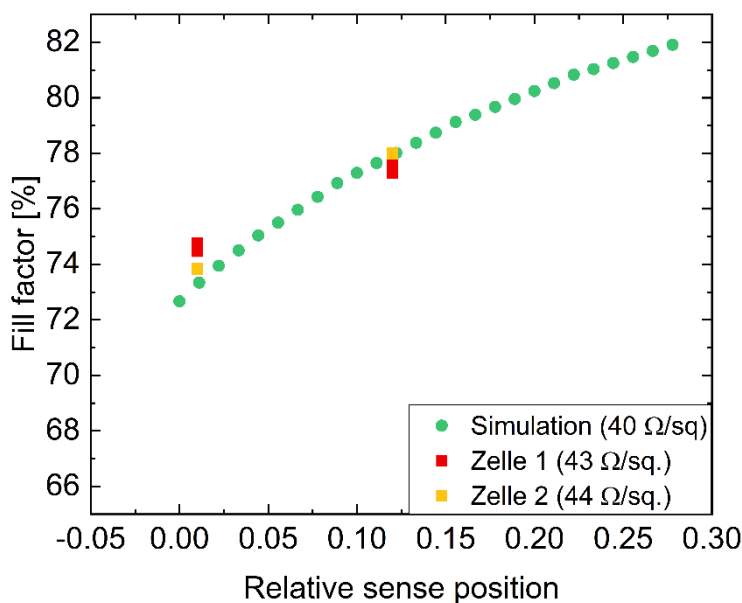


Abbildung 27: Simulierte und gemessene Füllfaktoren von siebdruckfreien Zellen. Das TCO auf der Vorderseite hat einen Schichtwiderstand von 40 Ohm/sq

größeres Spektrum an Zellen gemessen werden kann. Insbesondere ist das System wieder kompatibel mit der Zellgröße, die vom Projektpartner Meyer-Burger produziert wird.

AP5.3 Langzeitstabilität der Kontakte

Dieses Arbeitspaket sollte auf den Ergebnissen aus AP5.1 aufbauen. Da jedoch keine signifikante und grundsätzliche Verbesserung der Kontaktwiderstände erreicht wurde, haben in diesem Arbeitspaket keine zusätzlichen Arbeiten stattgefunden.

References

- [1] M. Hosking and F. G. Yost, *The Mechanics of Solder Alloy Wetting and Spreading*. Boston, MA: Springer US, 1993.
- [2] J. S. Kim, R. H. Friend, and F. Cacialli, "Surface energy and polarity of treated indium–tin–oxide anodes for polymer light-emitting diodes studied by contact-angle measurements," *Journal of Applied Physics*, vol. 86, no. 5, pp. 2774–2778, 1999, doi: 10.1063/1.371124.
- [3] K. Dusek and J. Urbanek, "Surface tension measurement of the solders by non-wetting specimen," in *2008 31st International Spring Seminar on Electronics Technology*, Budapest, Hungary, 2008, pp. 354–357.
- [4] Z. Y. Zhong and Y. D. Jiang, "The surface properties of treated ITO substrates effect on the performance of OLEDs," *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, vol. 34, no. 3, pp. 173–177, 2006, doi: 10.1051/epjap:2006062.
- [5] G. K. Deyu, J. Hunka, H. Roussel, J. Brötz, D. Bellet, and A. Klein, "Electrical Properties of Low-Temperature Processed Sn-Doped In₂O₃ Thin Films: The Role of Microstructure and Oxygen Content and the Potential of Defect Modulation Doping," *Materials*, vol. 12, no. 14, 2019, doi: 10.3390/ma12142232.
- [6] Kiyoshi Ishii, Katsuyuki Kikkawa, and Masakatsu Wakairo, "Marked Effects of Bias-Sputtering on the Resistivity of ITO Films Prepared by Gas Flow Sputtering," *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, no. 28 [4], pp. 1141–1144, 2003.

3. Verwendungsnachweis

Die wichtigsten vier Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind:

Pos. 0850 Gegenstände & andere Investitionen > 800/410/400€: 159.586,01 €

Pos. 0812 Beschäftigte E11-E15: 619.791,46 €

Pos. 0817 Beschäftigte E1-E11: 390.525,38 €

Pos. 0843 Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben: 162.680,08 €

Die Posten für Pos. 850 sind im Folgenden aufgeführt:

1. EL Kamera für Tandemsolarzellen (Kosten: 26.150,00 Euro):

Wir haben das Elektrolumineszenzverfahren (EL) als Verfahren zur Bewertung der Kontaktierbarkeit der Drähte zum TCO und der Querleitfähigkeit der TCOs implementiert. Dafür wurde eine EL Kamera in das Pasan Messsystem integriert. Je nach Homogenität des Kontaktwiderstands war das EL-Bild ebenfalls homogen. Die Querleitfähigkeit des TCOs konnte durch den Abfall des Signals zwischen den Kontaktdrähten beurteilt werden. Daraus folgend ist die Kontakteinheit für Siebdruckfreie Solarzellen für die LOANA entstanden. Durch diese Messungen konnte die neue Kontakteinheit entwickelt werden.

Dieses Verfahren steht für aktuelle und zukünftige interne Projekte und Projekten mit externen Partnern, z.B. NextGenPV zur Verfügung.

2. Kontakteinheit für Siebdruck-freie Solarzellen + Messleisten (Kosten: 64.954,17 Euro + 13147,22 Euro = 78101,39 Euro):

Für die Kontaktierung der Siebdruck-freien HJT Solarzellen wurde eine Kontakteinheit mit deutlich mehr Kontakten benötigt als für Zellen mit Silberfingern, da der Spannungsabfall über das TCO deutlich höher ist als über die Silberfinger. Bei der Kontaktierung von TCOs ist ein homogener Kontakt über die Zellfläche ebenfalls eine größere Herausforderung. Es wurde eine Kontakteinheit für das LOANA Messsystem anstatt des Pasan-Testers in Auftrag gegeben. Dieses System wurde für die Messung der Siebdruckfreien Solarzellen im Projekt verwendet (siehe Bericht).

Das System wird auch im darauf aufbauenden Projekt SilverAlloyPV für die Weiterentwicklung der Siebdruck-freien Solarzellen verwendet. Des Weiteren wird die Kontakteinheit im Projekt NextGenPV verwendet, um Si-Bottomsolarzellen nach der Rekombinations-TCO Beschichtung zu kontaktieren und die IV Daten zu messen. Dies ist die einzige Möglichkeit, die IV Daten der Bottomsolarzelle zu bestimmen unabhängig von der Topsolarzellenprozessierung. Dies erlaubt eine differenzierte Analyse der dann fertigen Tandemsolarzelle.

3. Glovebox Ausstattung für nasschemische Perowskitprozessierung (Kosten: 18.846,92 Euro)

Um die Kompatibilität der TCOs mit den Perowskiten in schneller Iteration testen zu können, wurden die Perowskite nasschemisch hergestellt. Dies musste unter Ausschluss der Umgebungsluft in einer Handschuhbox passieren. Eine solche Handschuhbox war bereits am ISFH vorhanden. Für die Prozessierung der Perowskite wurde noch Ausstattung wie Heizplatte, Eppendorfpipetten, UV-Ozon Reiniger, Thermoschüttler, Spin-coater und ein Lösungsmittelsensor angeschafft.

Die nasschemische Prozessierung wird auch im Projekt NextGenPV fortgeführt. Neben den Perowskiten werden HTL Schichten oder Passivierschichten aufgebracht. Im NextGenPV Projekt

werden sowohl rein nasschemisch prozessierte Perowskite als auch hybrid prozessierte Perowskite hergestellt. Der zweistufige Hybridprozess besteht aus einer aufgedampften anorganischen Perowskit-Schicht und einer nasschemischen organischen Perowskitbeschichtung.

4. IV Tester in Glovebox (Kosten: 36.543,17 Euro)

Da die in der Handschuhbox hergestellten Perowskitsolarzellen eventuell nicht Langzeitstabil sind oder an der Umgebungsluft degradieren, war es essentiell, diese direkt in der Handschuhbox messen zu können. Dafür wurde in der Handschuhbox ein IV Tester aufgebaut. Der IV-Tester wurde in über 50 Chargen genutzt und trug dazu bei, den Fortschritt der Perowskitsolarzellen unabhängig von Degradation durch die normale Atmosphäre beurteilen zu können.

Der IV-Tester wird in allen Projekten zur IV Messung von Perowskitsolarzellen eingesetzt, zurzeit in den laufenden Projekten NextGenPV und FuturePV.

4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die umfangreiche Entwicklung im Rahmen des Vorhabens TOP konnte im Hinblick auf die vielen damals noch ungelösten grundlegenden Fragestellungen nicht alleine von Meyer-Burger aus eigener Kraft geleistet werden. Gerade auf dem Gebiet der Tandemsolarzellenentwicklung gab und gibt es noch viele offene Fragestellungen und der Marktreifegrad war noch sehr gering. Das ISFH hat besondere Kompetenzen im Bereich der Zellverschaltung mit Smart-Wire Technologie und in der Charakterisierung von nicht-Standard Solarzellen. Der radikale Ansatz ohne Siebdruckmetallisierung brachte ein hohes Risiko aber auch eine sehr große Chance mit sich. Somit hatte das Vorhaben einen erheblichen vorwettbewerblichen Charakter. Erfolgchancen waren nur bei einer engen Zusammenarbeit aller Partner unter frühzeitiger Betrachtung der wirtschaftlichen Umsetzbarkeit der Verfahrensschritte gegeben.

5. Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse

Die Entwicklungen im Bereich der HJT Zellen zu TCOs wurden schon während des Projektes in die Pilotlinie von Meyer-Burger übertragen. Es bestand gute Aussicht, diese auch in eine geplante Zell- und Modulfertigung in Deutschland zu übertragen. Dies fand jedoch wegen der wirtschaftlich schwierigen Situation von Meyer-Burger nicht mehr statt. Meyer-Burger Deutschland hat Insolvenz angemeldet. Die wirtschaftliche Verwertung kann somit bei einem Käufer der IP erfolgen. Zurzeit gibt es einige Bestrebungen in Europa eine HJT Linie aufzubauen, z.B. ENEL in Italien oder MCPV in den Niederlanden.

Außerdem können die Ergebnisse zu den Siebdruck-freien Solarzellen von anderen Unternehmen genutzt werden. Das Unternehmen Solyco entwickelt z.B. auch Drähte mit niedrig schmelzendem Lot, mit denen die Solarzellen direkt übers TCO verbunden werden könnten.

Die Kontakteinheit für Siebdruck-freie Solarzellen kann genutzt werden, um eben diese oder auch Bottomsolarzellen mit Rekombinations-TCO vor der Top-Solarzellenprozessierung zu charakterisieren und in verschiedene Leitungsklassen zu sortieren. Ein Messgeräthersteller wie z.B. pvtools oder ingun können eine solche Kontakteinheit kommerziell vertreiben.

Das im Projekt entwickelte Aluminium dotiertes Zinkoxid (AZO) als TCO für HJT Zellen ist hoch aktuell. Es wird z.B. in der HBC Hybridsolarzelle auf p-a-Si von LONGI verwendet, die einen Wirkungsgradrekord von 27.4% hat.

Wissenschaftliche Verwertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse des TOP-Projektes wurden auf vielen wissenschaftlichen Konferenzen und in Fachzeitschriften veröffentlicht (siehe unten). Das TOP-Projekt hat in wissenschaftlicher Hinsicht Pionierarbeit geleistet. Die temporäre Kontaktierung von Solarzellen ohne Metallisierung zur Messung von IV Kennlinien wurde zuvor noch nicht realisiert. Dafür wurde eine spezielle Kontakteinheit entwickelt. Im Bereich der permanenten Kontaktierung der Solarzelle ohne Metallisierung wurden viele verschiedene Techniken eingehend untersucht. Die Kombination der dünnen Ag-Legierung mit dem Smart-Wire Draht erzielte sehr niedrige Kontaktwiderstände, die (als einzige) die Spezifikationen für einen solchen Kontakt erfüllen.

Darüber hinaus bot das Teilvorhaben des ISFH Raum für die Promotion von Malte Brinkmann mit dem Titel „Verschaltung von Solarzellen mit silberfreien Kontaktflächen“, die an der Leibniz Universität Hannover durchgeführt wird und bald abgeschlossen sein wird.

Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Die vielversprechenden Ergebnisse mit den Ag-Legierungen vom externen Partner Mimsi Materials auf den HJT Zellen von Meyer-Burger führten zur Einreichung und Bewilligung des EU Projekts „SilverAlloyPV“. In diesem Projekt sollen die transparenten Ag-Legierungsschichten im TCO an die HJT Grenzflächen optimiert werden, um den Wirkungsgrad der Zellen zu ermöglichen und eine Metallgridfreie Solarzelle im Modul verschaltbar zu machen. Das Projekt wurde inzwischen wegen Differenzen des Projektträgers und Mimsi Materials beendet. Es ist eine Veröffentlichung der Ergebnisse auf der EUPVSEC geplant.

Die Fortschritte im Bereich der Tandemsolarzellen in TOP führten zur Einreichung und Bewilligung des niedersächsischen Projekts „NextGenPV“ in dem ein niedersächsisches Konsortium aus verschiedenen Instituten rund um das ISFH die eine Tandemtechnologie entwickeln soll. Diese Technologie soll dann perspektivisch von einem Unternehmen in Niedersachsen gefertigt werden.

Die Verwendung der in TOP entwickelten Indium freien AZO Schichten in Tandems ist hochaktuell. Bei der Herstellung von HJT Solarzellen, Perowskit-SJ-Solarzellen und Mehrfachjunctionsolarzellen werden pro Junction ein bis zwei TCOs verwendet, die auf Kostengründen Indium frei sein müssen. Das ISFH ist auch im Austausch mit von Ardenne über ein mögliches Anschlussprojekt mit AZO.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses

3.1. Journalbeiträge

- ISFH / FZJ / MB: M. Brinkmann, F. Haase, K. Bothe, K. Bittkau, A. Lambertz, W. Duan, K. Ding, H.-P. Sperlich, A. Waltinger, H. Schulte-Huxel, “Impact of the contacting scheme on I-V measurements of metallization-free silicon heterojunction solar cells”, EPJ Photovoltaics 14, 18 (2023).
- ISFH (Anteilig TOP Ergebnisse): F. Haase, L. Brockmann, A. Raugewitz, V. Steckenreiter, V. Barnscheidt, R. Clausing, S. Baumann, J. Vollbrecht, W. Veurman, J. Löhr, D. Liu, M. Turcu, L. Nasebandt, U. Römer, D. Sylla, J. Strey, M. Löhning, L. Mettner, R. Winter, A.

Christ, H. Kohlenberg, C. Marquardt, E. Brückner, H. Rabiei, M. Rienäcker, S. Kajari-Schröder, T. Wietler, R. Peibst, "On perimeter losses in perovskite top- and poly-Si-passivated silicon bottom cells – do small area tandems reveal the full efficiency potential?", invited, to be submitted to Solar rrl, 2025.

3.2. Konferenzbeiträge

- ISFH / FZJ / MB: M. Brinkmann, "Accurate IV -Measurements of Silicon Heterojunction Solar Cells without Front Metallization Using FEM Simulations", Oral presentation at the 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC), Milan, Italy, 27.09.2022.
- ISFH / FZJ / MB: M. Brinkmann, „Simulation der Messung von SHJ-Zellen ohne Vorderseitenmetallisierung“, Oral presentation at SiliconFOREST 2022, Falkau, Germany, 11.10.2022.
- ISFH / MB: F. Haase, D. Winter, A. Raugewitz, J. Schmidt, H.-P. Sperlich, H. Nonnenmacher, and R. Peibst, "Aluminum Doped Zinc Oxide as Bottom Oxide and Recombination Layer for Silicon Heterojunction/Perovskite Tandem Cells" Visual presentation at the TandemPV Workshop 2023, Chambéry, France, 07.06.2023.
- M. Brinkmann, R. Delsol, T. Daschinger, H. Schulte-Huxel and R. Brendel, "Reduced Silver and Lead Consumption for the Interconnection by Ultrasonic Assisted Soldering", Oral presentation at the 52nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2024, Seattle, WA, USA, 10.06.2024.
- ISFH / LUH: F. Haase, E. Brückner, A. Raugewitz, G. Dräger, and R. Peibst, "Decrease of internal to external open circuit voltage deficit by piperazinium iodide beneath C60 in perovskite solar cells", Visual presentation at the TandemPV Workshop 2024, Amsterdam, Netherlands, 25.06.2024.
- ISFH (Anteilig TOP Ergebnisse): F. Haase, L. Brockmann, A. Raugewitz, V. Steckenreiter, V. Barnscheidt, R. Clausing, S. Baumann, J. Vollbrecht, W. Veurman, J. Löhr, D. Liu, M. Turcu, L. Nasebandt, U. Römer, D. Sylla, J. Strey, M. Löhning, L. Mettner, R. Winter, A. Christ, H. Kohlenberg, C. Marquardt, E. Brückner, H. Rabiei, M. Rienäcker, S. Kajari-Schröder, T. Wietler, R. Peibst, "On perimeter losses in perovskite top- and poly-Si-passivated silicon bottom cells – do small area tandems reveal the full efficiency potential?", to be presented at the 42nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC), Bilbao, Spain, 23rd – 27th September 2025.
- ISFH / MIMSI / Uni Helsinki / MB: „ Ultra-thin silver layers for metallization-free and indium-free silicon heterojunction solar cells", to be submitted to 42nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC), Bilbao, Spain, 23rd – 27th September 2025.

3.3. Abschlussarbeiten

- ISFH / LUH: E. Brückner „Passivierung der Grenzfläche von Perowskit-Absorbern zum elektronenselektiven Kontakt“, Masterarbeit, Abgabe am 24.01.2024.

7. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit wurden vor allem in China erhebliche Produktionskapazitäten für Solarzellen aufgebaut. 2020, zu Beginn des Projektes, lag die weltweite Produktionskapazität bei ca. 0,3 TW (0,006 TW HJT) und 2024, zum Ende des Projektes, bei ca. 1,4 TW (0.112 TW HJT). Somit hat sich die Produktionskapazität im Bereich HJT fast um das 20-fache gesteigert. Dies ist fast ausschließlich durch neue HJT Linien in China realisiert worden. Die größten Kapazitäten für höchsteffiziente HJT Solarzellen haben die Unternehmen Huasun, Risen Energy, Akcome, Jinergy, Jingang Solar, SPIC, Grand Sunergy, aufgebaut. Auch die Wirkungsgrade wurden stark erhöht von Rekordwirkungsgraden von 26,7% 2020 auf über 27,3% 2024. Die Wirkungsgrade in der Massenproduktion lagen im Schnitt ca. 1% bis 2% absolut darunter. Die Fortschritte kamen durch hochtransparente Kontaktschichten (z.B. nanokristallines Silizium) und sehr leitfähige und transparente TCOs zu Stande. Diese TCOs sind teilweise auch Indium frei. Um die Effizienz noch weiter zu steigern, wurden auch HJT-IBC Zellen entwickelt. Der Preis für ein HJT Solarmodul sank von 0.32 ct/W_p 2020 auf 0,13 ct/W_p 2024 um das 2,5-fache während der Projektlaufzeit. Die Kostensenkungen waren wahrscheinlich auch hier zum großen Teil wegen der Skaleneffekten bei der Produktion möglich.

Zum Thema der Siebdruckfreien Zelle und deren Verschaltung sind keine Ergebnisse bekannt geworden.

Im Bereich der Perowskit/Silizium Tandemsolarzellen gab es einige Fortschritte während der Projektlaufzeit. Die Rekordwirkungsgrade stiegen von 29% 2020 auf 34.6% 2024. Dabei stellten die europäischen Institute anfänglich noch Rekorde auf und wurden dann aber vom KAUST und LONGI überholt. Auch auf diesem Gebiet dominieren in der Forschung und in der Produktion die Chinesen. Erste Produktionslinien für Perowskitsolarzellen und module wurden in China gebaut. Die Perowskitmodule können gekauft werden.