

Abschlussbericht
zum BMWK-geförderten Teilvorhaben

**„Evaluationsplattform für Silizium-Einfachsolarzellen und
Silizium-Perowskit-Tandemsolarzellen auf Basis von POLO-IBC-
Solarzellen und gasphasenbasierten Perowskiten“**

im

**Verbundvorhaben: „Evaluation von innovativen Photovoltaik-
Materialien und Einzelprozessen auf Leuchtturm-
Wirkungsgradniveau“**

Kurzbezeichnung: **27 plus 6**

Förderkennzeichen: **03EE1056A**

Projektdurchführung:

Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/Emmerthal (ISFH)

Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal

Projektleiter: Dr. Sascha Wolter, Dr. Michael Rienäcker

Autor: Dr. Michael Rienäcker

Projektlaufzeit: 01.04.2020 – 31.12.2023

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

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1. KURZDARSTELLUNG	4
1.1 AUFGABENSTELLUNG.....	4
1.2 VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE	5
1.3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS	6
1.4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND, AN DEN ANGEKNÜPFT WURDE	8
1.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN	12
2. EINGEHENDE DARSTELLUNG	13
2.1 ERZIELTE ERGEBNISSE	13
2.1.1 <i>Simulationsgestützte Weiterentwicklung des 26.1%-effizienten POLO²-IBC-Basiszellprozesses zu Effizienzen >27%</i>	13
2.1.2 <i>Verbesserung der POLO-Rückseitenpassivierung: Hydrogenierung, Laserkontaktöffnungsprozess & ladungsinduzierter parasitärer Rekombinationseffekt</i>	16
2.1.3 <i>Verbesserung des Lichteinfangvermögens der POLO²-IBC-Zelle</i>	23
2.1.4 <i>Entwicklung von 3T Bottomsolarzellen</i>	27
2.1.5 <i>Entwicklung der Messprozedur für 3T-Tandemsolarzellen</i>	34
2.1.6 <i>Entwicklung und Herstellung von 2T Bottomsolarzellen</i>	36
2.1.7 <i>Entwicklung und Evaluation eines industriellen Trockenätzverfahrens zur einseitigen Entfernung von Siliziumoxid auf POLO-Kontakten</i>	41
2.1.8 <i>Entwicklung und Charakterisierung der p⁺n⁺ Poly-Si-Tunneldioden</i>	44
2.1.9 <i>Entwicklung von Perowskit-Solarzellen am ISFH</i>	45
2.1.10 <i>Entwicklung von Tandemsolarzellen am ISFH</i>	48
2.1.11 <i>Optimale Verschaltung von 3T-Tandemsolarzellen</i>	50
2.2 GEGENÜBERSTELLUNG DER PROJEKTERGEBNISSE MIT DEN PROJEKTZIELEN.....	65
3 ERFOLGTE ODER GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN DES ERGEBNISSES	67
4 VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE	69
4.1 <i>Wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse</i>	69
4.2 <i>Wissenschaftliche Verwertung der Ergebnisse</i>	70
4.3 <i>Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit</i>	70
5 WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG DES VORHABENS DEM ZUWENDUNGSEMPFÄNGER BEKANNT GEWORDENER FORTSCHRITT AUF DIESEM GEBIET BEI ANDEREN STELLEN	71

1. KURZDARSTELLUNG

1.1 AUFGABENSTELLUNG

Die produzierende Photovoltaikindustrie in Deutschland war zum Zeitpunkt der Projektbeantragung, abgesehen von einigen Modulherstellern, im wesentlichen von exportorientierten mittelständigen Herstellern von PV-Produktionsanlagen repräsentiert. Nachdem diese in der Vergangenheit auch auf dem asiatischen Markt große Marktanteile erzielen konnten, hat sich die Wettbewerbssituation für die deutschen Anlagenhersteller mittlerweile verschärft. Begleitet von staatlichen Vorgaben an chinesische Zellhersteller bzgl. eines hohen Anteils vom einheimischen Produktionsanlagen und einer aggressiven Preis- und IP-Politik, drängen chinesische Anlagenbauer massiv auf den Markt. Die deutschen Anlagenbauer sind daher gefordert durch Innovation und technologischen Wissensvorsprung ihre Marktposition zu erhalten.

Das Vorhaben „27plus6“ hat das ambitionierte technologische Ziel, Leuchtturmwirkungsgrade auf Weltrekordniveau für kristalline Si Solarzellen ($\eta > 27\%$) und für Si/Perowskit-Tandemsolarzellen ($\eta > 33\%$ ($27\% + 6\%$)) zu erzielen. Die zugrundeliegende Motivation hierfür ist, dass die beteiligten Industriepartner aus dem PV-Anlagenbau und der Materialherstellung die Prozesse, Materialien und Bauelementarchitekturen aus den Leuchtturm-Solarzellen-Prototypen nutzen, um innovative Einzelprozesse und neue Materialien im Rahmen von Kreuzprozessierungen zu evaluieren, weiterzuentwickeln, zu vereinfachen und auf Basis der damit erzielten Leuchtturmergebnisse zu bewerben. Somit wird ihre Position im internationalen Wettbewerb gestärkt werden. Die Firma Centrotherm beteiligt sich an dem Vorhaben als Verbundpartner.

Für das Vorhaben „27plus6“ haben sich das ISFH und das KIT zusammengeschlossen, um Expertise und Exzellenz auf dem Gebiet für Si-Einfachsolarzellen und dem Gebiet von Perowskit-Solarzellen zu verbinden. Das ISFH hielt mit einem Wirkungsgrad von 26,1% den Weltrekord für p-Typ Si-Solarzellen, das KIT besitzt eine herausragende Expertise im Bereich der Perowskit-Photovoltaik. Das KIT und das ISFH hatten zum Zeitpunkt der Projektbeantragung bereits zusammen einen 4-Terminal Si/Perowskit-Tandemwirkungsgrad von 26% erzielt.

Der technologische Ansatz zum Erreichen der ambitionierten Wirkungsgradziele ist, die Rekord-POLO-IBC-Solarzellen des ISFH durch Kombination mit höchsteffizienten Perowskit-Topsolarzellen des KIT zu Tandemzellen zu erweitern. Die elektrische Verbindung zwischen beiden Teilzellen erfolgt durch einen am ISFH vorentwickelten Tunnelkontakt aus zwei hochdotierten poly-Si-Schichten. Die in Vorgängerprojekten aufgebaute Expertise zur kontrollierten Ko-Verdampfung von hochwertigen Perowskitschichten und Abscheidung der Perowskitschichten aus der Flüssigphase bildet die Grundlage zur monolithischen Herstellung der Topsolarzellen auf der texturierten Vorderseite der Si-Bottomsolarzelle. Ein technologisches Alleinstellungsmerkmal dieses Projektes ist die Entwicklung von Si/Perowskit-Tandemsolarzellen in der sogenannten 3-Terminal Architektur. Diese 3-Terminal Tandemsolarzellen sind eine wichtige Innovation. Sie kombinieren die Vorteile der weiter verbreiteten 2-Terminal und 4-Terminal Tandemsolarzellen. Der monolithische Aufbau benötigt nur wenige Kontaktschichten und minimiert die damit einhergehende parasitäre Absorption. Gleichzeitig entfällt der Zwang der Stromanpassung zwischen Top- und Bottomsolarzelle. Daraus resultieren im Vergleich zu 2-Terminal Solarzellen eine erhöhte Flexibilität bzgl. der Bandlücke der Perowskit-Materialien in der Topsolarzelle sowie ein gesteigerter Ertrag unter realistischen

Einstrahlungsbedingungen (im Tages- oder Jahresverlauf). Darüber hinaus können 3-Terminal Solarzellen zu klassischen Si-Solarmodulen verschaltet werden, so dass keine zusätzlichen Balance-of-System Kosten anfallen. Im Rahmen des Vorhabens wird diese Modulverschaltung demonstriert und der Mehrertrag auf Modulebene quantifiziert. Weitere Aspekte der Wegbereitung für die Anwendung von Si/Perowskit-Tandemsolarzellen sind Stabilitätsuntersuchungen auf Zellniveau, Ertragsrechnungen sowie die Bereitstellung der Grundlagen für eine Cost-of-Ownership Rechnung.

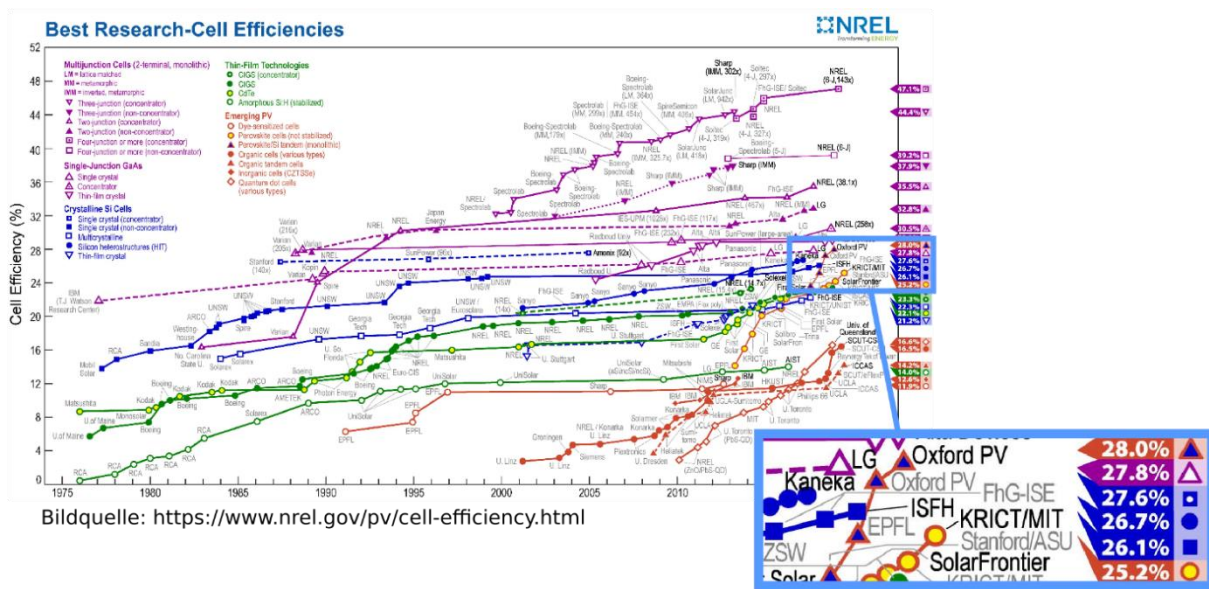


Abbildung 1: Das NREL Efficiency Chart vom 25.09.2019 [1]. Das ISFH führte die wirtschaftlich relevanteste Kategorie „Crystalline Si Cells – single crystal (non-concentrator)“ an. Der aktuell beste Wirkungsgrad für monolithische Si/Perowskit-Tandemsolarzellen lag bei Projektbeantragung bei 28% - erzielt von OxfordPV - und der für Perowskit-Einfachsolarzellen bei 25,2%.

1.2 VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE

Im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms „Innovationen für die Energiewende“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Stand September 2018, waren unter „4.2.1 Photovoltaik“ folgende allgemeine Aussagen getroffen:

„Um ... fortschrittliche und innovative Technologien und Produktionsverfahren konsequent weiterzuentwickeln und die Breite der nationalen Wertschöpfung bei hohem internationalen Wettbewerbsdruck zu erhalten und auszubauen, sind kontinuierliche Forschungsaktivitäten essenziell. ... Für eine konkurrenzfähige Photovoltaikindustrie und eine erfolgreiche weltweite Energiewende ist es notwendig, die Kostensenkungspotenziale bei steigender Produktqualität entlang der gesamten Wertschöpfungskette auszuschöpfen. Dabei geht es um eine kontinuierliche Steigerung des Wirkungsgrads und der Produktivität, um verminderten Ressourcenverbrauch- und Flächenverbrauch, eine längere Lebensdauer und eine vereinfachte Verwertung nach Gebrauch. Eine Hauptaufgabe besteht darin, neue Materialien und Technologien bis zur Produktionsreife weiterzuentwickeln sowie deren Kosteneffizienz nachzuweisen.“

Als strategische Forschungs- und Entwicklungsthemen waren u.a. definiert:

- Die Unterstützung des europäischen Photovoltaik-Maschinenbaus im Wettbewerb mit der internationalen Konkurrenz, u.a. durch effizienzsteigernde technologische Weiterentwicklungen
- Die Evaluation von neuen PV-Materialien, z.B. für Konzepte zur Entwicklung hocheffizienter Tandemsolarzellen auf Basis des kristallinen Siliziums (z. B. in Kombination mit Perowskit-Halbleitern)

Das Vorhaben „27plus6“ erfüllt einerseits viele der im allgemeinen Teil definierten Ziele und passt andererseits sehr gut zu den speziellen definierten FuE-Themen:

Die Unterstützung des europäischen Photovoltaik-Maschinenbaus zur Erhaltung der Wertschöpfung bei hohem internationalen Wettbewerbsdruck ist – neben dem idealistischen Beitrag zum Gelingen der Energiewende - das zentrale, dem Vorhaben zugrundeliegende Motiv. Diese Unterstützung soll einerseits durch den Werbeeffect erzielt werden, den die beteiligten Industriepartner auf Basis der unter Einbeziehung ihrer Einzelprozesse erzielten Leuchtturm-Wirkungsgrade generieren können. Das Weiter sollen Kostensenkungspotentiale durch Adressierung der Frage „Wie gut ist gut genug?“ identifiziert werden. Die innovativen Einzelprozesse der Industriepartner sollen immer weiter vereinfacht werden (kürzere Pump/Spülzeiten, höhere Abscheideraten, etc.). Solange auch die vereinfachten Prozesse Wirkungsgrade auf Rekordniveau erlauben, sind eventuell sogar weitere Prozessvereinfachungen möglich. Letztendlich sollen die Anlagen der Industriepartner hinsichtlich gesteigerten Wirkungsgrads und gesteigerter Produktivität weiterentwickelt werden.

Das Vorhaben „27plus6“ adressiert direkt das FuE-Thema Silizium-Perowskit-Tandemsolarzellen. Auch dies zielt letztlich vor allem auf die Unterstützung des europäischen Photovoltaik-Maschinenbaus. Kommerzielle Abscheideanlagen für Perowskit-Absorber und für weitere Komponenten der Perowskitsolarzellen fanden sich zwar zum Projektbeginn noch nicht im Portfolio der beteiligten Firmen, aber das kann sich mittelfristig ändern. Es besteht die Hoffnung, dass die Abscheidungen für Perowskitsolarzellen von der Prozessführung her so komplex sind, so dass sie nicht einfach kopiert werden können – ähnlich wie bei Abscheideanlagen für die CIGS-Technologie, bei denen deutsche Hersteller bisher einen signifikanten Marktanteil verteidigen konnten.

1.3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS

Das Projekt „27plus6“ ist ein gemeinschaftliches Forschungsvorhaben des ISFH, der Firma Centrotherm und des KIT mit dem ambitionierten technologischen Ziel, wegbereitende Rekordwirkungsgrade auf hocheffizienten Si- und Si/Perowskit-Tandemsolarzellen nachzuweisen und gleichzeitig diesen Hocheffizienzprozess als Evaluationsplattform für Prozessvereinfachungen zu nutzen.

Das ISFH fokussiert sich auf die Weiterentwicklung der Si-Bottomsolarzelle und die Konzeption der Bauelementarchitektur der Tandemsolarzelle. Das KIT fokussiert sich in diesem Projekt auf die Entwicklung der Perowskit-Topsolarzelle und die Simulation des Bauelements. Centrotherm wird an der Vereinfachung, Kostenreduktion und Durchsatzerhöhung von LPCVD-Si-Abscheidungen und deren Verbesserung durch weitere Komponenten (C, O) arbeiten.

Ziele des ISFH-Teilvorhabens im Projekt „27plus6“ waren insbesondere:

- Demonstration von Leuchtturm-Wirkungsgraden > 27% für c-Si- Solarzellen
- Demonstration von Leuchtturm-Wirkungsgraden > 33% für Si/Perowskit-Tandemsolarzellen
- Entwicklung der Verbindung zwischen Si-Bottom- und Perowskit-Topsolarzelle im Rahmen einer optimierten 3-Terminal Konfiguration
- Entwicklung einer semitransparenten Perowskit-Solarzelle mit Wirkungsgraden über 19% auf texturierten Oberflächen

- Flexibilisierung der Herstellungsprozesse für POLO²-IBC-Solarzellen und Si/Perowskit-Tandemsolarzellen als Evaluierungsplattform für innovative Einzelprozesse der Industriepartner
- Wegbereitung für die Anwendung von Si/Perowskit-Tandemsolarzellen: Stabilitätsuntersuchungen (auf Zellniveau), CoO-Grundlagen, Demonstration einer 2T-Modulverschaltung der 3T-Tandemsolarzellen, Ertragsberechnungen

Zum Erreichen dieser Ziele umfasste das Vorhaben „27plus6“ 5 Arbeitspakete, die im Folgenden zusammengefasst sind. Die Zusammenarbeit der Partner im Konsortium wird außerdem im Projektstrukturplan verdeutlicht.

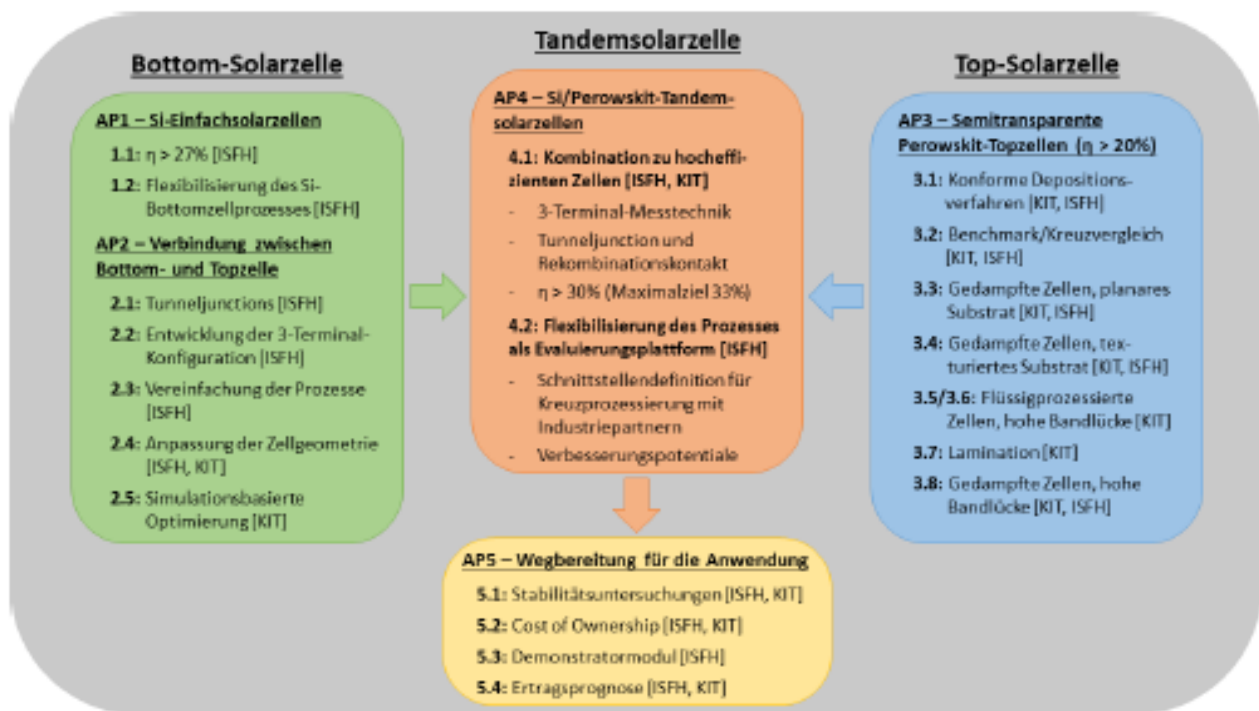


Abbildung 2: Projektstrukturplan des Projekts 27plus6.

In **Arbeitspaket 1** werden Si-Einfachsolarzellen zu einem Weltrekordniveau von mehr als 27% weiterentwickelt (AP1.1). Die technologischen Ansätze hierfür sind einerseits eine Erhöhung des Wirkungsgradpotentials der Solarzellen nach „Front-End“-Prozessierung durch die optimierte Einbringung von atomarem Wasserstoff, zum anderen die Vermeidung der Degradation der Solarzelle während der letzten Prozessschritte sowie eine Verringerung der Randverluste. Centrotherm adressiert im Rahmen von AP1.2 die Weiterentwicklung der LPCVD-Abscheidung von Si hin zu höheren Durchsätzen, vereinfachten Prozessen, reduzierten Kosten und fortgeschrittener Stöchiometrie der Si-Schichten (Zusatz C, O).

Das **Arbeitspaket 2** adressiert die optischen und elektrischen Eigenschaften der Schnittstelle zwischen Si-Bottomsolarzelle und Perowskit-Topsolarzelle. Da sich bei Verwendung von POLO-IBC-Solarzellen als Bottomsolarzelle automatisch eine 3-Terminal Tandemstruktur ergibt, sind verschiedene Konfigurationen bei der monolithischen Zusammenschaltung von Top- und Bottomsolarzelle möglich. In AP2 soll unter diesen Möglichkeiten die hinsichtlich des Wirkungsgrades und Prozessvereinfachungspotentials beste Option identifiziert werden.

In **Arbeitspaket 3** werden semitransparente Perowskit-Solarzellen mit hohem Wirkungsgrad entwickelt, welche hohe Leuchtturm-Wirkungsgrade in Tandemsolarzellen zu realisieren. Je nach Bandlücke und Architektur variieren die Anforderungen. Hierzu sind umfangreiche Untersuchungen, Variationen und Optimierungen sowohl des Perowskitabsorbers, als auch der Elektronen- und Löcher-sammelnden Schichten sowie der transparenten Vorderseitenelektrode notwendig. Es wäre weder möglich noch zielführend, diese Entwicklungen bereits auf kompletten Tandemsolarzellen durchzuführen. Dennoch soll die Perowskitsolarzelle in ihrer Konfiguration, Morphologie usw. der späteren Topsolarzelle im Tandembauэлеment entsprechen, so dass alle Entwicklungen aus AP3 direkt auf Tandemsolarzellen übertragbar sind. Es werden parallele Ansätze verfolgt, die hocheffizienten Perowskit-Topsolarzellen mit Si-Bottomsolarzelle zu verbinden. Diese Diversifizierung der Lösungsansätze erhöht die zu erwartenden Wirkungsgrade und minimiert Risiken.

In **Arbeitspaket 4** wird eine Si/Perowskit-Tandemsolarzelle mit einem Weltrekordniveau von idealerweise 33% oder mehr entwickelt (AP4.1). Auch dieser Prozess wird als Plattform für die Kreuzprozessierung mit den an der Tandem-Thematik interessierten Industriepartnern genutzt (AP4.2). Auch hier ist letztendlich das Ziel, für die an den Perowskit-Dünnschichtsolarzellen arbeitenden Anlagenbauer und Materialhersteller relevante und werbewirksame Leuchtturm-Wirkungsgrade zu generieren.

Das **Arbeitspaket 5** soll einen wichtigen Schritt in Richtung der Übertragung der Rekordwirkungsgrade in die Anwendung gehen. Neben Stabilitätsbetrachtungen sollen die Grundlagen für eine Cost-of-Ownership-Berechnung des Tandemansatzes gelegt werden. Die Verschaltung von 3-Terminal Tandemsolarzellen zu Solarmodulen soll erstmalig experimentell demonstriert werden. Mittels Ertragsberechnungen auf Basis von Simulationen soll der Mehrertrag eines Si/Perowskit-Tandemmoduls im Vergleich zu einem Modul aus Si-Einfachsolarzellen auf jeweils höchstem Wirkungsgradniveau quantifiziert werden.

1.4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND, AN DEN ANGEKNÜPFT WURDE

Die folgende Beschreibung bezieht sich auf den wissenschaftlichen Stand zum Zeitpunkt der Einreichung der Skizze bzw. des Antrages für das Projekt 27plus6 (Sept. 2018/Dez. 2019).

Zu Höchsteffizienz-Si-Solarzellen (mit passivierenden Kontakten)

Nachdem der Wirkungsgrad-Weltrekord für Si-Solarzellen 16 Jahre lang unangetastet bei 25,0% lag [1], wurden seit 2014 kontinuierlich höhere Werte erzielt. Dieser Fortschritt basierte auf der Einführung von passivierenden Kontakten, zu denen sowohl a-Si:H/c-Si-Heterojunction als auch poly-Si/SiO_x/c-Si-Junctions (POLO, TOPCon, ...) gehören. Den zum Projektbeginn aktuellen Weltrekord von 26,7% für Si-Solarzellen überhaupt hielt die japanische Firma Kaneka [2,3]. Er wurde auf n-Typ interdigitated back contacted (IBC)-Solarzellen mit a-Si:H/c-Si-Heterojunctions erzielt. Den höchsten Wirkungsgrad für Si-Solarzellen mit poly-Si/SiO_x/c-Si-Junctions von 26,1% hielt zum Projektbeginn das ISFH [77]. Auch dieses Ergebnis wurde auf IBC-Solarzellen erzielt, allerdings auf Basis von p-Typ-Bulkmaterial und POLO-Junctions. Das F-ISE hielt mit seiner TOPCon-Technologie den Rekord für beidseitig kontaktierte Solarzellen von derzeit 25,8% [2]. Ungeachtet des Laborcharakters des Herstellungsprozesses zeigen diese Leuchtturm-Wirkungsgrade zunächst das Potential der passivierenden Kontakte auf, und triggern so einen enormen Entwicklungsaufwand bei

der Industrialisierung – sowohl bei den beidseitig kontaktierten Solarzellen, als auch bei den IBC-Solarzellen. Asiatische Zellhersteller arbeiten daran ebenso wie europäische Anlagenbauer, und alle Forschungsinstitute weltweit.

POLO- bzw. poly-Si/SiO_x/c-Si-Junctions haben bei der Industrialisierung gegenüber a-Si:H/c-Si Heterojunctions den Vorteil der Kompatibilität mit heute üblichen Hochtemperaturprozessen, z.B. bei der Siebdruckmetallisierung. Bzgl. der Si-Abscheideverfahren verfolgten verschiedene deutsche Anlagenbauer unterschiedliche Ansätze: Centrotherm z.B. arbeitete an Low-Pressure Chemical Vapor Deposition (LPCVD) und Plasma Enhanced (PE) CVD, Meyer-Burger an PECVD, Schmid an Atmospheric Pressure CVD, und andere Hersteller an Sputterprozessen. Welche Technologie sich als die geeignetste herausstellt, ist zum Projektbeginn noch unklar und hängt von verschiedenen Faktoren (Schichtqualität, Durchsatz, Kantenumgriff, Wartungsbedarf der Anlagen, ...) ab. Ein sensitiver Höchsteffizienz-Zellprozess, wie er im Vorhaben „27plus6“ angestrebt wird, bietet eine hervorragende Plattform zur Evaluation der verschiedenen Technologien.

Zu Si-basierten Tunneljunctions

Si-basierte passivierende Kontakte erlauben, wenn stark n- und p-dotierte Schichten als Tunneljunction gestapelt werden [4], eine niederohmige Verbindung von Bottom- und Topsolarzelle bei gleichzeitiger Passivierung der Bottomsolarzelle. Dieses Interface weist zudem bessere optischen Eigenschaften auf als TCO-basierte Verbindungen [5]. Solche Si-basierten Tunneljunctions lassen sich sowohl mit nanokristallinem Silizium [6], oder, wie im Projekt „EASi“ gezeigt [7], mit polykristallinem Si realisieren. Auch hier hat die letztere Variante den Vorteil der Kompatibilität mit dem Temperaturbudget heutiger Standard- (Metallisierungs-) Prozesse.

Zu Perowskit-PV

Das enorme Potenzial von Organo-Metall-Halogenid Perowskit-Dünnschichtsolarzellen hat in den letzten Jahren zu einem beispiellos rasanten Fortschritt des Wirkungsgrades dieser Technologie geführt. Heute, knapp 10 Jahre nach dem Bericht der ersten bekannten Perowskit-Solarzelle mit 3,9% [8], wurden bereits Wirkungsgrade von 25,2% zertifiziert (Abbildung 1) [1]. Das herausragende Potential dieses Materials basiert auf einer nahezu optimalen Kombination von elektrischen und optischen Materialeigenschaften für die Photovoltaik [9,10]. Darüber hinaus lassen sich Perowskit-Dünnschichtsolarzellen aus preiswerten Präkursoren herstellen und mittels kostengünstiger Verfahren aus der Flüssigphase und einfacher thermischer Vakuumverdampfung großflächig skalieren [11,12,13,14,15]. Die verbleibenden bedeutenden Herausforderungen der Technologie sind die noch zu geringe Stabilität und die Substitution des giftigen Schwermetalls Pb.

Damit steht zum ersten Mal in der Geschichte der Photovoltaik eine kostengünstige Technologie zur Verfügung, die in Kombination mit konventionellen Solarzellen aus kristallinem Silizium einen Wirkungsgrad oberhalb von 35% erreichen kann. Im Vergleich mit dem aktuellen Rekordwirkungsgrad der Silizium-Solarzellen von 26,7% bedeutet dies ein gewaltiges Potential zur Wirkungsgradsteigerung. Dieses Potential weckt das Interesse einer stark wachsenden Forschungs-Community und der Industrie. Wie eingangs erwähnt haben mehrere Forschungsgruppen inklusive dem KIT bereits Tandemwirkungsgrade auf kleinen Flächen von über 25% erreicht, sowohl für 2-Terminal [16,17,18,19], als auch für die 4-Terminal-Architektur [20,21,22,23,24,25,26]. Mit einem Wirkungsgrad von 28% wurde der Rekordwirkungsgrad für c-Si-Einfachsolarzellen bereits überboten.

Zur Herstellung von Perowskit-Solarzellen im Labormaßstab werden meist lösungsbasierte Prozessierungstechniken verwendet (z.B. Rotationsbeschichtung, Inkjet-Druck, Rakelbeschichtung), die bei großer Einfachheit und Flexibilität aktuell die besten Wirkungsgrade liefern. Auch im Rahmen dieses Vorhabens sollen diese Ansätze zur Entwicklung hocheffizienter Tandemsolarzellen (3-Terminal Architektur auf planaren Si-Bottomsolarzellen, ggf. 4-Terminal als Zwischenschritt) eingesetzt werden. Eine für den industriellen Einsatz erforderliche Aufskalierung mittels lösungsbasierter Verfahren lässt sich durch Methoden wie Spray-Coating, Rakeln und Schlitzgießen erzielen [13,14,27]

Eine große Herausforderung für die Kombination der neuartigen Perowskit- mit der etablierten Siliziumsolarzellentechnologie stellt die texturierte Oberfläche der Bottomsolarzelle dar. Die homogene und konforme Beschichtung von Mikrometer großen Pyramiden mit einer typischerweise $< 1 \mu\text{m}$ dicken Topzellstruktur wurde durch rein lösungsbasierte Verfahren bisher nicht erreicht. Dies hat zur Folge, dass aktuell die meisten Si/Perowskit-Tandemsolarzellen auf planaren Si-Substraten prozessiert werden, wodurch der erreichbare Kurzschlussstrom der Tandemsolarzellen aufgrund von Reflektions- und Absorptionsverlusten um bis zu 3 mA/cm^2 reduziert werden kann [28,29]. Für 2-Terminal Tandemsolarzellen mit planarer Si-Bottomzelle wurden auf kleinen Flächen - mithilfe von Lichtstreu-Folien oder antireflektiven Schichten zur Verbesserung des Lichtmanagements - Effizienzen von bis zu 26% realisiert [30,31,32]. Allerdings zeigen aktuelle Simulationen mit state-of-the-art Bottom- und Topsolarzellen, dass der erreichbare Wirkungsgrad selbst bei optimiertem Lichtmanagement der Topzelle und minimaler parasitärer Absorption für solche planaren Architekturen bei ca. 31% liegt [33,32]. Ein Ansatz diese Verluste auszugleichen besteht in der Verwendung von rauen Zwischenschichten um die optische Weglänge im Absorber zu verlängern [34]. Zusätzlich konnten Sahli et al. [35] zeigen, dass durch die Verwendung einer sequentiellen Beschichtung einer texturierten Si-Bottomzelle zunächst mit einem porösem, anorganischen Metallhalogenid aus der Gasphase, und anschließender flüssigbasierter Infiltration mit einem organischen Halid, eine homogene Topzellenstruktur auf einer texturierten Bottomzelle aufgebaut werden kann. Mit dieser Methode wurde ein Wirkungsgrad von 25,2% für eine monolithische texturierte Si/Perowskit-Tandemsolarzelle erreicht.

Trotz dieser Erfolge ist die Vakuumdeposition des Perowskitabsorbers auf kommerziell verfügbaren texturierten Si-Substraten ein besonders attraktiver Ansatz zur Herstellung von Si/Perowskit-Tandemsolarzellen. Diese industriell sehr ausgereifte Technik ermöglicht eine hohe Materialreinheit, die Vermeidung von toxischen Lösungsmitteln, eine exzellente Kontrolle und Reproduzierbarkeit der Prozessbedingungen und eine gute Homogenität der Materialabscheidung auf großer Fläche. Trotz dieser offensichtlichen Vorteile wurde die Vakuumdeposition von Perowskiten bisher weniger stark verfolgt als die Lösungsprozessierung, was vor allem auf die größere Komplexität des Ansatzes und die damit verbundenen apparativen Kosten zurückgeführt werden kann. Jedoch ist aufgrund der hohen technologischen Relevanz ein zunehmender Trend zum Einsatz dieses Verfahrens zu verzeichnen [15].

Die am häufigsten eingesetzte Methode zur vakuumbasierten Perowskit-Herstellung ist die thermische Koverdampfung der Präkursoren AX (z. B. MAI) und BX₂ (z. B. PbI₂) aus separaten Quellen [36], welche auch am KIT und ISFH eingesetzt wird. Die Sublimationsraten werden mittels Quarzkristall-Mikrowaagen (QCM) überwacht, um eine exakte Kontrolle der Schichtdicken und -

zusammensetzungen zu erreichen. Bei geeignet gewählter Stöchiometrie kann die Abscheidung häufig bei Raumtemperatur ohne weitere thermische Behandlung erfolgen [37]. Dies ermöglicht z.B. die Verwendung thermisch sensibler Transportschichten oder Substrate, minimiert aber auch die Interdiffusion in Multi-Schichtsystemen, was für Tandem-Anwendungen von großem Vorteil ist. Als wichtigen Schritt hin zur industriellen Aufskalierung wurden schon vollständig vakuumprozessierte Bauelemente mit einem Wirkungsgrad von 17,6% demonstriert [38]. Das KIT hat in den letzten Jahren auf diesem Gebiet nachgewiesene Expertise entwickelt, welche reproduzierbar zu hohen Effizienzen von ~16% für koverdampfte Perowskitesolarzellen führt [29,39]. Diese Thematik bildet deshalb einen zentralen Schwerpunkt der Arbeiten am KIT sowie beim ISFH.

Zu 3-Terminal-Tandemsolarzellen

Bei der 4-Terminal Architektur werden beide Solarzellen übereinandergestapelt und unabhängig voneinander betrieben, was den Vorteil hat, dass die Effizienz beider Zellen separat optimiert werden können. Allerdings erhöht sich die Anzahl der benötigten Zwischenschichten, was die Reflexion und parasitäre Absorption verstärkt [40]. Zusätzlich werden zwei Wechselrichter für den Betrieb eines Moduls benötigt. In der 2-Terminal Architektur sind beide Zellen monolithisch miteinander verbunden und somit serienverschaltet. Deshalb müssen beide Subzellen denselben Strom führen und die Subzelle mit dem geringeren Strom limitiert den nutzbaren Strom der Tandemsolarzelle. Die erforderliche Optimierung der Stromanpassung beider Zellen hat deshalb starke Einschränkungen bezüglich der Bandlücke und Dicke des Perowskit-Absorbers zur Folge [**Fehler! Textmarke nicht definiert.**]. Weiterhin zeigen Energieertragsberechnungen, dass die Stromausbeute für die 2-Terminal Architektur deshalb stark abhängig von dem Ort ist an dem die Solarzelle betrieben wird (Einfluss auf den Energieertrag durch mit Tageszeit und Jahreszeit veränderliche spektraler Einstrahlung und Einstrahlungswinkel) [41,42].

Die 3-Terminal Architektur kann die Vorteile beider Architekturen vereinen, indem der (im Optimalfall texturierte) monolithische Aufbau für eine bessere Lichtausbeute genutzt wird und gleichzeitig keine Stromanpassung nötig ist, was die durchschnittliche Energieausbeute stark erhöht. Allerdings sind die Bauelementarchitektur und das Verschaltungskonzept dementsprechend komplexer. In den letzten 2,5 Jahren wurde im Rahmen des Projektes EASi (FKZ 0324040) und eines DFG-Auslandsstipendiums (Fördernummer SCHU 3206/1-1) in einer intensiven Zusammenarbeit von Wissenschaftlern des NREL und des ISFH Pionierarbeit zum Thema 3-Terminal Tandemsolarzellen geleistet und am ISFH eine einmalige Expertise auf den Gebieten der Herstellung, Charakterisierung und Modellierung von 3-Terminal IBC-Bottomzellen [43,44,45,46] und Tandemsolarzellen [47,48,49,50], sowie der Modellierung und Simulation von Energieerträgen für unterschiedliche Verschaltungskonzepte von Tandemsolarzellen auf Modulebene [51,51] aufgebaut.

Im ersten Schritt konnten 4-Terminal GaInP/GaAs//Si-IBC- und GaInP//Si-IBC- Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 35,4% (Vizeweltrekord für Si-basierte Tandemzellen) und 31,5% hergestellt werden [52], die extern zu 3-Terminal Tandemzellen verschaltet wurden und exakt den gleichen Wirkungsgrad erreichen, wie 4-Terminal Tandemsolarzellen [49]. Das Funktionsprinzip einer 3-Terminal IBC-Bottomzelle in einem Tandem wurde mittels Bauelementesimulationen [53] und Experimenten [54,55,56] untersucht. Anhand des vorgeschlagenen einfachen Ersatzschaltbildmodells wurden optimale Designkriterien und Vereinfachungen für Bottomsolarzellen vorgeschlagen, die sich an Standard-Industrieprozessen für PERC-Solarzellen orientieren [56]. Parallel zu diesen Untersuchungen wurden erstmals „Teststruktur“-artige 3-

Terminal GaInP/Si-IBC-Solarzellen mit einem zertifizierten Wirkungsgrad von 27,3% demonstriert [49].

Ein weiterer elementarer Aspekt im Hinblick auf die Industrialisierung von Tandemsolarzellen ist die kosteneffiziente Integration der Solarzellen in Module und Systeme. Hierbei kann das 2-Terminal Tandem direkt mit der etablierten Modul- und Systemtechnik integriert werden, da lediglich zwei Kontakte, wie bei Einfachsolarzellen, vorhanden sind. 3-Terminal und 4-Terminal Tandemsolarzellen erfordern wegen der zusätzlichen Kontakte entweder zusätzlichen Aufwand auf der Systemseite (zwei separate Schaltkreise mit entsprechenden Wechselrichtern), oder eine geschickte Verschaltung beider Schaltkreise zu einem spannungsangepassten 2-Terminal Modul [57,58,59]. Als wichtige Bausteine wurden die Verschaltung für 3-Terminal Tandemsolarzellen in 2-Terminal Module und die Modelle für die Ertragsrechnung für verschiedene Verschaltungskonzepte entwickelt [Fehler! Textmarke nicht definiert.51]. Es konnte demonstriert werden, dass 3-Terminal Tandemsolarzellen annähernd verlustfrei in spannungsangepasste 2-Terminal Module integriert werden können und einen deutlich höheren Energieertrag gegenüber Modulen mit 2-Terminal Tandemsolarzellen liefern können.

Es ist zu beachten, dass derzeit, aufgrund von existierender Vorerfahrung, ausschließlich Si/Perowskit-Tandemsolarzellen in der 4-Terminal und 2-Terminal Architektur berichtet wurden. Die in diesem Forschungsprojekt angestrebten Si/Perowskit-Tandemsolarzellen in der 3-Terminal Architektur versprechen technologische Vorteile, die sich sowohl auf das Wirkungsgradsteigerungspotential als auch die Realisierung in industrienahen Prozessen auswirken. Aktuelle Simulationen - unter Nutzung von realistischen optischen Parametern der Schichtstapel, einer 22,4% effizienten Perowskit-Topsolarzelle und einer planaren 24,5% effizienten Si-Bottomsolarzelle - versprechen Effizienzen von bis zu 32% für die 3-Terminal Architektur. Diese Zahl erhöht sich dementsprechend bei Nutzung einer texturierten und höher effizienten Si-Bottomzelle [60].

1.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN

In 27plus6 arbeitete das ISFH mit allen innerhalb des Konsortiums zusammen. Alle Partner beteiligten sich an den Projekttreffen, indem sie sich intensiv in die Diskussion der Ergebnisse einbrachten.

Mit dem KIT arbeitet das ISFH an der Entwicklung von Top- und Tandemsolarzellen und stimmte sich regelmäßig (min. 6-wöchentlicher Rhythmus) zu allen nötigen Entwicklungsarbeiten an Bottom- und Topzellen und am Interface aus. Mit der Firma centrotherm arbeitete das ISFH an der Prozessentwicklung am PECVD-Ofen von centrotherm zusammen, welche im Rahmen von Förderprojekt 2Power (FKZ 03EE1098) am ISFH installiert wurde.

Aus der Industrie haben sich die Firmen vonArdenne, Singulus und Meyer-Burger als „assoziierte Partner“ an dem Projekt beteiligen. Sie haben an Projekttreffen und ausgewählten Telefonkonferenzen teilgenommen. Firma vonArdenne evaluierte zusammen mit dem ISFH einen Trockenätzprozess und das Sputtern von einem transparenten leitfähigem Oxid für die Anwendung in Tandemsolarzellen. Firma Singulus entwickelte in Zusammenarbeit mit dem KIT nanotexturierte Siliziumoberflächen, die sich für die Lösungsbasierte Perowskitherstellung eignen, und stellte mehrfach ihren Herstellungsprozess für Nanotexturen bei der Bottomzellherstellung zur Verfügung.

Firma Meyer Burger stellte einerseits die erste Generation von Bottomsolarzellen zur Verfügung und unterstützte bei der TCO-Beschichtung von Bottomsolarzellen.

Darüber hinaus besteht bereits seit längerem eine informelle Zusammenarbeit zwischen dem ISFH und dem amerikanischen National Renewable Energy Laboratory (NREL) auf dem Gebiet von Si-basierten Tandemsolarzellen mit III/V-Topsolarzellen. Die Expertise und Erkenntnisse aus dieser Zusammenarbeit sind in das Vorhaben einfließen und es fand eine Zusammenarbeit bei den Themen hinsichtlich der Messung und Modulverschaltung von 3T-Tandemsolarzellen statt.

Weiterhin hat das ISFH im Rahmen von 27plus6 eine internationale Kollaboration zwischen der Swinburne University of Technology (Australien), Melbourne Center for Nanofabrication (Australien), University of Toronto (Kanada) und dem Institut für Materialien und Bauelemente der Elektronik (Leibniz Universität Hannover) zum Thema „Photonische Kristalle als Lichteinfangstruktur für IBC-Zellen“ etabliert.

2. EINGEHENDE DARSTELLUNG

Im Folgenden werden die im 27plus6-Projekt erzielten Ergebnisse ausführlich dargestellt sowie der voraussichtliche Nutzen und die Ergebnisverwertung des Projektes dargelegt.

2.1 ERZIELTE ERGEBNISSE

2.1.1 Simulationsgestützte Weiterentwicklung des 26.1%-effizienten POLO²-IBC-Basiszellprozesses zu Effizienzen >27%

Im AP1.1 „Entwicklung von Si-Einfachsolarzellen mit Wirkungsgraden über 27 %“ sollte der Herstellungsprozess der 26.1%-effizienten POLO²-IBC-Zelle aus dem Projekt „26+“ (FKZ 0325827A) reproduziert und weiterentwickelt werden.

Wir führten hierzu numerische, dreidimensionale Bauelementesimulationen der POLO²-IBC-Solarzellen durch, um zu untersuchen, inwieweit POLO²-IBC-Solarzellen optimiert werden können [61]. Die Simulationen der Einheitszelle werden in Quokka2 [62] durchgeführt, in welche wir die gemessenen Eingangsparameter aus C. Hollemann für die Referenzsolarzelle aus dem Projekt „26+“ mit einer Basisohmigkeit von 1.3 Ohmcm [63] verwenden.

Die simulierte Referenzsolarzelle weist eine Effizienz von 26.56 % mit einer Leerlaufspannung V_{OC} von 729.5 mV, einer Kurzschlussstromdichte J_{SC} von 42.97 mA/cm² und einem Füllfaktor FF von 84.73% auf. Die Quokka2-Simulation bildet lediglich eine Einheitszelle ab und vernachlässigt damit jegliche Effekte im Randbereich der Solarzelle. Für den Randeffect bei der 26.1%-POLO²-IBC-Zelle berichteten Haase *et al.* einen Verlust in der Effizienz von mindestens 0.3%_{abs.}, im V_{OC} von 7 mV und im FF von 0.25 %. Damit stimmt die Charakteristik der simulierten Solarzelle mit der 26.1%-POLO²-IBC-Zelle im Rahmen der Messunsicherheit überein. Abbildung 3 zeigt die Analyse der Verlustpfade mit Hilfe der Free Energy Loss Analysis (FELA) [64].

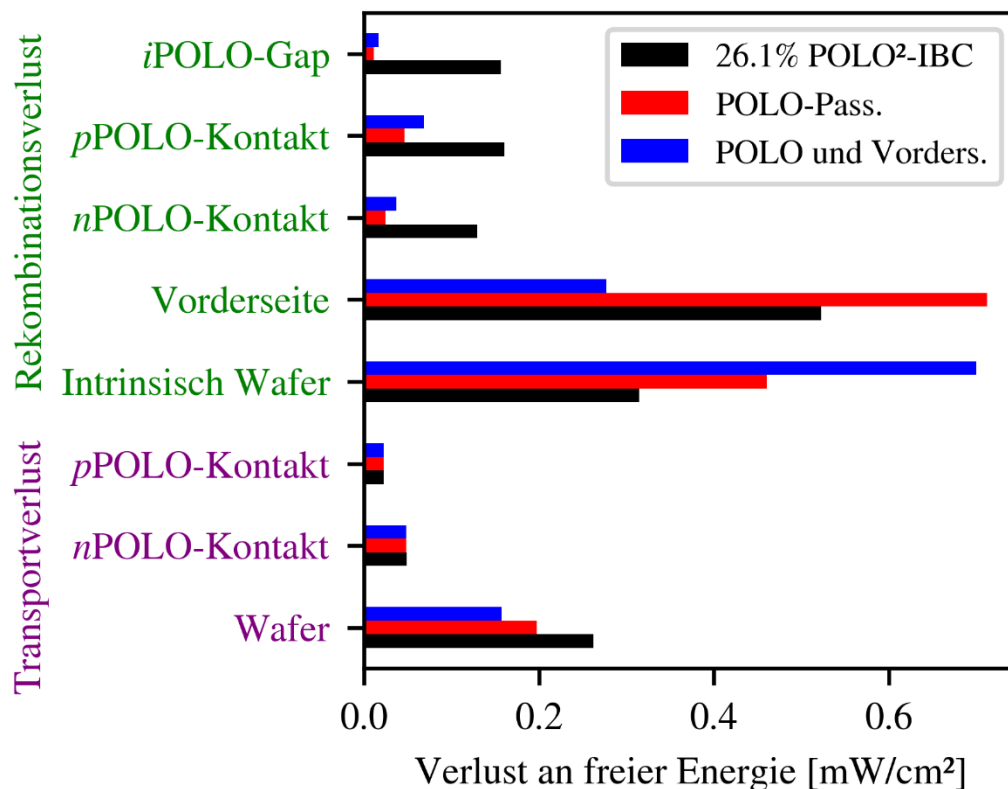


Abbildung 3: FELA-Verlustanalyse mit den wichtigsten Verlustpfaden – Rekombination (grün) und Transport (violett) – in der simulierten POLO²-IBC-Zelle wie sie im Projekt „26+“ hergestellt wurde (schwarz) und in weiterentwickelten POLO²-IBC-Zellen mit verbesserter POLO-Passivierung (rot) oder verbesserter POLO- und Vorderseiten-Passivierung (blau).

Für die 26.1%-POLO²-IBC-Zelle ergeben sich vier dominante elektrische Verlustpfade: intrinsische Rekombination (0.31 mW/cm^2) und Ladungsträgertransport (0.26 mW/cm^2) im Wafer und die Defektrekombination an der Vorderseitenpassivierung (0.52 mW/cm^2) und an der POLO-Rückseite (0.45 mW/cm^2). Die Minimierung der Verluste aus den vier dominanten Verlustpfaden erfordern unterschiedliche Verbesserungsmaßnahmen, dessen Einfluss auf die Zelleffizienz im Folgenden quantifiziert wird.

Die POLO-Passivierung auf der Rückseite kann durch eine verbesserte Hydrogenierung auf Rekombinationsvorfaktoren von ca. 1 fA/cm^2 für $n\text{POLO}$ und $p\text{POLO}$ und Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeiten von ca. 1 cm/s für das Gap zwischen $n\text{POLO}$ und $p\text{POLO}$ gesenkt werden. Abbildung 3 zeigt Verlustpfade mit verbesserter Passivierung der POLO-Rückseite (0.5 fA/cm^2 für $n\text{POLO}$, 2 fA/cm^2 für $p\text{POLO}$, 1 cm/s für das iPOLO-Gap). Der Rekombinationsverlust wird durch eine optimierte Hydrogenierung der POLO-Rückseite auf 0.1 mW/cm^2 deutlich verringert. Allerdings führt die reduzierte Rekombination auf der Rückseite – gemäß der „Leaky Bucket“-Analogie [65] – zur verstärkten Rekombination auf der Vorderseite (0.71 mW/cm^2) und im Wafer (0.46 mW/cm^2). Der Elektronentransportverlust im Wafer sinkt leicht wegen der erhöht Ladungsträgerkonzentration/Spannung und damit höheren Leitfähigkeit für Elektronen. Daher wirkt sich jegliche Verminderung der Rekombination, die mit einer Überschussladungsträgererhöhung einhergeht, positiv auf den Ladungsträgertransport aus. Die POLO²-IBC-Solarzelle mit optimierter Hydrogenierung weist in der Simulation eine Effizienz von

27.02 % mit einer Leerlaufspannung V_{OC} von 737.6 mV, einer Kurzschlussstromdichte J_{SC} von 43.04 mA/cm² und einem Füllfaktor FF von 85.14 % auf.

Die Vorderseitenpassivierung kann durch Minimierung von Degradation während des Herstellungsprozesses [66] und ggf. weitere Strategien auf Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeiten von 2 cm/s verringert werden. Die Verbesserung der Vorderseitenpassivierung (ohne Hydrogenierung der POLO-Rückseite) führt zur wesentlichen Reduzierung der Rekombinationsverluste auf 0.18 mW/cm² auf der Vorderseite der Solarzelle, jedoch erneut unter Erhöhung der Rekombination im Wafer und auf der POLO-Rückseite. Die POLO²-IBC-Solarzelle mit verbesserter Vorderseitenpassivierung weist in der Simulation eine Effizienz von 26.97 % mit einer Leerlaufspannung V_{OC} von 733.4 mV, einer Kurzschlussstromdichte J_{SC} von 43.11 mA/cm² und einem Füllfaktor FF von 85.30 % auf.

Die Verbesserung durch die Einzelmaßnahmen führen jeweils zu einer Effizienzsteigerung von ca. 0.5%_{abs.}, allerdings sind die simulierten absoluten Effizienzen – ohne Berücksichtigung der Randverluste – lediglich bei 27%. Daher müssen beide Verbesserungen zu einem gewissen Grad in die Solarzelle implementiert werden, um Effizienzen über 27 % zu erhalten.

Die POLO²-IBC-Solarzelle mit gleichzeitig verbesserter POLO-Rückseiten- und Vorderseitenpassivierung weist in der Simulation eine Effizienz von 27.61 % mit einer Leerlaufspannung V_{OC} von 741.9 mV, einer Kurzschlussstromdichte J_{SC} von 43.17 mA/cm² und einem Füllfaktor FF von 86.21 % auf.

Die Verlustanalyse in Abbildung 3 (blau) für ein POLO²-IBC-Zelle mit der Kombination aus der Verbesserung der POLO-Rückseite und der Vorderseitenpassivierung hebt die Verringerung der Rekombinationsverluste an der POLO-Rückseite (0.12 mW/cm²) und der Vorderseite (0.28 mW/cm²) hervor, die mit der Erhöhung der intrinsischen Rekombinationsverluste auf 0.7 mW/cm² einhergehen. Damit verursacht die intrinsische Rekombination mehr als die Hälfte der Verluste.

Auger-Rekombination und strahlende Rekombination im Wafer bilden den dominanten intrinsische Rekombinationpfad, welcher vor allem durch die Reduktion der Waferdicke verringert werden kann. Andererseits generiert eine Solarzelle mit reduzierter Absorberdicke und bei gleichbleibendem Lichteinfangvermögen (Wegverlängerung des Lichtes) einen geringeren Fotogenerationsstrom. Beispielsweise würde eine POLO²-IBC-Solarzelle (mit verbesserter Vorderseiten- und Rückseitenpassivierung) mit einem 150-µm-dickem statt 290-µm-dickem Absorber und mit Random-Pyramid-Textur laut Ray-Tracing-Simulation eine Strom von 42.57 mA/cm² generieren und damit insgesamt zu einer Effizienz von 27.59 % (V_{OC} = 752.4 mV, J_{SC} = 42.53 mA/cm², FF = 86.22 %) führen. Die geringere intrinsische Rekombination im dünneren Absorber wird durch einen verminderten Generationsstrom kompensiert, so dass die Effizienz zwischen 150-µm-dicken und 290-µm-dicken Absorbern annähernd konstant bleibt [67].

Gelingt es jedoch das Lichteinfangvermögen der Solarzelle durch die Verwendung von neuartigen photonischen Konzepten wie Photonischen Kristallen zu verbessern, kann die Absorberdicke reduziert werden, ohne bei der Fotogeneration stark einzubüßen. Für eine hypothetische IBC-Solarzelle mit photonischen Kristallen und einer Absorberdicke von 15 µm haben Bhattachary und John eine Fotogenerationsstromdichte von 44.39 mA/cm² vorhergesagt [68], was als untere Grenze

für dickere Absorber betrachtet werden kann. Wird ein photonischer Kristall nach Bhattachary und John in einer POLO²-IBC-Solarzelle mit optimierten Vorder- und Rückseitenpassivierungen und mit einer Absorberdicke von 290 µm bzw. 150 µm implementiert, ließen sich POLO²-IBC-Zelle einer Effizienz von 28.34 % ($V_{OC} = 742.4$ mV, $J_{SC} = 44.26$ mA/cm², FF = 86.22 %) bzw. 28.81 % ($V_{OC} = 753.3$ mV, $J_{SC} = 44.35$ mA/cm², FF = 86.24 %) erreichen.

2.1.2 Verbesserung der POLO-Rückseitenpassivierung: Hydrogenierung, Laserkontaktöffnungsprozess & ladungsinduzierter parasitärer Rekombinationseffekt

Verbesserte Hydrogenierung

Im bisherigen Zellprozess der POLO²-IBC-Zelle mit 26.1% aus dem Projekt „26+“ wurde das thermisch gewachsene Siliziumdioxid für den Rückreflektor verwendet, welches zwar einen Laserablationsprozess für die Kontaktöffnung ermöglicht, jedoch einerseits einen Teil des Polysiliziums (~40nm) des POLO-Kontaktes konsumiert und andererseits die Diffusion von Wasserstoff zur c-Si-Grenzfläche behindert und ein effizientes Hydrogenieren erschwert.

Daher wurde in AP1.1.3 das thermische SiO₂ von den POLO-Kontakten entfernt und die POLO-Kontakte durch das effizientere Einbringen von Wasserstoff weiter verbessert. Basierend auf dem Bericht von Stodolny *et al.* über die herausragende Hydrogenierung von POLO-Kontakten durch Al₂O₃/SiNy/Al₂O₃-Wasserstoffspender-Schichtstapel [69], brachten wir Al₂O₃/SiNy/Al₂O₃-Stapel auf die POLO-Kontakte auf (Abbildung 4).

Dieser Schichtstapel ermöglicht einerseits die effiziente Hydrogenierung und andererseits die Verwendung der sogenannten Trenchzelle, wo der Trench n^+ und p^+ Polysilizium auf der Rückseite der Solarzelle durch einen nasschemisch erzeugten Graben trennt und dadurch parasitäre Effekte an der pn-Diode im Polysilizium vermeidet. Der ins c-Si geätzten Graben wird durch den Al₂O₃/SiNy/Al₂O₃-Schichtstapel hervorragend passiviert.

Durch das Tempern der POLO-Kontakte mit dem Dreifachschichtstapel wird Wasserstoff aus den wasserstoffreichen Al₂O₃- und SiNy-Schichten zur SiO₂/c-Si-Grenzfläche transportiert und passiviert vorhandene Defekte. Die Al₂O₃-Schicht, welche auf die SiNy-Schicht aufgebracht wird, dient dabei als Diffusionsbarriere gegenüber der Atmosphäre, um den Wasserstoff gezielt in die Probe einbringen zu können. Abbildung 4 zeigt die Ladungsträgerlebensdauer der symmetrischen POLO-Proben (wie in Abbildung 4 dargestellt) bei einem Injektionsniveau von $\Delta n = 10^{15}$ cm⁻³ in unterschiedlichen Stadien. Die Temperprozesse nach der Abscheidung werden kumulativ durchgeführt. Die entsprechenden Referenzwerte für unsere frühere Passivierung durch Hydrogenierung mittels einer SiNy-Opferschicht auf dem dicken thermischen Oxid sind als horizontale gestrichelte Linien dargestellt.

Nach der Formierung der POLO-Kontakte, liegt die Lebensdauer über der Lebensdauer der 26.1%-Referenzproben, obwohl zu diesem Zeitpunkt noch kein Wasserstoff eingebracht wurde. Dies zeigt, dass die effektiven Lebensdauern an bis zu diesem Zeitpunkt nominell identisch bearbeiteten Proben von Lauf zu Lauf streuen. Da die J_0 -Werte in diesem Stadium mit früheren Werten vergleichbar sind, schließen wir, dass die höheren effektiven Lebensdauern durch höhere

Volumenlebensdauern begünstigt werden. Wir vermuten, dass die Effizienz unserer Reinigungssequenzen, wenn auch in jedem Fall auf hohem Niveau ist, schwankt.

Die Hydrogenierung durch unseren dielektrischen Dreifachstapel verbessert die Oberflächenpassivierung eindeutig. Interessant ist, dass die Abscheidung des Schichtstapels selbst die Lebensdauer von *n*POLO verringert. Die effektiven Lebensdauern verbessern sich jedoch nach dem anschließenden Tempern aufgrund einer Verringerung der J_0 -Werte für *n*POLO, *p*POLO und *i*POLO. Quokka-Simulationen der Injektionsabhängigen effektiven Lebensdauern zeigen, dass der J_0 -Wert für *p*POLO von 10 fA/cm² auf $3,3 \pm 0,7$ fA/cm² reduziert wird. Für *n*POLO verringert sich das J_0 von 4 fA/cm² auf $0,5 \pm 0,2$ fA/cm². Für *n*POLO übersteigen die Absolutwerte der effektiven Lebensdauern 70 ms bei einem Injektionsniveau von 10^{15} cm⁻³. Durch optimierte Prozessbedingungen wie z.B. die verwendeten Schichtdicken im Dreifachschichtstapel und des verwendeten Temperaturbudgets konnten J_0 -Bestwerte für *n*POLO- bzw. *p*POLO-Kontakte von 0,2 fA/cm² bzw. $1,8 \pm 1,6$ fA/cm² erreicht werden, welche die angenommenen Werte für die verbesserte POLO-Rückseitenpassivierung übertreffen.

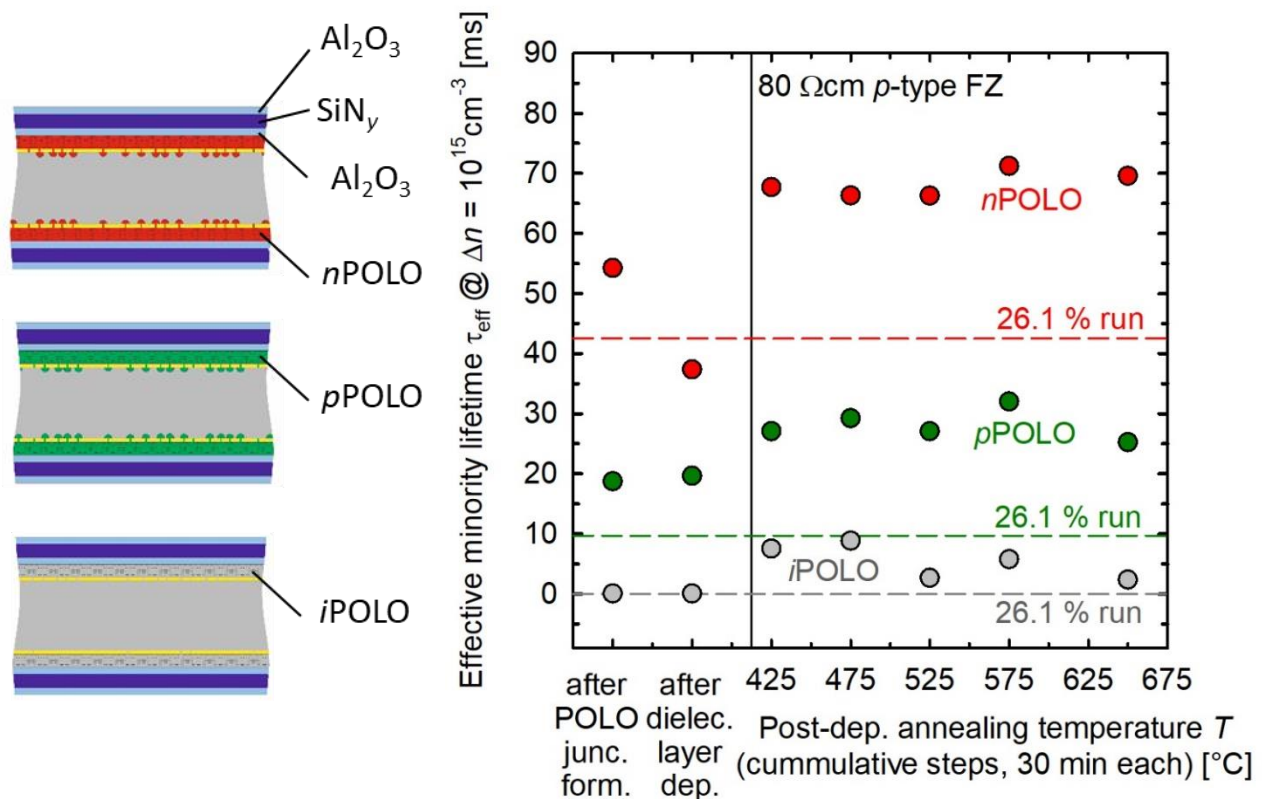


Abbildung 4: *n*POLO-, *p*POLO- und *i*POLO-Lebensdauerproben mit $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Dreifachschichtstapel (links) zu verbesserten Hydrogenierung und Ladungsträgerlebensdauern *n*POLO-, *p*POLO- und *i*POLO-Lebensdauerproben (rechts) bei einem Injektionsniveau von 10^{15} cm⁻³ nach POLO-Kontaktformierung, Abscheidung des Dreifachschichtstapels und nach kumulativem Tempern. Gestrichelte Linien im Lebensdauerdiagramm entsprechen den Lebensdauer-Referenzen der 26.1%-POLO²-IBC-Solarzelle nach Hydrogenierung durch das dicke thermische Oxid mittels Wasserstoff aus einer SiN_x -Spenderschicht.

Für die Proben mit intrinsischem Poly-Si/SiO_x haben wir mit unserem früheren Hydrierungsprozess nur effektive Lebensdauern im Bereich von ein paar Mikrosekunden mit unserem früheren Hydrierungsprozess. Ähnliche Werte erhalten wir im aktuellen Experiment nach der Bildung des

POLO-Übergangs und nach der Abscheidung des dielektrischen Schichtstapels. Nach dem Tempern bei 425 °C für 30 min steigt die effektive Lebensdauer bei einem Injektionsniveau von 10^{15} cm^{-3} auf 7,5 ms. Eine anschließende Temperung bei 450°C führt sogar zu 8,8 ms. Quokka-Simulationen der Injektionsabhängigen effektiven Lebensdauern zeigen, dass damit eine Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit S_{eff} von 1,5 cm/s für *i*POLO auf 80 Ωcm -Wafern erreicht wurde. Bei 1,3 Ωcm -Wafern konnte jedoch lediglich ein S_{eff} von 12 cm/s erreicht werden. Da jedoch Phosphor und Bor in das undotierte Poly-Si in der POLO²-IBC-Zelle diffundieren und damit die Passivierung des anfangs undotierten *i*POLO-Gaps verbessert, was sogar mit einem weniger exzellenten Hydrogenierungsschema zu einer 26.1%-effiziente POLO²-IBC-Solarzelle führt, erwarten wir mit der verbesserten Passivierung auch eine höhere Effizienz zu erreichen.

Zusammenfassend konnten durch das optimierte Hydrogenierungsschema die POLO-Kontakte wesentlich verbessert werden, die laut Quokka-Simulation aus Kapitel 2.1.1 als alleinige Maßnahme zu einer Verbesserung der Effizienz von 0.5%_{abs} führen sollte.

Laserkontaktöffnungsprozess

Für die Implementierung des $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_y/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Dreifachschichtstapel in POLO²-IBC-Zellen wurde der Prozess zur Laserkontaktöffnung weiterentwickelt. Im bisherigen Zellprozess der POLO²-IBC-Zelle mit 26.1% wurde das thermisch gewachsene Siliziumdioxid für den Rückseitenreflektor verwendet, welches zwar einen Laserablationsprozess für die Kontaktöffnung erlaubt, jedoch einen Teil des Polysiliziums (~40nm von insgesamt ca. 110 – 150 nm) des POLO-Kontaktes konsumiert. Auf mittels CVD abgeschiedene Schichten – wie im Dreifachschichtstapel – konnte der Ablationsprozess im Projekt „26+“ nicht übertragen werden.

Für die Erzeugung von Kontaktöffnungen wurde ein sanftes Laserablationsverfahren entwickelt, welcher selbst auf 50 nm dünnen POLO-Kontakten eine 250nm dicken $\text{AlOx}/\text{SiN}_y/(\text{AlOx})/\text{SiO}_2$ -Schichtstapel sicher entfernen kann ohne die Passivierqualität der POLO-Kontakte zu beeinträchtigen. Abbildung 5 zeigt normalisierte Lebensdauern von *n*POLO-Proben nach der Laserkontaktöffnung bezogen auf die Lebensdauer vor der Laserkontaktöffnung. Bei einer Laser-Fluenz unter 700 mJ/cm² gleichen sich die Lebensdauer der *n*POLO-Proben mit 50 nm Poly-Si vor und nach der Laserkontaktöffnung, so dass in diesem Prozessfenster eine Laserkontaktöffnung ohne Beeinträchtigung der Passivierqualität möglich ist. Der Laserprozess wird durch die Wahl des $\text{AlOx}/\text{SiN}_y/\text{SiO}_2$ -Schichtstapels ermöglicht, in dem das SiN_y mit hohem Brechungsindex einen Großteil der UV-Strahlung absorbiert, bevor diese die Poly-Si-Schicht des POLO-Kontakt erreicht. Das „verdampfte“ SiN_y sprengt die SiO_2 -Deckschicht ab. Abbildung 5 zeigt eine Laserkontaktöffnung mit der SiO_2 -Abrisskante außen, der freiliegenden Poly-Si-Schicht in der Mitte und dem teilweise unvollständig entfernten SiN_x zwischen der Abrisskante und der Mitte. Die Al_2O_3 -Schicht (im REM-Bild nicht zu sehen) auf dem Poly-Si bleibt bei einer Prozessführung mit geringer Fluenz beim Ablationsprozess erhalten, kann jedoch durch eine kurze, niederprozentige HF-Behandlung entfernt werden. Abbildung 5 (unten rechts) zeigt einen Querbruch durch eine Laserkontaktöffnung nach kurzer HF-Behandlung und Metallisierung mit Al. An der Polysilizium-Schicht ist mittels Rasterelektronenmikroskopie vor und nach der Laserablation strukturell kein Unterschied feststellbar, so dass davon auszugehen ist, dass der Laserkontaktöffnungsprozess keinen negativen Einfluss auf den POLO-Kontakt ausübt.

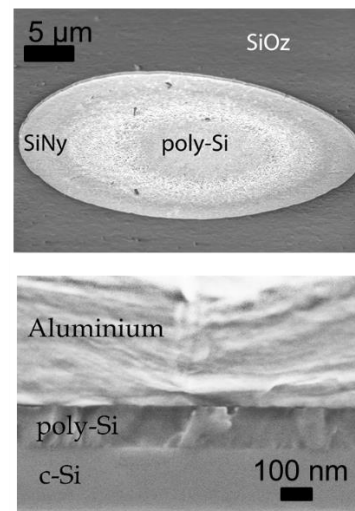
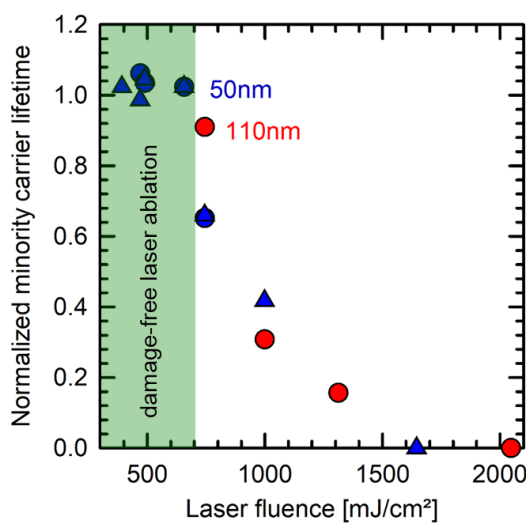


Abbildung 5: Ladungsträgerlebensdauern (links) von nPOLO-Proben mit $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ -Dreifachschichtstapel nach der Einbringung der Laserkontaktöffnung normalisiert auf die Lebensdauer vor der Laserkontaktöffnung bei einem Injektionsniveau von $8 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Unterschiedliche Symbole repräsentieren unterschiedliche Wafer, wobei rote Kreise eine nPOLO-Probe mit 110 nm Poly-Si und blaue Symbole nPOLO-Proben mit 50 nm Poly-Si sind. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen (rechts): Geneigte Draufsicht auf eine nPOLO-Probe mit Laserkontaktöffnung im $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Dreifachschichtstapel (oben rechts) und ein Querbruch durch die Laserkontaktöffnung einer Al-metallisierten nPOLO-Probe (unten rechts).

Integration des $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_y/\text{SiO}_2$ -Schichtstapel in POLO²-IBC-Zellen

Die anvisierte Zellstruktur der 26.1% POLO²-IBC-Zelle beherbergt n^+ POLO- und p^+ POLO-Kontakt auf der Rückseite, wobei das p^+ - und n^+ -dotierte Polysilizium eine defektreiche pn -Diode bilden und die Zelleigenschaften dramatisch verschlechtern würde. Aus diesem Grund hat die 26.1%-effiziente POLO²-IBC-Zelle einen isolierenden (anfangs) intrinsischen Polysiliziumbereich zwischen p^+ - und n^+ Polysilizium. Bei der POLO-Kontaktformierung der POLO-Kontakte wuchs ein SiO_2 , welches auf der pin -POLO-Rückseite der 26.1%-Zelle bis zur Fertigstellung verbleibt. Für die Integration des verbesserten $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_y/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Hydrogenierungstapels wird das thermische SiO_2 entfernt und durch $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_y/\text{SiO}_2$ ersetzt. Es wird angenommen, dass das SiO_2 im $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_y/\text{SiO}_2$ -Stapel die Funktion der zweiten Al_2O_3 -Schicht erfüllen kann, aber mit höheren Raten und deshalb wesentlich dicker abgeschieden werden kann. Ein dickes Dielektrikum auf der Rückseite ist für die Reflektivität der Rückseite wichtig.

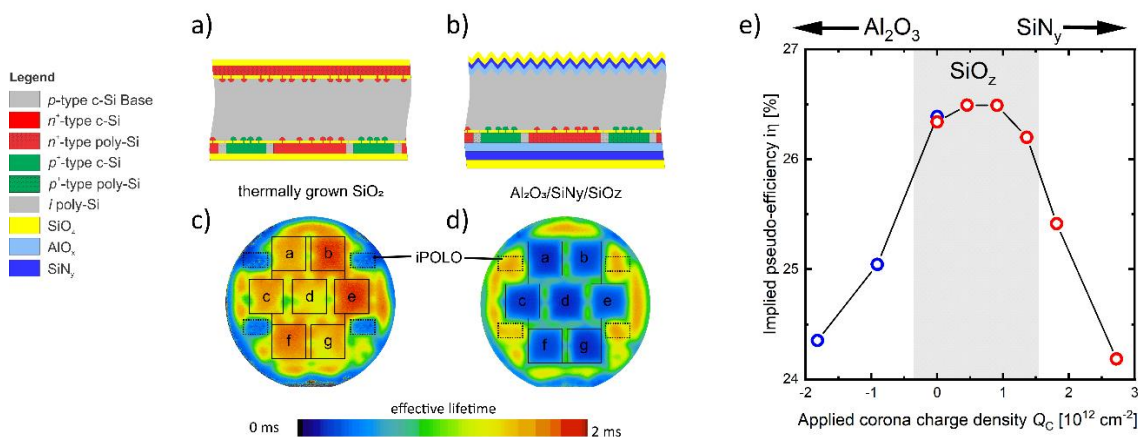


Abbildung 6: (a-b) Schematische Darstellung der Struktur einer POLO²-IBC-Solarzelle mit (a) einer thermisch gewachsenen SiO₂-Schicht oder (b) Al₂O₃/SiN_y/SiO₂ als dielektrische Schicht auf der Rückseite. (d-e) Räumlich aufgelöste Ladungsträgerlebensdauer der in (a & b) gezeigten Zellstrukturen bei ~0,25 Sonnen, gemessen mit der ILM-Methode. Die aktiven Zellflächen der sieben Solarzellen sind mit den Quadraten a-g markiert. (e) Implizierte Pseudo-Effizienz der in (a) gezeigten Zellstruktur mit zusätzlicher Beladung der Rückseite mit positiver oder negativer Corona-Ladung.

Abbildung 6 (c & d) vergleicht die Ladungsträgerlebensdauer von POLO²-IBC-Zellpräkursoren mit einem thermisch gewachsenen SiO₂ (wie in der 26.1%-POLO²-IBC-Zelle) und dem Al₂O₃/SiN_y/SiO₂-Schichtstapel. Wie erwartet führt der Austausch der SiO₂-Schicht durch den AlO_x/SiN_y/SiO₂-Schichtstapel zu einer signifikanten Verbesserung der POLO-Kontakte auf den ganzflächigen Referenzbereichen auf der Rückseite der Solarzellen (in Abbildung 6 (c) und (d) mit *i*POLO gekennzeichnet). Nach der Hydrogenierung zeigen die vollflächigen POLO-Referenzen des Zellvorläufers in Abbildung 6 (b) eine Sättigungsstromdichte von 2,5 fA/cm² bzw. 4 fA/cm² für n^+ POLO- und p^+ POLO-Kontakte. Unabhängig von der Verbesserung der POLO-Übergänge sinkt die Lebensdauer in den Zellregionen von zuvor 1,5-1,8 ms für den Zellvorläufer in Abbildung 6 (a) auf etwa 200-300 μ s für den in Abbildung 6 (b) gezeigten Zellvorläufer.

Wir erklären diese überraschende Beobachtung durch die hohe Dichte an negativer fester Ladung in der Al₂O₃-Schicht im Gegensatz zu der fast neutralen SiO₂-Schicht. Die negative Ladungsdichte in der dielektrischen Schicht oder an ihrer Grenzfläche zum Poly-Si bewirkt eine Aufwärtsbandverbiegung innerhalb der Poly-Si-Schicht in der Nähe ihrer Grenzfläche zur dielektrischen Schicht [70]. Daher erwarten wir eine Akkumulation von Löchern und eine Verarmung von Elektronen in den ersten wenigen Nanometern der Poly-Si-Schicht an der Al₂O₃-Grenzfläche im hochdotierten p^+ - bzw. n^+ -Poly-Si-Bereich.

Im ursprünglich undotierten Bereich zwischen den p^+ und n^+ Poly-Si-Regionen führt der Ausgleich der Dotierstoffe nach dem Hochtemperaturtempern zu einem mäßig dotierten, gradierte pn -Übergang. Im Falle einer nahezu fehlenden Oberflächenladung auf der Poly-Si-Schicht, z. B. mit einer thermisch gewachsenen SiO₂-Schicht, weist ein Teil dieses Übergangsbereichs einen hohen spezifischen Widerstand auf und gewährleistet eine elektrische Isolierung zwischen den p^+ und n^+ Poly-Si-Bereichen. Durch das Aufbringen der Al₂O₃-Schicht wird jedoch die Ladungsträgerpopulation im mäßig dotierten Übergangsbereich durch die starke negative Festladung so manipuliert, dass sich in den mäßig dotierten p -Typ- und n -Typ-Poly-Si-Bereichen

eine Akkumulations- bzw. Inversionsschicht bildet. Die Modulation der Ladungsträgerpopulation und die Senkung der Transportbarriere aufgrund der Elektrostatik erhöhen die Ladungsträgerbeweglichkeit innerhalb des Poly-Si erheblich [71,72,73,74,75]. Somit induziert das Al_2O_3 an seiner Grenzfläche zum Poly-Si einen Löcher-leitenden Kanal, der die beiden defektreichen n^+ und p^+ Gebiete „kurzschließt“ und zu starker parasitärer Rekombination führt.

Um diese Hypothese zu bestätigen, haben wir gezielt negative oder positive Oberflächenladungen auf die SiO_2 -Schicht auf der Rückseite vom Zellvorläufer in Abbildung 6 (a) durch Corona-Entladung aufgebracht und haben das Rekombinationsverhalten des Zellvorläufers bei jeder Ladebedingung mittel ILM bei verschiedenen Beleuchtungsstärken gemessen. Die Charakteristik der beleuchtungsabhängigen impliziten Leerlaufspannung $\text{Suns-}iV_{\text{OC}}$ des Zellvorläufers lässt unter der Annahme einer Kurzschlussstromdichte J_{SC} von 42.6 mA/cm^2 einen Schluss auf die implizierte Pseudo-Effizienz $\text{ip}\eta$ der Solarzelle in Abbildung 6 (e) bei jedem Ladezustand zu. Negative (positive) Oberflächenladung, wie sie mit einer Al_2O_3 -Schicht (SiN_y -Schicht) auf dem Poly-Si auftreten, führen zu einer signifikanten Verschlechterung der $\text{ip}\eta$ von 26.3 % ($iV_{\text{OC}} = 737 \text{ mV}$, $\text{ipFF} = 83.9 \%$) im ungeladenen Ausgangszustand auf fast 24% ($iV_{\text{OC}} = 731\text{-}735 \text{ mV}$, $\text{ipFF} = 77.2\text{-}78.5 \%$) mit eine negativen (positiven) Ladungsdichte von $>2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Andererseits konnte die Pseudo-Effizienz der Solarzell-Präkursoren durch Hinzufügen einer kleinen positiven Ladung sogar um ca. 0.2%abs gegenüber dem ungeladenen Zustand verbessert werden. Schlussfolgernd ist es essenziell die Ladungen an der Grenzfläche zwischen Polysilizium und Dielektrikum der *pin*-POLO²-IBC-Rückseite zu kontrollieren. Damit können bei dieser Zellstruktur mit *pin*-POLO²-IBC-Rückseite keine geladenen Schichtensysteme wie Al_2O_3 oder SiN_y ohne weitere Maßnahmen verwendet werden. Der beschriebene parasitäre Effekt wird bei der Trench-Zellstruktur vermieden, da hier das „intrinsische“ Poly-Si zwischen den *p*POLO- und *n*POLO-Kontakt der *pin*-POLO²-IBC-Rückseite entfernt wird. Aus diesem Grund haben wir die *pin*-POLO²-IBC-Zelle im weiteren Projektverlauf verworfen und durch die Trench-POLO²-IBC-Zelle ersetzt.

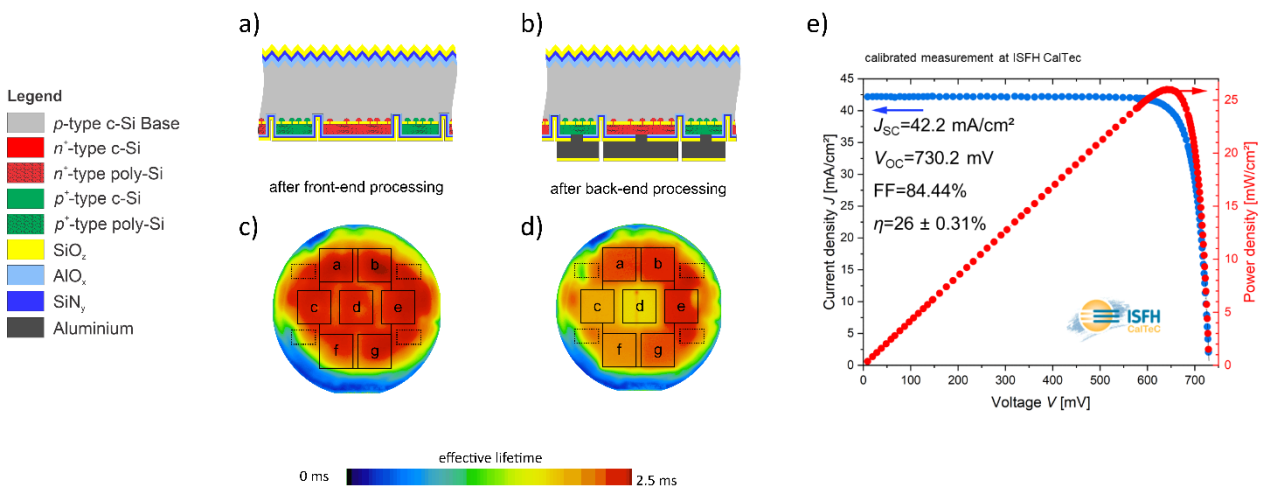


Abbildung 7: (a-b) Schematische Darstellung der Struktur einer POLO²-IBC-Solarzelle mit Trench nach (a) Front-End-Prozessierung und (b) Back-End-Prozessierung. (c-d) Räumlich aufgelöste Ladungsträgerlebensdauer der in (a & b) gezeigten Zellstrukturen bei ~0,25 Sonnen, gemessen mit der ILM-Methode. Die aktiven Zellflächen der sieben Solarzellen sind mit den Quadraten a-g markiert. (e) Kalibrierte Strom-Spannungskennlinie von Zelle b in (b,d) gezeigten POLO²-IBC-Zelle mit Trench.

Basiszellprozess zur Herstellung der Trench-POLO²-IBC-Zellen mit verbessertem AlO_x/SiN_y/SiO₂-Rückseitenschichtstapel

Der folgende Basisherstellungsprozess führt zu unserer Trench-POLO²-IBC-Zelle in Abbildung 7 (b): Wir verwenden 300 µm dicke 1,3 Ωcm, p-Typ FZ-Wafer und folgen dem an anderer Stelle [76,77] beschriebenen Prozess, um die $p^+-(i)-n^+$ POLO-Interdigitalstruktur auf der Rückseite durch Verwendung von amorphem Si, maskierte Ionenimplantation und einen anschließenden Nassoxidations- und Hochtemperaturprozess bei 1035°C zu bilden. Da die $p^+-(i)-n^+$ -Rückseite uns daran hinderte, das verbesserte Hydrierungsschema für unsere POLO-Übergänge zu implementieren [78], entfernen wir den $p^+-(i)-n^+$ -Übergang durch KOH-Ätzen durch die lithografisch strukturierte SiO₂-Barrierschicht. Dieser Strukturierungsschritt führt zu einer Grabenabtrennung zwischen den interdigitalen pPOLO und nPOLO Gebieten und entfernt die SiO₂- und n^+ Poly-Si-Schichten von der Vorderseite. Letzteres führt zu einer KOH-geätzten rauen Oberfläche auf der Vorderseite.

Im nächsten Schritt wird das SiO₂ auf der Rückseite entfernt und die Lichteinfangstruktur basierend auf zufälligen Pyramiden auf der Vorderseite durch eine alkalische Nassätzung in einer KOH-basierten Texturierungslösung erzeugt. Die Rückseite wird durch einen Probenhalter aus PTFE vor der Texturierung geschützt. Die Vorderseite erhält nach einer abschließenden RCA-Reinigung einen passivierenden antireflektierenden AlO_x/SiN_y/SiO₂-Schichtstapel. Auf der Rückseite wird ein dreifacher Schichtstapel aus AlO_x/SiN_y/SiO₂ abgeschieden, um den Grabenbereich zu passivieren, die POLO-Übergänge zu hydrieren und den Laser-Kontaktöffnungsprozess zu erleichtern.

Abbildung 7 (a) zeigt die Zellstruktur der Trench-POLO²-IBC-Solarzelle mit AlO_x/SiN_y/SiO₂-Schichtstapel auf der Rückseite nach der Passivierung aller Oberflächen, der hier als Status nach der Front-End-Prozessierung bezeichnet wird. Im Gegensatz zur *pin*-POLO²-IBC-Zelle mit dem AlO_x/SiN_y/SiO₂-Schichtstapel auf der Rückseite (Abbildung 6 (b,d)), weist die Trench-POLO²-IBC-Solarzelle in diesem Stadium eine hohe Lebensdauer (Abbildung 7 (c)) sowohl in den Referenzbereichen, als auch in den Zellbereichen, auf. Unter der Annahme einer Kurzschlussstromdichte J_{SC} von 42.6 mA/cm² ergibt sich für Zelle (e) in Abbildung 7 (c) eine implizierte Pseudo-Effizienz $ip\eta$ von 27.3% ($iV_{OC} = 746$ mV, $ipFF = 85.9$ %) und damit eine Verbesserung im $ip\eta$ von 1%_{abs.} ($\Delta iV_{OC} = 9$ mV, $\Delta ipFF = 2$ %) gegenüber der *pin*-POLO²-IBC-Zelle mit thermischem SiO₂ auf der Rückseite (Abbildung 6 (a,c)).

Für die Fertigstellung der POLO²-IBC-Zelle mit Trench im Backend-Prozess, wird der sanfte Laserkontaktöffnungsprozess angewandt und anschließend eine kurzer HF-Behandlung auf der Rückseite vor der Aufdampfung des Al-Rückkontaktes appliziert und die Kontakttrennung vollzogen. Abbildung 7 (b) zeigt die Zellstruktur der Trench-POLO²-IBC-Solarzelle mit AlO_x/SiN_y/SiO₂-Schichtstapel auf der Rückseite nach der Fertigstellung. Für Zelle (e) in Abbildung 7 (d) ergibt sich eine implizierte Pseudo-Effizienz $ip\eta$ von 27.14% ($iV_{OC} = 746$ mV, $ipFF = 85.4$ %) und damit eine Degradation im Backend-Prozess im $ip\eta$ von 0.16%_{abs.} ($\Delta iV_{OC} = 0$ mV, $\Delta ipFF = 0.5$ %). Zelle b und g in Abbildung 7 (d) wiesen sogar eine Backend-Degradation von lediglich 0.1% auf. In einer kalibrierte Strom-Spannungs-Messung weist Zelle b (Abbildung 7 (e)) eine Effizienz η von 26±0.3% ($J_{SC} = 42.2$ mA/cm², $V_{OC} = 730.2$ mV, $FF = 84.44$ %). Im Gegensatz zur angenommenen Kurzschlussstromdichte J_{SC} von 42.6 mA/cm² (abgeleitet von der 26.1%-POLO²-IBC-Zelle) besitzt die kalibrierte Trench-POLO²-IBC-Zelle lediglich einen J_{SC} von 42.2 mA/cm². Die Differenz resultiert

unter anderem aus einer höheren Reflektion der verwendeten Textur, die zum Projektende durch eine verbesserte Textur ersetzt wurde.

2.1.3 Verbesserung des Lichteinfangvermögens der POLO²-IBC-Zelle

Zur Verbesserung des Lichteinfangvermögens evaluieren wir ein neuartiges photonischen Konzept – die Photonischen Kristalle. Die Entwicklung der Herstellungsprozesse der photonischen Kristalle erfolgte in einer internationalen Kollaboration zwischen der Swinburne University of Technology (Australien), Melbourne Center for Nanofabrication (Australien), University of Toronto (Kanada), Institut für Materialien und Bauelemente der Elektronik (Leibniz Universität Hannover) und dem ISFH.

Die Herstellung der photonischen Kristalle erfolgt in zwei Hauptschritten. Abbildung 8 zeigt Beispielsweise den Herstellungsprozess für invertierte Pyramiden zur Verwendung als photonische Kristallstruktur vom Institut für Materialien und Bauelemente der Elektronik (MBE). Im ersten Schritt (1 und 3 in Abbildung 8) wird eine dünne Maskierschicht (z.B. SiO₂) strukturiert, so dass ein periodisches Muster aus Öffnungen mit einer Periodizität von ca. 2-3 µm in der Schicht entstehen. Im zweiten Schritt (2 in Abbildung 8) werden die periodischen Strukturen von der Maskierschicht in einem Ätzprozess in die Siliziumoberfläche übertragen, wobei die Maske als Ätzbarriere dient. Das MBE entwickelte einen auf konventionelle Fotolithographie basierenden Herstellungsprozess wie in Krügener *et al.* berichtet [79] und Abbildung 8 im Detail dargestellt. Die Swinburne University hingegen verwendet Laserablation für die Strukturierung einer dünnen Al₂O₃-Maske. Die Struktur aus der Maske wird im Anschluss mit reaktivem Ionenätzen ins Si übertragen [80].

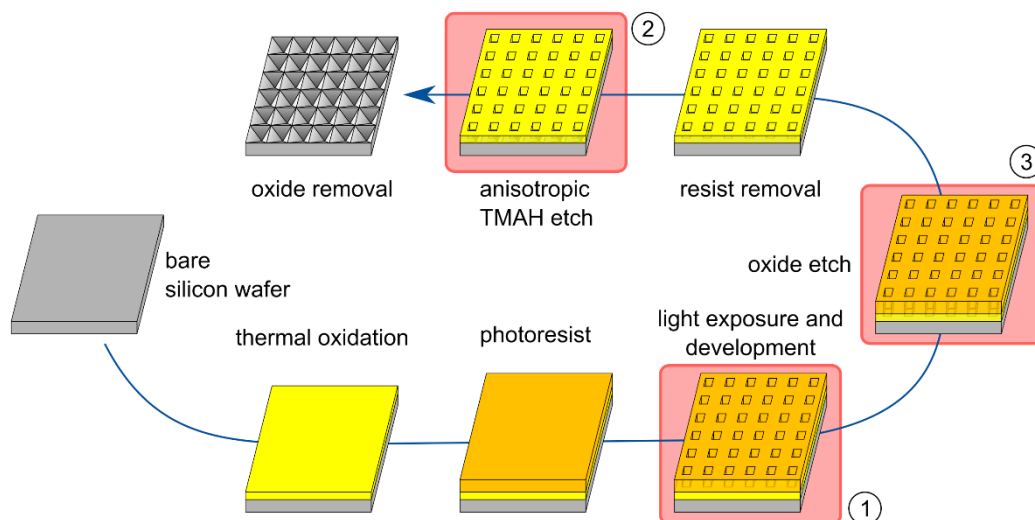


Abbildung 8: Prozessfluss für die Herstellung von invertierten Pyramiden zur Verwendung als photonische Kristalle in Silizium [81]

Herstellung der photonischen Kristalle an der Swinburne University of Technology

Die photonischen Kristallstrukturen an der Swinburne University of Technology wurden mit einem neuartigen direkten Laserschreibverfahren hergestellt. Als Laser wurde ein Festkörperlaser mit einer Wellenlänge von 515 nm, mit einer Pulsdauer von 230 fs und einer Wiederholrate von 200 kHz bei einer Schreibgeschwindigkeit von 25 mm/s verwendet. Das Laserschreiben einer periodischen

Struktur erfolgte durch Ablation von Löchern in einer Al_2O_3 -Maskierschicht. Die ~20 nm dünne Al_2O_3 wurde durch Elektronenstrahlverdampfung aufgebracht. Der Laserstrahl wurde mittels fokussierenden Objektivs mit einer numerischen Apertur $\text{NA} = 0,9$ geformt, die die Ablation von Submikrometer-Öffnungen erlaubt. Die Ablations-Punkte wurde durch einen Gitterabstand von 3,1 μm getrennt, der letztlich die Breite der photonischen Kristallstrukturen bestimmt. Das Plasmaätzen wurde mit dem reaktiven Ionenätzsystem RIE-101iPh von Samco durchgeführt. Für die Herstellung der photonischen Kristallstrukturen wurde ein Gasfluss im Verhältnis 5:1:1 von SF_6 : CHF_3 : O_2 verwendet. Die Proben wurden vor und nach dem Ätz- und Ablationsprozessen in Aceton und Isopropanol gereinigt, um die Verunreinigung zu minimieren.

Herstellung der photonischen Kristalle am MBE

Die periodische invertierte Pyramidenstrukturen wird durch Photolithographie in Kombination mit anisotropem Ätzen hergestellt (Abbildung 8). Vor der Strukturierung wird eine dünne Siliziumoxidschicht (~4-6 nm) durch trockene Oxidation aufgewachsen. Diese Oxidschicht dient als Maske für den späteren anisotropen Ätzschritt. Das MBE hat festgestellt, dass diese „harte“ Maske erforderlich ist, da der Fotolack dem anisotropen Ätzschritt nicht standhält. Die Siliziumoxid-Hartmaske wird durch einen lokal strukturierten Fotolack (AZ1505) strukturiert mittels gepufferter Flusssäure. Das Muster auf der Fotolithografie-Maske besteht aus Quadraten mit einer Größe von 1 μm . Das übertragene Muster besteht aus einem regelmäßigen Lochmuster mit kreisförmigen Lochöffnungen. Die kleine Strukturgröße zusammen mit der geringen Periodizität der gewünschten Strukturen liegen an der Auflösungsgrenze der verwendeten Photolithographie (Karl Suss MA-150). Der Fotolack wird vor dem anisotropen Ätzen entfernt. Anschließend wird die strukturierte Siliziumoxidschicht als Hartmaske für das Ätzen der Siliziumoberfläche mit KOH bei 40 °C verwendet.

Modifikation des Basiszellprozess der Trench- POLO^2 -IBC-Zellen für die Herstellung von POLO^2 -IBC-Zellen mit photonischen Kristallen

Die Herstellung einer photonischen Kristallstruktur auf der KOH-geätzten, rauen Vorderseite des POLO^2 -IBC-Zellvorläuferwafers nach der Trench-Ätzung und der Entfernung des Poly-Si von der Vorderseite (siehe Basiszellprozess Trench- POLO^2 -IBC-Zelle) ist bisher eine Herausforderung. Daher passen wir den Zellprozess so an, dass die chemisch-mechanisch polierte (CMP) Oberfläche des 280- μm dicken, 2,6 Ωcm p-Typ FZ-Wafers während des gesamten Zellprozesses intakt bleibt. Zu diesem Zweck wird vor dem Zellprozess eine schützende 700 nm dicke SiO_2 -Schicht aufgewachsen und von der Rückseite her mit einem Laser abgetragen, gefolgt von einer kurzen KOH-Ätzung und einem Phosphor-Diffusions-Getter-Prozess. Alle nachfolgenden Schritte folgen dem Basisprozess, bis die Grabenabtrennung und die Poly-Si-Entfernung auf der Vorderseite abgeschlossen sind. In diesem Stadium haben wir die dicke SiO_2 -Schutzschicht von der polierten Vorderseite der Zellvorläufer entfernt und diese Zellvorläufer zur Herstellung der photonischen Kristallstrukturen an die Swinburne University of Technology oder an das Institut für Materialien und Bauelemente der Elektronik (Leibniz Universität Hannover) verschickt. Anschließend wurden photonische Kristallstrukturen entweder an der Swinburne University of Technology oder am MBE auf der Vorderseite der Zellvorläufer (wie oben beschrieben) hergestellt und an das ISFH für die Fertigstellung zurückgeschickt. Nach der Herstellung der photonischen Kristallstruktur, entfernen wir alle dielektrischen Schichten (z.B. Al_2O_3 & SiO_2) und führen eine RCA-Reinigung durch, bevor wir

die Front-End-Bearbeitung abschließen. Die POLO²-IBC-Solarzelle mit photonischer Kristallstruktur wird anschließend wie oben beschrieben im Back-End-Basisprozess fertiggestellt.

Ergebnisse zu POLO²-IBC-Solarzellen mit photonischen Kristallen

Das ISFH hat sowohl mit dem MBE, als auch mit der Swinburne University, die strukturellen und optischen Eigenschaften und die Passivierbarkeit der Oberfläche untersucht.

Im Falle invertierten Pyramiden vom MBE konnten hervorragende Rekombinationseigenschaften der hergestellten photonischen Kristalle auf vergleichbarem Niveau wie die verwendeten zufällig verteilten Pyramiden (Random Pyramids) durch Passivierung mit dem AlO_x/SiN_y/SiO₂-Antireflectionsschichtstapel erreicht werden. Abbildung 9 (a) zeigt die Vorderseite der fertigen 173µm-dicken POLO²-IBC-Zellen mit photonischen Kristallen vom MBE und in Abbildung 9 (b) ist die Struktur in einem Rasterelektronenmikroskop-Bild zu sehen. Die minimalen Stegbreiten von ca. 150 nm zwischen den invertierten Pyramiden mit einem periodischen Abstand von 3.1µm sind noch zu breit. Der Flächenanteil der planaren Stege beträgt damit fast 10% und führt entsprechend zu einer erhöhten Reflektion auf der Vorderseite, was mit einer erwarteten geringeren Fotogeneration in der Solarzelle und damit einem J_{SC} von 40.05mA/cm² verbunden ist. Mit der guten Passivierung auf der Vorderseite erreicht die Solarzelle ein V_{OC} von 716.9mV und damit eine Effizienz von 22.9%. Eine Analyse der Reflektionseigenschaften und der Quanteneffizienz bestätigt eine erhöhte AM1.5G-gewichtete Reflektion der POLO²-IBC-Solarzelle mit photonischen Kristallen von 4.4% gegenüber von 3.1% mit zufällig verteilten Pyramiden, sowie eine verringerte elektrische Einsammeleffizienz von 96.6% gegenüber von 98.5%.

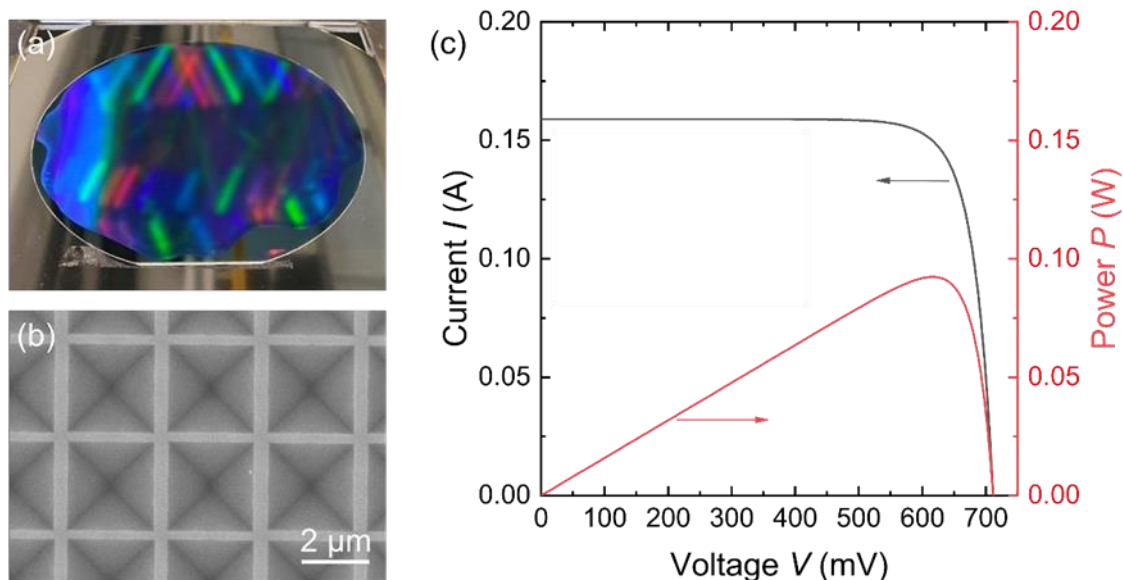


Abbildung 9: (a) Foto von der Vorderseite einer POLO²-IBC-Solarzelle mit photonischen Kristallen von MBE, (b) Rasterelektronenmikroskop-Bild von der photonischen Struktur des MBE, (c) kalibrierte Strom-Spannung-Kennlinie einer POLO²-IBC-Solarzelle mit photonischen Kristallen von MBE [82].

Im Falle der photonischen Kristallstrukturen von der Swinburne University of Technology konnten hervorragende Strukturen mit geringsten Stegbreiten von wenigen 10nm durch Verwendung des reaktiven Ionenätzen erreicht werden. Das Plasmaätzverfahren verursacht Oberflächendefekte, die mehrere 100nm in den Silizium-Einkristall auf der Vorderseite reichen und zu hoher Rekombination

führen. Abbildung 10 (a) zeigt Struktur der Vorderseite einer POLO²-IBC-Zelle mit photonischen Kristallen von der Swinburne University of Technology in einem Rasterelektronenmikroskop-Bild. Im Gegensatz zu den photonischen Kristallen vom MBE aus Abbildung 9 (b) sind die Übergangsbereiche („Stege“) zwischen den Pyramiden verschwindend und erscheinen spitz. Allerdings müssen die Defekte im Silizium, die durch das Plasmaätzen eingebracht wurden, mittels einer kontrollierten nasschemischen Nachbehandlung entfernt werden ohne die photonische Kristallstruktur zu beeinträchtigen.

Hier wurde der kontrollierte Abdünnprozess von Poly-Si in Ammoniak-Wasserstoffperoxid-Lösung (entspricht RCA1-Lösung) mit einer Ätzrate von ca. 1 nm/Min. verwendet. Abbildung 10 (b) zeigt die Lebensdauer eines mit Al₂O₃-passivierten Zellvorläufers vor der Ätzung in APM-Lösung und nach unterschiedlichen Ätzdauern. Die Lebensdauer nimmt von 350 μ s vor dem Ätzen auf über 2.3 ms nach einer Ätzdauer von 300 Min. kontinuierlich zu. Die erreichte Lebensdauer nach 300 Min. deutet auf eine vollständige Entfernung der Defekte hin. Die Reflektion der Probe mit lediglich einer Al₂O₃ auf der Vorderseite nimmt durch das Ätzen von ca. 11,2% vor dem Ätzen auf 13,1% nach 300 Min. leicht zu und deutet darauf hin, dass die Struktur erhalten bleibt. Die Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme in Abbildung 9 (b) bestätigt diese Interpretation. Die fertige POLO²-IBC-Zelle mit der (annähernd) defektfreien und guten passivierten Vorderseite erreicht ein V_{OC} von 710 mV, einen J_{SC} von 39.9 mA/cm² und damit eine Effizienz von 23.1%. Eine Analyse der Reflektionseigenschaften und der Quanteneffizienz bestätigt eine erhöhte AM1.5G-gewichtete Reflektion der POLO²-IBC-Solarzelle mit photonischen Kristallen von der Swinburne University of Technology von 3.9% gegenüber von 3.1% mit zufällig verteilten Pyramiden, sowie eine verringerte elektrische Einsammeleffizienz von 95.3% gegenüber von 98.5%.

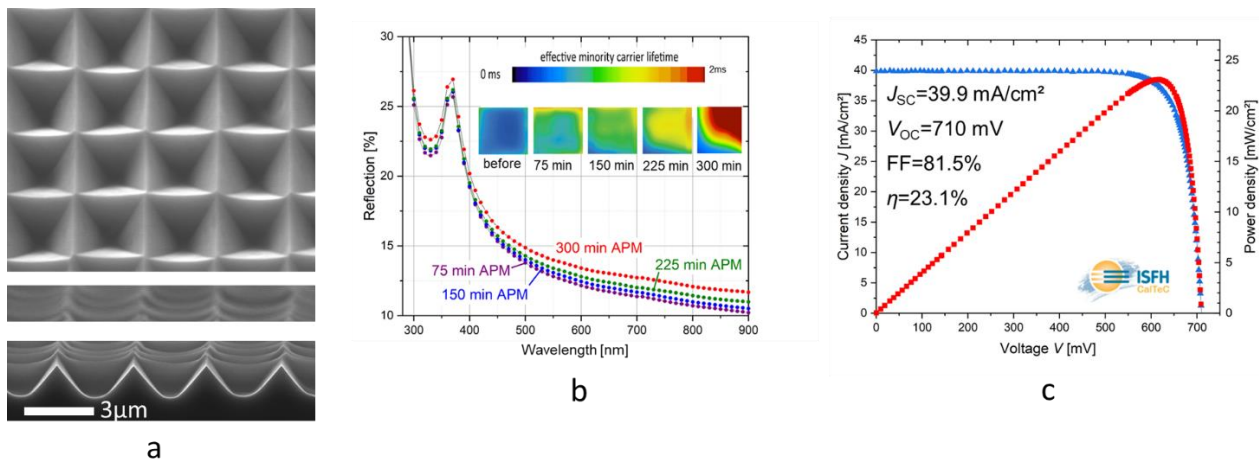


Abbildung 10: (a) Rasterelektronenmikroskop-Bild: Draufsicht und Querbruch von der photonischen Strukturen der Swinburne University of Technology nach Ätzen in APM für 300 Min., (b) Wellenlängenabhängige Reflektionseigenschaften und Ladungsträgerlebensdauer von in APM (Ammonium-Peroxide Mixture) nachgeätzten photonischen Strukturen, (c) kalibrierte Strom-Spannung-Kennlinie einer POLO²-IBC-Solarzelle mit photonischen Kristallen von der Swinburne University of Technology.

Zusammenfassend wurden zwei Ansätze für die Herstellung von photonischen Kristallen in POLO²-IBC-Zellen evaluiert und zeigten bereits in ersten Prototypen einen Wirkungsgrad von ca. 23%. Zwar konnte bei den ersten Prototypen noch kein Wirkungsgradvorteil gezeigt werden, aber eine weitere Optimierung der Herstellungsverfahren und die Applikation auf dünne und ultradünne Solarzellen

und vor allem die anschließende Demonstration von industrierelevanten Herstellungsverfahren eröffnet interessante Perspektiven für ultradünne POLO²-IBC-Solarzellen mit Wirkungsgraden jenseits von 27%.

2.1.4 Entwicklung von 3T Bottomsolarzellen

Um eine hervorragende 3T-Tandemsolarzelle zu realisieren, wurden Designüberlegungen angestellt, welche die Entwicklungen bei den Perowskit-Topzellen, den Stand beim Interface zwischen Top- und Bottomsolarzelle und die Bedürfnisse der Bottomsolarzelle berücksichtigen. Diese Designüberlegungen, der Herstellungsprozess und die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

Designüberlegungen für eine 3T Perowskit/Silizium-Tandemsolarzelle

Topzelldesign-Aspekte

Abbildung 11(b) fasst die Literatur-Wirkungsgrade von opaken Single-Junction-Pk-Solarzellen in Abhängigkeit der Bandlücke zusammen, welche auf den idealen Wirkungsgrad für die jeweilige Bandlücke normierten sind. Damit spiegelt der normierte Wirkungsgrad den Fortschritt der jeweiligen Pk-Zelltechnologie hinsichtlich des Erreichens des maximalen Wirkungsgrads wieder. Mit zunehmender Bandlücke sinkt der Rekordwirkungsgrad und die Rekordwerte für opake Single-Junction-Perowskit-Solarzellen (PSCs) werden in der *nip*-Superstrat-Architektur mit Wirkungsgraden von bis zu 25,7 % und einer Bandlücke von ~1,53 eV erzielt. Die leistungsstärksten 2T-Pk/Si-Tandem-Solarzellen hingegen verwenden eine semitransparente *pin*-Substrat-Architektur für die Pk-Topzelle. Die Leistung von opaker *pin*-PSCs holt in letzter Zeit mit berichteten Wirkungsgraden von >22 % auf, insbesondere bei niedrigen Bandlücken von ~1,6 eV [83,84]. Wie aus Abbildung 11 (b) hervorgeht, lässt sich der Wirkungsgradvorteil der Single-Junction-Pk-Zelle nicht unbedingt in einen Leistungsvorteil eines 3T- (oder 4T-) Tandems umwandeln, da der erforderliche Wirkungsgrad der Topzelle mit abnehmender Bandlücke steigt. Perowskit-Topzellen um ~1,6 eV sind jedoch aufgrund ihrer besseren elektronischen Qualität und geringeren Grenzflächenverluste [85] immer noch leistungsfähiger als Zellen mit breiterer Bandlücke und sind vielversprechende Kandidaten für Tandemzellen jenseits von 33 %.

Neben den Überlegungen zur Polarität und zur Bandlücke gibt es einen Kompromiss zwischen der Optik für das Tandem und der elektronischen Qualität der Pk-Top-Zellen, wenn sie auf einem planaren gegenüber einem texturierten Substrat abgeschieden werden. Während konform koverdampfte Pk-Topzellen mit breiter Bandlücke (wie in Abbildung 12C dargestellt) perfekt zu großen Pyramiden passen, wie sie in modernen Si-Zellen mit Einzelübergang verwendet werden, und aus optischer Sicht die besten Leistungen erbringen sollten, bleibt die elektronische Leistung von koverdampften Pk-Topzellen mit breiter Bandlücke bisher hinter der Leistung von lösungsprozessierten Zellen zurück. Andererseits haben lösungsprozessierte PSCs mit großer Bandlücke die leistungsfähigsten 2T-Pk/Si-Tandems mit glatten Si-Oberflächen ermöglicht (wie in Abbildung 12 (a) dargestellt). Auf Oberflächen mit großen Pyramiden (mehrere μm hoch) ist die Herstellung von lösungsbasierten PSCs eine Herausforderung und führt in der Regel zu einem vermindertem Zellwirkungsgrad. Kürzlich wurden lösungsprozessierte Pk/Si-Tandemzellen auf Si-Oberflächen mit ~1 μm kleinen Pyramiden mit guten Wirkungsgraden entwickelt (wie in Abbildung 12 (b) gezeigt) [86,87,88,89]. Es besteht die Hoffnung, dass der Wirkungsgrad solcher Zellen schnell

zu den auf glatten Oberflächen abgeschiedenen Zellen aufschließen kann, weshalb wir den Fokus auf 3T-Pk/Si-Tandemzellen mit texturierten Si-Bodenzellen legen.

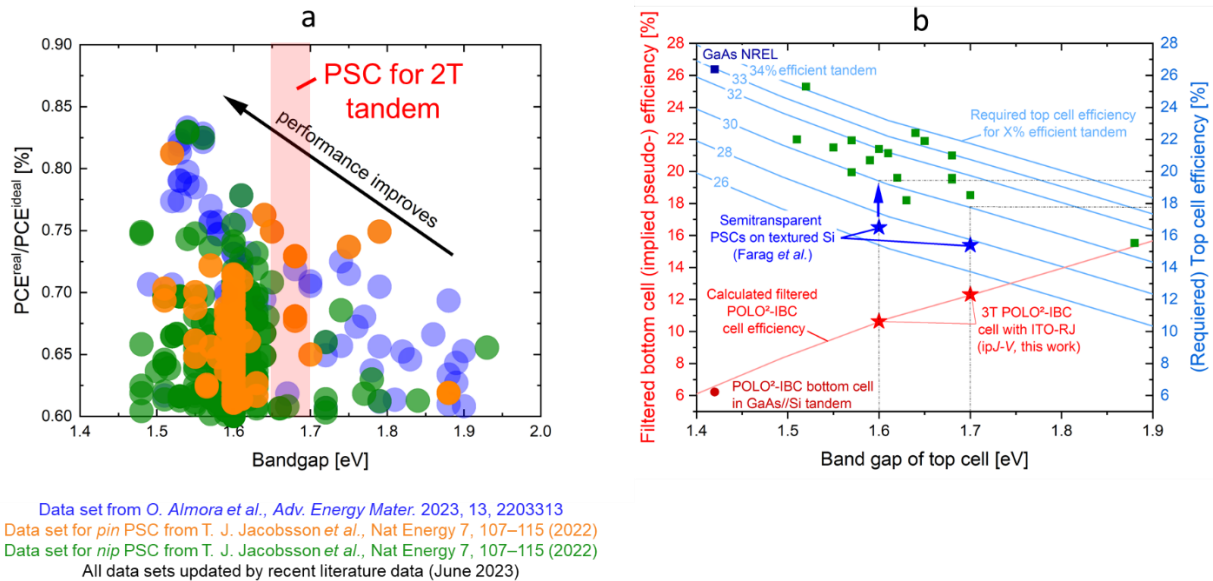


Abbildung 11: (a) Normierter Wirkungsgrad opaker Single-Junction-Pk-Solarzellen aus der Literatur (Stand Juni 2023), (b) Berechneter gefilterter Wirkungsgrad (rote Linie) der POLO²-IBC-Zelle mit 26,1 % Wirkungsgrad und der erforderliche Wirkungsgrad für die Topsolarzelle (blaue Linien) mit verschiedenen Bandlücken in einem Tandem mit Wirkungsgraden zwischen 26 % und 34 % (hellblaue Isolinen). Quadratische Datenpunkte (außer GaAs) sind Literaturdaten für opake PSCs. Rote und blaue Sterne sind die impliziten Pseudowirkungsgrade der 3T-POLO²-IBC-Bottomsolarzellen und der Wirkungsgrad der semitransparenten Topsolarzelle, die im Rahmen von 27Plus6 entwickelt wurden

Design-Aspekte der 3T-Bottomsolarzelle

Um den höchsten Wirkungsgrad zu erzielen, sollte eine Si-Bodenzelle mit drei interdigitalen Rückkontakten den Leistungsverlust durch den 3T-Betrieb minimieren. Diese Anforderung impliziert einen effizienten Ladungsträgertransfer zwischen dem vorderen Kontakt (F) und dem hinteren Kontakt gleicher Polarität (Z). Durch Fehlanpassung muss die resultierende Differenz J_{CT} der generierten Stromdichten zwischen Top- und Bottomzelle vom Kontakt F in den Kontakt Z und umgekehrt fließen können, um eine maximale Leistungserzeugung für eine stromfehlangepasste Tandemzelle zu ermöglichen. Je nachdem, ob Majoritäts- oder Minoritätsladungsträger innerhalb der Waferbasis den Austausch von J_{CT} unterstützen, weist die Bottomzelle entweder eine Unijunction- oder eine Bipolar-Junction-Architektur [90,91,92,93] auf und bestimmt die Physik der Bottomzelle. Eine detaillierte Beschreibung beider Varianten und der experimentell validierten Modelle findet sich in Ref. [94].

Bei einer *p*-Typ-Bipolar-Junction Bottomzelle (pbIBC) (siehe Abbildung 12c) im Dunkeln trennt die lochleitende Waferbasis den elektronenselektiven Kontakt auf der Vorderseite (F) von dem auf der Rückseite (Z). Der Austausch von Ladungsträgern zwischen den Kontakten F und Z wird aufgrund der mangelnden Elektronenleitfähigkeit des Wafers im Dunkeln unterdrückt – analog zu einem Bipolartransistor im ausgeschalteten Zustand. Wird der Wafer jedoch beleuchtet, steigt die Elektronenkonzentration und damit die Elektronenleitfähigkeit innerhalb des Wafers deutlich um

mehrere Größenordnungen an – analog zu einem eingeschalteten Bipolartransistor. Dies erleichtert einen effizienten Elektronenfluss zwischen den Kontakten F und Z und ermöglicht den effizienten Betrieb des 3T-Tandems mit einer Bottomzelle mit bipolarem Design.

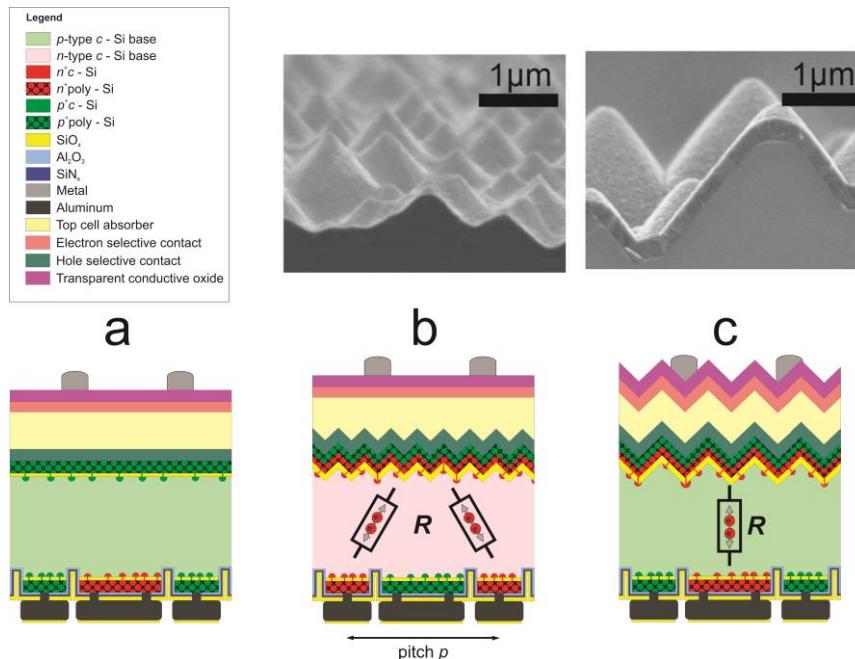


Abbildung 12: 3T-Tandemzellen, bestehend aus einer pin-Perowskit-Topzelle, die entweder (A) in „Reverse“ mit einer p-Typ-Unijunction-Bottomzelle, (B) in Serie mit einer n-Typ-Unijunction-Bottomzelle oder (C) in Serie mit einer p-Typ-Bipolar-Junction-Bottomzelle verbunden ist.

Bei einer *n*-Typ-Unijunction-Bottomzelle (nuIBC) verbindet eine elektronenleitende Waferbasis die elektronenselektiven Kontakte auf der Vorderseite F und der Rückseite Z (siehe Abbildung 12b). So können die Kontakte F und Z effizient Ladungsträger austauschen - auch ohne fotogenerierte Überschussladungsträger in der Waferbasis.

Für die Unijunction-Bottomzelle – sowie für die Bipolar-Junction-Bottomzelle im Grenzfall eines effizienten Ladungsträgertransports zwischen den Kontakten F und Z – verursacht die Stromdichte J_{CT} einen Spannungsabfall V_{FZ} zwischen den Kontakten F und Z, der durch einen Widerstand R (in Abbildung 12b/c als Widerstand angedeutet) annähernd linear mit J_{CT} verknüpft ist. Der Widerstand R und die Transferstromdichte J_{CT} bestimmen die entsprechende Verlustleistungsdichte P_{CT} nach dem Joule'schen Gesetz

$$P_{CT} = R \cdot J_{CT}^2$$

Für eine detaillierte Herleitung, experimentellen Verifikation und Diskussion siehe Ref. [94].

Für Uni-Junction-Bottomzellen spiegelt R den Ausbreitungswiderstand (wenn Kontaktwiderstände und Metallgitterwiderstand vernachlässigt werden) für einen 2-dimensionalen Stromfluss zwischen den Kontakten F und Z wider und hängt vom Schichtwiderstand R_{Sheet} des Wafers und der Geometrie der Zelle ab. Für große Abstände p zwischen den Majoritäten-sammelnden Kontakten auf der Rückseite ist der Stromfluss annähernd rein horizontal und R kann grob geschätzt werden als [94]

$$R \approx \frac{1}{12} \cdot R_{Sheet} \cdot p^2$$

Eine 300- μm -dicke Zelle mit einem Abstand p von 3000 μm , die aus einem 3 Ωcm Wafer hergestellt wurde, weist beispielsweise einen Schichtwiderstand von 100 Ω/sq auf und ergibt einen Widerstand R von 0,75 Ωcm^2 . Liegt der Abstand p dagegen in der Größenordnung der Waferdicke, z. B. 450 μm , so kann man von einem reinen Vertikaltransport ausgehen, und R ist gleich dem Produkt aus der Waferdicke und dem spezifischen Widerstand. Der Widerstand einer 300- μm -dicken Zelle mit einem 3 Ωcm Wafer ergibt $R=0,09 \Omega\text{cm}^2$.

In einer Bipolar-Junction-Bottomzelle fließen die Minoritätsladungsträger vom vollflächigen Minoritätsladungsträgerkontakt F auf der Vorderseite in den nahezu vollflächigen Minoritätsladungsträgerkontakt auf der Rückseite Z, so dass der Einfachheit halber ein nahezu 1D vertikaler Stromfluss angenommen werden kann. Der injektionsabhängige Widerstand R für den Minoritätsladungstransport am maximalen Leistungspunkt der Zelle lautet näherungsweise bei einer Betriebsspannung – zwischen Kontakt R und Z bzw. F – der Bottomzelle am MPP von ca. 500 mV [94]

$$R \approx C_1 \cdot \frac{1}{R_{\text{Sheet}}} \cdot \left(\frac{J_0}{J_{\text{Ph}}} \right)^{0.955}$$

Der Koeffizient C_1 ist proportional zum Kehrwert des Produkts der intrinsischen Ladungsträgerleitfähigkeiten für Elektronen und Löcher und beträgt 4,33e12 $\Omega^2\text{cm}^2$ für c-Si bei Raumtemperatur. J_0 und J_{Ph} entsprechen dem Rekombinationsvorfaktor und der Fotostromdichte in der Bottomsolarzelle. Ihr Verhältnis spiegelt die überschüssige Ladungsträgerdichte im Wafer wider. Die Potenz von 0,955 resultiert aus der Taylor-Näherung um eine Bottomzellspannung von 500 mV am MPP. Interessanterweise taucht der Dunkelschichtwiderstand R_{Sheet} im Gegensatz zur Unijunction-Variante im Nenner auf und spiegelt die Tatsache wider, dass R_{Sheet} die Gleichgewichtsmajoritätsträgerkonzentration darstellt und diese umgekehrt proportional zur Gleichgewichtsminoritätsträgerkonzentration ist. Eine Bipolar-Junction-Bottomzelle mit einem Schichtwiderstand von 100 Ω/sq mit einem J_{Ph} von etwa 20 mA/cm^2 (gefilterten durch Topzelle) und einem Rekombinationsvorfaktor von 100 fA/cm^2 (typische PERC-Zelle [95]) bzw. 20 fA/cm^2 (hocheffiziente POLO²-IBC-Zelle [76]) ergibt einen Transportwiderstand R von 0,7 Ωcm^2 bzw. 0,15 Ωcm^2 .

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass wir erwarten, dass die Unijunction- und die Bipolar-Junction-Bottomzelle aus Sicht der Transportverluste ähnlich gut abschneidet ($R \approx 0,1 \Omega\text{cm}^2$), wenn sie für Anwendungen mit hohem Wirkungsgrad konzipiert sind. Letzteres erfordert die Minimierung der Rekombinationspfade und der Abstände zwischen der Majoritäten-sammelnden Kontakten auf der Rückseite.

Bei Bipolar-Junction-Bottomzellen muss der (lateral leitende) Minoritätsträger-Frontkontakt jedoch auf den aktiven Bereich der Zelle beschränkt werden, um die parasitäre Rekombination im Randbereich zu minimieren. Die erforderliche Strukturierung der Vorderseite erschwert den Herstellungsprozess und führt zu einem langsameren Fortschritt und/oder einer geringeren Effizienz.

Außerdem können die Top- und Bottom-Zellen in Reihe (Abbildung 12b/c) oder Reverse (Abbildung 12a) geschaltet werden. Ersteres erfordert einen Tunnel- oder Rekombinationsübergang, z. B. einen p^+/n^+ Poly-Si-Tunnelübergang (TJ), der eine niederohmige Verbindung der beiden Teilzellen gewährleistet. Die TJ an der Grenzfläche zwischen der Top- und der Bottomzelle kann einen großen optischen Verlust verursachen, z. B. parasitärere Absorption durch freie Ladungsträger, so dass das

Weglassen der TJ in einer Reverse-geschalteten Tandemzelle vorteilhaft erscheint. Darüber hinaus bestimmt die Wahl der Konfiguration der Topzelle die Polarität des vorderen Kontakts der Bottomzelle, und die Eigenschaften dieses Kontakts können dazu führen, dass ein in Reihe geschaltetes Tandem vorteilhafter ist als ein in Reverse geschaltetes und umgekehrt. In unserem Fall weist die Topzelle einen Löcher-sammelnden Kontakt als Rückseitenkontakt auf, so dass die Bottomzelle einen p POLO- bzw. n POLO-Kontakt auf der Vorderseite für eine Reverse bzw. in Reihe geschaltete Tandemzelle benötigt. Da die Passivierungsqualität von p POLO-Kontakten auf texturierten Oberflächen gering ist [96], muss der p POLO-Frontkontakt planar sein und führt entweder zu einem schlechten Lichteinfang in der Bottomzelle (Abbildung 12a) oder erfordert die Implementierung eines texturierten n POLO-Kontakts auf der Rückseite (nicht gezeigt). Letzteres verkompliziert den Zellprozess erheblich. Daher wurde im Projekt das in Reihe geschaltete Tandem mit einer n -Typ-Unijunction-Bottomzelle (Abbildung 12b) gewählt. Für den Herstellungsprozess wurde ein entsprechender Fotolithographie-Maskensatz und für die Messung der 1cm^2 3T-Bottomsolarzellen und der entsprechenden 3T-Tandemsolarzellen ein Messtisch designed, gekauft und getestet. Der Messtisch wurde final am KIT zur Messung der Tandemsolarzellen verwendet.

Herstellung und Ergebnisse der n -Typ Unijunction 3T POLO²-IBC-Bottomzellen

Der folgende Herstellungsprozess führt zu der 3T POLO²-IBC-Bottomzelle in Abbildung 12b: Auf einen einseitig nano-texturierten, $280\text{-}\mu\text{m}$ -dicken, $3\ \Omega\text{cm}$ n -Typ FZ-Wafer wird eine $2,2\text{ nm}$ dünne Grenzflächenoxidschicht thermisch aufgewachsen. Die Nanotextur mit Pyramidenhöhen unter $1\ \mu\text{m}$ wurde beim assoziierten Partner SINGULUS TECHNOLOGIES AG unter Verwendung einer alkalischen KOH-Lösung mit Additiv hergestellt [97]. Abbildung 12b zeigt eine REM-Aufnahme der Nanotextur. Anschließend decken wir das Grenzflächenoxid mit einer intrinsischen amorphen Si-Schicht mittels LPCVD ab. Wir führen eine maskierte Ionenimplantation von B und P in das amorphe Si auf der Rückseite und eine flächige P-Implantation auf der Vorderseite durch. Für die erste Implantation wird eine SiO_x -Maske als Implantationsbarriere durch Photolithographie strukturiert, um ineinandergreifende n^+ - und p^+ -Finger zu erzeugen. Dann rekristallisiert das amorphe Si während einer Nassoxidation, um eine dicke SiO_2 -Schicht zu erzeugen. Die POLO-Kontakte bilden sich in einem anschließenden Hochtemperaturprozess bei 1035°C . Durch das oben für die POLO²-IBC-Single-Junction-Zelle entwickelte Hydrogeniervorgehen optimierten wir die planaren n POLO- und p POLO-Kontakte auf hervorragende Rekombinationsvorfaktoren von unter $0,1\text{ fA/cm}^2$ bzw. $1,8\text{ fA/cm}^2$ für n POLO bzw. p POLO. Der texturierte n POLO-Frontkontakt wurde für das Ko-Formierungstempern durch Variation der Implantationsdosis und Hydrogenierens optimiert und erreicht nach Hydrogenierung wie die planaren n POLO- und p POLO-Rückseiten einen Rekombinationsvorfaktor von $2,2\text{ fA/cm}^2$ je Seite.

Nach der POLO-Kontaktformierung im Hochtemperaturprozess entfernen wir den auf der Rückseite gebildeten p^+n^+ -Poly-Si-Übergang durch KOH-Ätzen eines Grabens zwischen die n POLO- und p POLO-Finger.

Da die POLO-Junction in diesem Stadium auf der Vorderseite stark n -dotiertes ca. 100nm dickes Poly-Si beherbergt, wurde ein isotropes Abdünnverfahren mittels Ammoniak-Wasserstoffperoxid-Lösung etabliert. Dieses Abdünnverfahren weist eine geringe Ätzrate auf, so dass sich die Poly-Si-Dicke nach vorheriger Kalibrierung genau einstellen lässt. Im ersten Schritt wurde ein Poly-Si-Zieldicke von 50nm anvisiert (Abbildung 13). In einem zweiten Schritt kann die Dicke jedoch auch auf Schätzungsweise 20nm herabgesenkt werden.

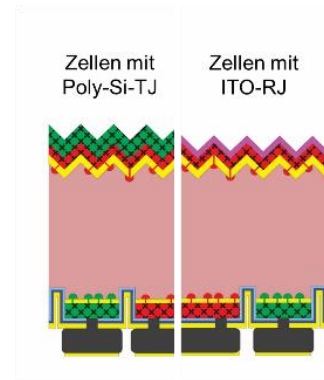
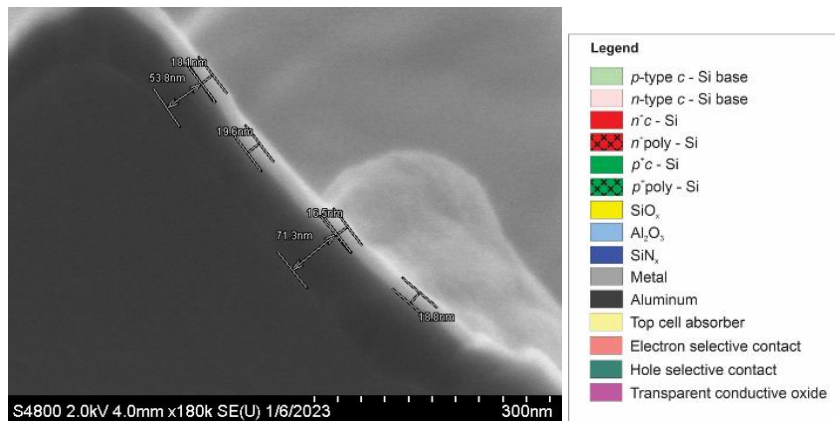


Abbildung 13: Links: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme von einer Pyramide der Vorderseite der 3T-Bottomsolarzelle mit ca. 50nm-dickem Poly-Si und 20nm-dickem ITO, Rechts: Schematischer Querschnitt der hergestellten 3T-Unijunction-Bottomsolarzellen mit Poly-Si-TJ oder ITO-RJ

Da zur Zeit der Herstellung der 3T-Bottomsolarzellen unklar war, ob die Herstellung einer Tandemsolarzelle auf unseren 3T POLO²-IBC- Bottomzellen mit p^+/n^+ Poly-Si-TJ möglich ist, wurden zwei Versionen von Bottomsolarzellen hergestellt. Die erste Version enthält die anvisierte p^+/n^+ Poly-Si TJ. Es wird nach dem Entfernen der SiO₂-Schicht und dem Abdünnen des Poly-Si auf der Vorderseite eine entartete, in-situ p -dotierte Poly-Si-Schicht durch LPCVD bei 600°C abgeschieden, um den niedrig-resistiven p^+/n^+ Poly-Si-Tunnelübergang auf der Vorderseite zu bilden. Ein einseitiges KOH-Ätzen entfernt die p^+ -Poly-Si-Schicht auf der Rückseite. Dabei sind die POLO-Kontakte auf der Rückseite durch das dicke thermische SiO₂ aus der POLO-Kontaktformierung geschützt.

Bei der zweiten Version der Bottomzelle (ITO-RJ) ersetzen wir die p^+ -Poly-Si-Schicht durch eine ITO-Schicht, welche bei der Herstellung von Pk-Zellen üblicherweise Verwendung findet und eine einfachere Integration der Topzelle auf der Bottomsolarzelle ermöglicht.

Für die Fertigstellung der Bottomsolarzellen entfernen wir die dicke SiO₂-Schicht auf der Rückseite scheiden darauf den auf Single-Junction-POLO²-IBC-Zellen entwickelten Dreifachschichtstapel aus AlO_x/SiN_y/SiO₂ ab, um den Grabenbereich zu passivieren, die POLO-Übergänge zu hydrogenieren und den Prozess der Laser-Kontaktöffnung zu erleichtern. Nach der Laserkontaktöffnung verdampfen wir eine 10 µm dicke Al-Schicht und eine SiO₂-Schicht auf der Rückseite und führen die Kontakttrennung mittels Laserstrukturierung und anschließender einseitiger Al-Ätze durch. *Abbildung 14* zeigt schematisch beide Versionen der 3T-Bottomsolarzelle nach Fertigstellung. *Abbildung 14* zeigt eine Fotoaufnahme von der Rückseite eines 3T-Bottomzellwafers nach Fertigstellung sowie die Pseudo-Effizienzen der 3T-Bottomzellen mit poly-Si-TJ und ITO-RJ vor Laserkontaktöffnung und der 3T-Bottomzelle mit ITO-RJ nach ITO-Abscheidung und Tempern.

Vor bzw. nach der Laserkontaktöffnung wiesen die Bottomzellen, die ein ITO-Rekombinationsschicht bekommen sollten, ein implizierte Pseudo-Effizienz $ip\eta$ von bis zu 12.4% (Annahme $J_{SC} = 20\text{mA/cm}^2$, Waferdicke: 280µm) mit iV_{OC} bis zu 730mV und ein $ipFF$ bis zu 85.2% auf. Wie bereits bei den Single-Junction-POLO²-IBC-Zellen gezeigt, ist der Laserkontaktöffnungsprozess nahezu verlustfrei, so dass die Pseudo-Effizienzen in vor und nach Laserkontaktöffnung annähernd gleich ist. Die ITO-Abscheidung auf der Vorderseite hingegen verursacht, wie bereits in der Vergangenheit beobachtet, einen massiven Schaden. Letzterer konnte jedoch fast vollständig durch Tempern behoben werden.

Die 3T-Bottomsolarzellen mit integrierter Poly-Si-Tunneldiode wies nach Laserkontaktöffnung eine ähnliche Qualität ($ip\eta$ von bis zu 12.2% (Annahme $J_{SC} = 20\text{mA/cm}^2$, Waferdicke: 280µm) mit iV_{OC} bis

zu 728mV und ein ipFF bis zu 85.9%) auf wie ihr Pendant mit ITO-Rekombinationsschicht. Nach Metallisierung und Kontakttrennung beider Zellversionen, sind die 3T-Bottomzellen mit ITO-RJ (poly-TJ) auf exzellentem Niveau von ip η von bis zu 12.3% (12.2%) (Annahme J_{SC} = 20mA/cm²). Durch Maskierung der Zellen auf 1cm² aktive Zellfläche ergibt sich ein weiterer Verlust von ca. 0.3% im ip η . Es sei angemerkt, dass beim Ausschneiden der Zellen auf 25x25mm² kein signifikanter Verlust zu beobachten ist. Diese Beobachtung ist konsistent mit der Erwartung für diese Zellstruktur. Zur Einsortierung der Pseudo-Effizienz: Würde die 26.1% POLO²-IBC-Zelle aus Haase *et al.* rechnerisch gefiltert werden, ergäbe sich eine ähnliche Effizienz wie bei den 3T-Bottomzellen, d.h. die 3T-Bottomzellen sind auf Weltklasse-Niveau (Vergleiche auch Abbildung 11b).

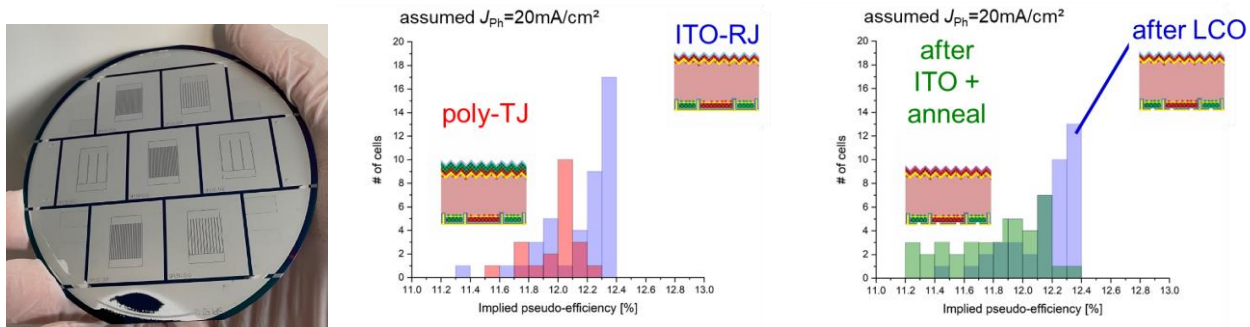


Abbildung 14: Links: Foto von der Rückseite der 3T-Bottomzelle nach Al-Kontakttrennung, Mitte: Pseudo-Effizienz der hergestellten 3T-Bottomsolarzellen mit poly-Si-TJ und ITO-RJ vor Laserkontakttöffnung, Rechts: Pseudo-Effizienz der hergestellten 3T-Bottomsolarzellen mit ITO-RJ nach Laserkontakttöffnung und nach ITO-Abscheidung und Tempern. Annahme bei allen Auswertungen: Generationsstroms von 20 mA/cm², welcher den Idealfall eines gefilterten Spektrums unter einer Topsolarzelle repräsentiert

3T-Tandemsolarzellen

(Details zur Tandemprozessierung und Tandemergebnisse sind im 27Plus6-Abschlussbericht zum Teilvorhaben vom KIT mit FKZ 03EE1056B zu finden)

Auf die ITO-RJ wird eine Doppelschicht aus NiO_x und 2PACz als HTL aufgebracht, gefolgt von einer mikrometerdicken Perowskit-Absorberschicht mit unterschiedlichen Bandlücken, wie von Farag *et al.* berichtet [97]. Eine Doppelschicht aus C60 und SnO₂ bildet das ETL der oberen Zelle, ergänzt durch das transparente Indiumzinkoxid, eine aufgedampfte Silberelektrode und eine antireflektierende LiF₂-Schicht. Die Tandemsolarzellen werden nach der vereinfachten Messprozedur für 3T-Tandemsolarzellen (siehe Kapitel 2.1.4) am KIT vermessen. Mit einer Bandlücke von 1.73 eV erreicht die Tandemsolarzellen einen Wirkungsgrad von 26.5% im 2T-Betrieb (J_{SC,TR}=18 mA/cm², V_{OC,TR}=1.83V, FF_{TR}=80%) und 27% im 3T-Betrieb (η_{TZ}=17,7%, J_{SC,TZ}=20 mA/cm², V_{OC,TZ}=1,2V, FF_{TZ}=74,3% // η_{RZ}=9,3%, J_{SC,RZ}=18 mA/cm², V_{OC,RZ}=0,65V, FF_{RZ}=78,7%)¹. An den Kurzschlussströmen der 3T-Terminal-Messung erkennt man, dass die beiden Subzellen trotz hoher Topzellbandlücke noch immer durch den Strom der Bottomsolarzelle limitiert wird. Nichtsdestotrotz zeigt es sich (wie erwartet), dass beim Fall guter Stromanpassung von Top- und Bottomsolarzelle, der Wirkungsgrad im 2T- und 3T-Betrieb fast gleich ist. Auffällig ist die

¹ Der Stromkreis TR spiegelt die übliche Messkonfiguration für 2T-Tandemzellen wieder, wenn der Stromkreis RZ offen ist. Der Stromkreis TZ spiegelt annähernd die Topzelle wieder und RZ die gefilterte Bottomsolarzelle, wo bei der jeweils andere Stromkreis am Punkt maximaler Leistung gehalten wird.

geringe Spannung $V_{OC,RZ}$ und der geringe FF_{RZ} . Eine Ursache für den Unterschied zu den oben beschriebenen Werten ist die beobachtete starke Degradation durch den NiO_x -Sputterprozess (siehe für direkten Vergleich im Kapitel 2.1.5). Das NiO_x ist bei texturierten Bottomsolarzellen-Vorderseiten bisher jedoch unerlässlich. Mit einer Bandlücke von 1.68 eV erreicht die Tandemsolarzellen einen Wirkungsgrad von 24,9% im 2T-Betrieb ($J_{SC,TR}=16.5 \text{ mA/cm}^2$, $V_{OC,TR}=1.82\text{V}$, $FF_{TR}=82.6\%$) und 26.8% im 3T-Betrieb ($\eta_{TZ}=18,3\%$, $J_{SC,TZ}=21.3 \text{ mA/cm}^2$, $V_{OC,TZ}=1,18\text{V}$, $FF_{TZ}=72,6\%$ // $\eta_{RZ}=8,5\%$, $J_{SC,RZ}=16,5 \text{ mA/cm}^2$, $V_{OC,RZ}=0,64\text{V}$, $FF_{RZ}=79,2\%$). Mit einer Bandlücke von 1.58 eV erreicht die Tandemsolarzellen einen Wirkungsgrad von 23% im 2T-Betrieb ($J_{SC,TR}=14.7 \text{ mA/cm}^2$, $V_{OC,TR}=1.78\text{V}$, $FF_{TR}=87.2\%$) und 29.6% im 3T-Betrieb ($\eta_{TZ}=21,6\%$, $J_{SC,TZ}=24.3 \text{ mA/cm}^2$, $V_{OC,TZ}=1,19\text{V}$, $FF_{TZ}=74,4\%$ // $\eta_{RZ}=8\%$, $J_{SC,RZ}=14,8 \text{ mA/cm}^2$, $V_{OC,RZ}=0,66\text{V}$, $FF_{RZ}=81,6\%$). Dank 3T-Messung lassen sich die semitransparenten Topsolarzellen mit unterschiedlichen Bandlücken auf relevantem Substrat hervorragend vergleichen. Die Effizienz steigt mit sinkender Bandlücke – wie aus der Theorie erwartet. Betrachtet man die auf die jeweils bandlückenabhängige ideale Effizienz normierte Effizienz, zeigt sich, dass die PSC mit einer Bandlücke von 1.73 eV und 1.68 eV jeweils ca. 63% ihrer idealen Effizienz erreichen, wo hingegen die PSC mit 1.58 eV einen signifikant höheren Wert von 71% der idealen Effizienz erreicht und damit zum höchsten Wirkungsgrad von 29,6% beim stromfehlangepassten 3T-Tandem führt. Dabei zeigt sich der Vorteil der 3T-Tandemsolarzelle von ca. 7%_{abs.} gegenüber dem 2T-Betrieb und fast 3%_{abs.} gegenüber den 3T-Tandemsolarzellen mit höherer Bandlücke. Wie bereits oben erwähnt, wird auch hier ein erheblicher Schaden beim NiO_x -Sputterprozess induziert, so dass die Bottomsolarzelle lediglich 8% statt der ~10% (Abschätzung aus der ILM-Messung der Zellen vorm Verschicken ans KIT) unter diesen Bedingungen. Daher ist zu erwarten, dass eine weitere Optimierung beim Bottomzellprozess z.B. dünnere Poly-Si-Schicht auf der Vorderseite und beim Tandemzellprozess z.B. schadensarme NiO_x -Abscheidung, zu einer weiteren erheblichen Wirkungsgradsteigerung in Richtung 32-33% führen werden. Zusammenfassend sei hervorgehoben, dass ein Wirkungsgrad von fast 30% für die Zellarchitektur mit texturierter Vorderseite ein hervorragendes Ergebnis ist und die Funktion der 3T-Tandemsolarzelle demonstriert. Sollen die 3T-Tandemsolarzellen in ein spannungsangepasstes 2T-Modul verschaltet werden, spielen die Spannungen der Subzellen eine wichtige Rolle (siehe Kapitel zur Modulverschaltung unten). Die jeweiligen Tandemsolarzellen mit 1,58 eV, 1,68 eV und 1,7 eV zeigen am Punkt maximaler Leistung eine Spannungsdifferenz $\Delta V_{mpp} \sim V_{TZ,mpp} - 2 \cdot V_{RZ,mpp}$ von -0,15 V, -0,13 V und -0,09 V. Damit kann ein spannungsangepasstes 2T-Modul mit einer Effizienz zwischen 3T-Zell-zu-2T-Modul-Leistung von zwischen 97% und 99% realisiert werden (Annahme eines langen Modulstrings bzw. Systemstrings). Für eine 3T-Tandemsolarzelle mit einer Effizienz von 29,6% und einem $\Delta V_{mpp}=-0,15\text{V}$, ergäbe sich eine Moduleffizienz von ca. 28.7%.

2.1.5 Entwicklung der Messprozedur für 3T-Tandemsolarzellen

Das Messprozedere für 3T-Tandemsolarzellen wurde am Nation Renewable Energy Laboratory unter der Mitwirkung von ISFH entwickelt und in *Geisz et al., Cell Reports Physical Science 2,100677* veröffentlicht.

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse kurz zusammengefasst.

Die Messprozeduren für 3T-Tandemsolarzellen kann in zwei Methoden unterschieden werden: die Blackbox-Methode und die vereinfachte Methode. Die Blackbox-Methode wurde bereits in einer vorherigen Zusammenarbeit mit dem NREL benutzt und mach

keinerlei Annahmen über das gemessene 3T-Bauelement und ermöglicht die Untersuchung des 3T-Bauelements im Detail. Beispielsweise konnte die o.g. Publikation mit Hilfe dieser Methode ein entsprechendes Ersatzschaltbild-Modell an die Kennlinien anpassen und damit physikalische Parameter wie die optische Einkopplungseffizienz für die Lumineszenz aus der Topzellen in die Bottomsolarzelle bestimmen. Es werde die beiden Stromkreise (siehe z.B. Abbildung 15a) der 3T-Zellen simultan variiert und für jeden Arbeitspunkt die Leistung als Summe der Leistungen der Einzelkreise errechnet und in einem zweidimensionalen Leistungsdiagramm dargestellt. Nachfolgend wird die maximale Leistung bestimmt. Diese Methode ist im Detail in der o.g. Publikation beschrieben. Sie eignet sich jedoch vor allem für Solarzellen, die sich während des gesamten Messzeitraums nicht verändern – also z.B. keine dynamischen Prozesse ablaufen – welche die Solarzellparameter beeinflussen. Aufgrund von Prozessen wie z.B. der Diffusion von Ionen im Perowskit-Absorber ist diese Methode somit für Pk/Si-Tandemsolarzellen weniger geeignet.

Die vereinfachte Methode hingegen setzt voraus, dass die Funktionsweise der untersuchten 3T-Solarzelle hinreichend gut bekannt ist. Diese benötigte Expertise wurde am ISFH bereits durch die Pionierarbeiten zu 3T-Tandemsolarzellen seit einigen Jahren und vor allem auch in 27Plus6 aufgebaut. Für hocheffiziente 3T-POLO²-IBC-Bottomsolarzellen wie sie oben beschrieben sind, kann die Messung nach folgendem Schema durchgeführt werden, da die resistive Kopplung vernachlässigbar ist. Bei der Messung wird der RZ-Stromkreis der Solarzelle auf dem Arbeitspunkt $V_{RZ}=0V$ gehalten und der zweite Stromkreise TZ vermessen wird. Im zweiten Schritt wird der TZ-Stromkreis der Solarzelle auf dem Arbeitspunkt der maximalen Leistungsabgabe $V_{TZ}=V_{TZ,MPP}$ gehalten und der RZ-Stromkreise vermessen. Diese Reihenfolge gewährleistet, dass die Topsolarzelle bei der zweiten Messung bei einer Spannung betrieben wird, welche eventuelle Lumineszenz aus der Topsolarzelle in die Bottomsolarzelle annähernd richtig wiedergibt. Dieses Verfahren erlaubt die erste Abschätzung der Arbeitspunkte der beiden Stromkreise für die maximale Leistungsabgabe. Eventuell ist zusätzlich eine Suche um diesen Arbeitspunkt nötig, um die Genauigkeit zu verbessern. Dazu wird die Prozedur wiederholt durchgeführt und ein Stromkreis jeweils auf den Arbeitspunkt maximaler Leistungsabgabe gesetzt und jeweils der andere Stromkreis vermessen.

Die vereinfachte Methode ist für die Untersuchung von 3T-Pk/Si-Solarzellen ausgezeichnet geeignet, da sie auch das Tracking des Arbeitspunktes mit maximaler Leistung erlaubt, welches sich bei Pk-basierten Tandemsolarzellen als Standard etabliert hat.

Für die vereinfachte Methode wurde die Messprozedur und die benötigte Hard- und Software festgelegt und das LOANA-Messsystem erweitert. Abbildung 15 (b-e) zeigt die ersten 3T-Testmessungen am LOANA-Messsystem nach der oben beschriebenen vereinfachten Messmethode mit einer als 3T-Tandemsolarzelle verschalteten 4T GaInP//Si-Tandemsolarzelle.

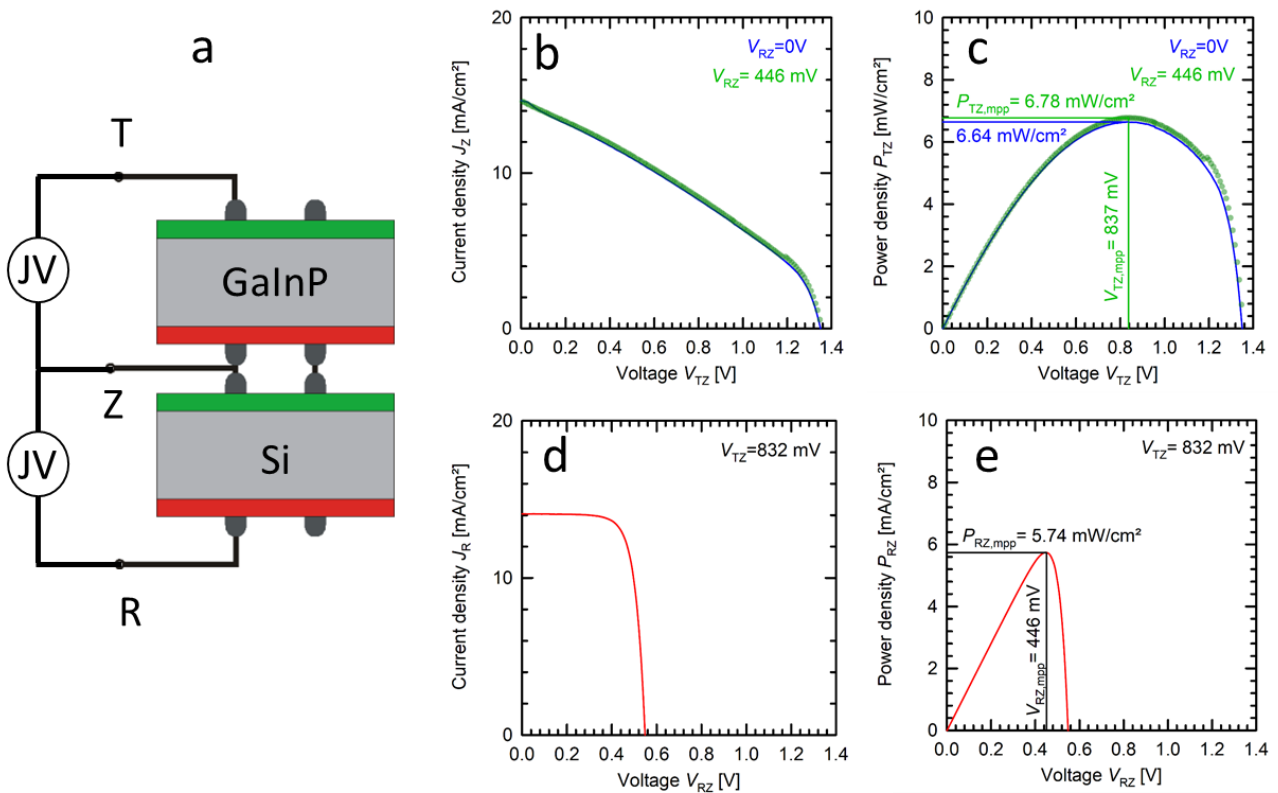


Abbildung 15: (a) Als 3T-Tandemsolarzelle verschaltete 4T-Tandemsolarzelle zum Test der 3T-Erweiterung des LOANA-Messsystems, (b) Stromdichte-Spannungskennlinie und (c) Leistungsdichte-Spannungskennlinie des TZ-Stromkreises mit $V_{RZ}=0V$ oder $V_{RZ}=446 mV$, (d) Stromdichte-Spannungskennlinie und (e) Leistungsdichte-Spannungskennlinie des RZ-Stromkreises mit $V_{TZ}=832 mV$

2.1.6 Entwicklung und Herstellung von 2T Bottomsolarzellen

Für die vor allem Topzell-seitige Optimierung der Tandemsolarzellen im Projekt 27Plus6 wurden vereinfachte 2T Bottomzellen entwickelt, welche möglichst die gleichen Herstellungsprozesse wie die 3T Bottomsolarzellen verwenden, aber ohne Fotolithographie auskommen und daher in größerer Stückzahl hergestellt werden können. Abbildung 16a zeigt die erste Generation von 2T Bottomsolarzellen basierend auf der Silizium-Heterojunction-Technologie vom assoziierten Partner Meyer Burger (MB) Technology. Diese MB-Bottomsolarzellen sind aus industrietypischen n -Typ-Wafern, die auf der Vorderseite chemisch nachpoliert und auf der Rückseite texturiert sind, hergestellt. Auf der Vorderseite befindet sich ein elektronen-sammelnder Kontakt aus amorphem Silizium (a-Si) und die Rückseite beherbergt ein Löcher-sammelnden a-Si Kontakt. Der vorderseitige a-Si-Kontakt ist mit einer ganzflächigen dünnen ITO-Schicht abgeschlossen. Auf der Rückseite ist das ITO auf die aktive Zellfläche beschränkt, um Randeffekte beim Vereinzeln der Zellen zu vermeiden. Auf die Vorderseite wurden am ISFH zusätzlich SiO_x -Streifen zur Isolation aufgebracht, die unter dem Metallkontakt der Topzelle liegen und bei einem potentiellen Durchstechen der Kontaktnadel beim Messen den vollständigen Kurzschluss vermeiden soll. Diese erste Generation diente vor allem zu Beginn des Projektes als Entwicklungsplattform am KIT und fungierte im Projektverlauf als bekannte Referenz.

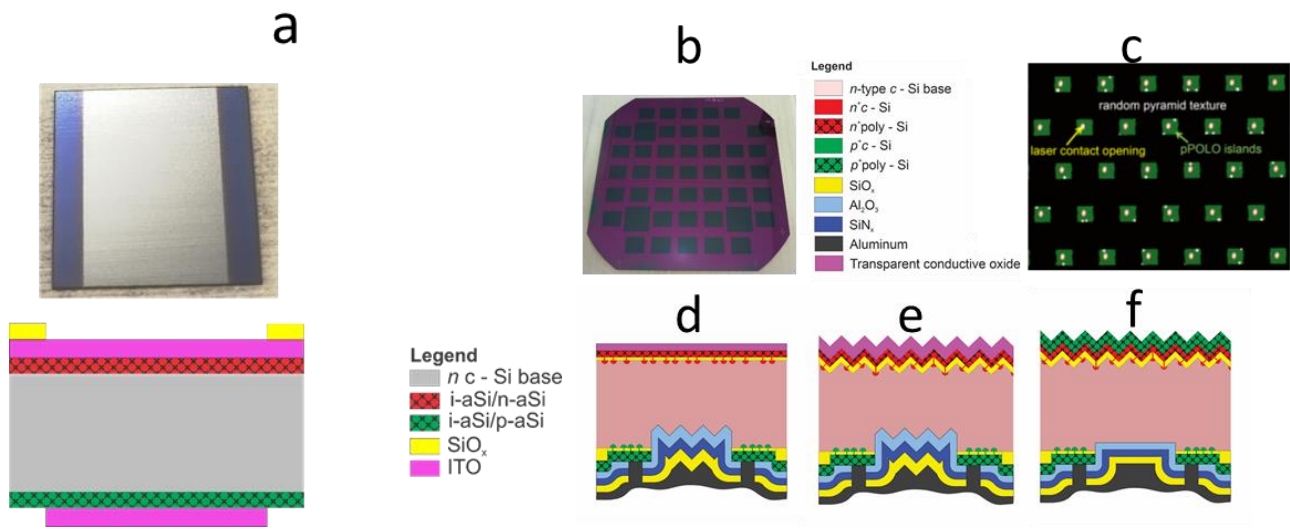


Abbildung 16: (a) Fotoaufnahme der Vorderseite und schematischer Querschnitt der ersten Generation von 2T-Bottomsolarzellen, (b, d) Fotoaufnahme der Rückseite und schematischer Querschnitt der zweiten Generation von 2T-Bottomsolarzellen mit polierter ITO-RJ-Vorderseite, (c) Lichtmikroskop-Bild von der Rückseite zweiten Generation von 2T-Bottomsolarzellen nach Laserkontaktöffnung, (e) schematischer Querschnitt der zweiten Generation von 2T-Bottomsolarzellen mit texturierter ITO-RJ-Vorderseite, (f) schematischer Querschnitt der zweiten Generation von 2T-Bottomsolarzellen mit texturierter Vorderseite mit poly-Si-TJ

Abbildung 16(b-f) zeigt die zweite Generation von 2T Bottomsolarzellen, die auf den Herstellungsprozessen der Single-Junction-POLO²-IBC-Solarzelle aufbaut.

Herstellung der zweiten Generation an 2T Bottomsolarzellen

Die Bottomsolarzellen mit texturierter Vorderseite wurden auf sägerauen, schadensgeätzten 3 Ohmcm n -Typ-Wafern hergestellt. Um den pPOLO-Kontakt auf der Rückseite wegen der besseren Passiviereigenschaften planar zu halten, wird eine einseitige Textur auf der Vorderseite durchgeführt und die Rückseite mittels einer SiN_x -Schicht dabei geschützt.

Für die 2T Bottomsolarzellen mit planarer Vorderseite werden CMP-polierete n -Typ-Wafer verwendet. Um Randrekombination an den Laserkanten zu vermindern, ist es wichtig den Minoritätsladungsträger-sammelnden pPOLO-Kontakt vom Rand zu isolieren. Hierzu wird bei allen Zellvarianten eine 100 nm dicke passivierende SiO_2 -Schicht gewachsen, welche im Zellbereich mittels Laser ablatiert und anschließend der Laserschaden in KOH entfernt wird. Dabei dient das dicke SiO_2 als Ätzschutz für die Vorderseite und den Rand auf der Rückseite. Abbildung 16b zeigt die strukturierten Zellbereiche (Schwarz) und den SiO_2 -Passivierrand (Dunkelmagenta) auf der Rückseite eines Zellwafers.

Vor dem Wachstum des Grenzflächenoxid und der a-Si-Abscheidung im LPCVD-Verfahren wird die schützende SiO_2 -Schicht auf der Vorderseite entfernt. Das a-Si auf der Vorderseite und Rückseite wird mit Hilfe von Ionenimplantation mit Phosphor und Bor dotiert, dann oxidiert und im Hochtemperaturprozess bei 1035°C die POLO-Kontakte geformt. Das auf dem pPOLO-Kontakt gewachsene SiO_2 wird im aktiven Zellbereich auf der Rückseite der Zelle mittels Laser ablatiert und der ungeschützte pPOLO-Bereich mittels KOH entfernt und ggf. texturiert, so dass lediglich quadratische pPOLO-Inseln mit einer Breite von 100 oder 200 μm und einem Flächenanteil zwischen 6% und 33% verbleiben (siehe Abbildung 16c). Die erzeugte Textur zwischen den Inseln

mit einem Flächenanteil zwischen 67% und 94% gewährleistet im späteren Tandem – im speziellen bei der polierten Vorderseite – die Lichtstreuung.

Die Bottomsolarzelle in Abbildung 16f mit Poly-Si-TJ erhält keine Textur auf der Rückseite, um die Dicke der schützende SiO_2 -Schicht auf dem $p\text{POLO}$ -Kontakt für den folgenden Schritt zu erhalten, in dem das hochdotierte p^+ Poly-Si im LPCVD-Verfahren beidseitig abgeschieden wird und auf der Rückseite anschließend nasschemisch durch KOH entfernt wird. Das p^+ Poly-Si auf der Vorderseite wird durch eine SiN_x -Schicht gegen die KOH geschützt.

Danach werden alle dielektrischen Schutzschichten von allen Bottomsolarzell-Versionen entfernt und die Rückseite mit den für die Single-Junction- POLO^2 -IBC-Zellen entwickelten Dreifachschichtstapel aus $\text{AlO}_x/\text{SiN}_y/\text{SiO}_z$ abgeschieden. Die $n\text{POLO}$ -Vorderseite wird mit Hilfe einer AlO_x -Schicht hydrogeniert. Laut ILM-Lebensdauer-Monitoring, wiesen die 2T Bottomsolarzellen mit texturierter Vorderseite und ITO-RJ (noch ohne ITO) nach der Passivierung eine implizierte Pseudo-Effizienz von bis zu 12,9% ($iV_{\text{OC}}=745\text{mV}$, $\text{ipFF}=86,6\%$, $J_{\text{Ph,assumed}}=20\text{m A/cm}^2$, Waferdicke: ca. $150\text{ }\mu\text{m}$) und die Bottomzellen mit poly-Si-TJ eine implizierte Pseudo-Effizienz von bis zu 12,67% ($iV_{\text{OC}}=741\text{ mV}$, $\text{ipFF}=85,5\%$, $J_{\text{Ph,assumed}}=20\text{m A/cm}^2$, Waferdicke: ca. $150\text{ }\mu\text{m}$) auf. Damit konnte die poly-Si-Tunneldiode erfolgreich in die Bottomsolarzelle auf dem gleichen Wirkungsgradniveau wie die Bottomsolarzelle ohne poly-Si-TJ integriert werden und damit wurde Meilenstein 2.1 erreicht.

Der Dreifachschichtstapel wird lokal auf den $p\text{POLO}$ -Inseln mittels Laser geöffnet. Laut ILM-Lebensdauer-Monitoring nach Laserkontaktöffnung wiesen die 2T Bottomsolarzellen mit planarer Vorderseite eine implizierte Pseudo-Effizienz von bis zu 12,51% ($iV_{\text{OC}}=732\text{mV}$, $\text{ipFF}=85,4\%$, $J_{\text{Ph,assumed}}=20\text{m A/cm}^2$) auf.

Auf der Vorderseite der Zellversion mit der ITO-RJ wird eine ITO-Schicht gesputtert, nach dem das native SiO_x in HF entfernt wurde, und der Sputterschaden durch Tempern ausgeheilt. Laut ILM-Lebensdauer-Monitoring nach ITO-Sputtern und anschließendem Tempern wiesen die 2T Bottomsolarzellen mit planarer Vorderseite eine implizierte Pseudo-Effizienz von bis zu 12,55% ($iV_{\text{OC}}=737\text{mV}$, $\text{ipFF}=85,16\%$, $J_{\text{Ph,assumed}}=20\text{m A/cm}^2$) auf.

Schließlich wurde bei allen Zellversionen auf der Rückseite ein Al-Kontakt aufgedampft.

Die 2T Bottomsolarzellen mit planarer Vorderseite wiesen nach Al-Aufdampfen eine implizierte Pseudo-Effizienz von bis zu 12,51% ($iV_{\text{OC}}=737\text{mV}$, $\text{ipFF}=84,89\%$, $J_{\text{Ph,assumed}}=20\text{m A/cm}^2$) auf, was die fast verlustfrei Fertigstellung im Back-End-Prozess, wie es auf der Single-Junction- POLO^2 -IBC-Zelle vorentwickelt wurde, hervorhebt.

Für die weitere Prozessierung der Bottomzellen zu Tandemsolarzellen, mussten die Bottomsolarzellen aus einem Wafer auf $16\times 16\text{mm}^2$ (später $25\times 25\text{mm}^2$) große Substrate geschnitten werden. Das Ausschneiden der Zellen mit einer aktiven Zellfläche von $10\times 12\text{ mm}^2$ aus einem Wafer auf $16\times 16\text{ mm}^2$ Substrate reduzierte die implizierte Pseudo-Effizienz von 12,51 % auf 11,66 % ($iV_{\text{OC}}=725\text{ mV}$, $\text{ipFF}=80,42\%$, $J_{\text{Ph,assumed}}=20\text{m A/cm}^2$). Um den Randeffekt zu verringern und die Arbeitshypothese zu überprüfen, dass der Abstand von 2 mm bzw. 3 mm zwischen Zelle und defektreichem Laserrand im Bereich der Diffusionslänge der Minoritätsladungsträger liegt und damit für den Rekombinationsverlust verantwortlich ist, wurden Bottomsolarzellen mit einem größeren Rand von 6 mm bzw. 7,5 mm auf $25\times 25\text{ mm}^2$ Substraten hergestellt. Die hergestellten Bottomsolarzellen wiesen einen ähnlichen Wirkungsgrad nach Al-Aufdampfen auf und zeigten entgegen der Arbeitshypothese einen ähnlich großen Verlust durch das Ausschneiden auf $25\times 25\text{ mm}^2$ wie die vorherigen Zellen auf $16\times 16\text{ mm}^2$. Deshalb scheidet die laterale Minoritätsladungsträgerdiffusion durch den Wafer als Hauptursache für den Verlust aus. Eine weitere plausible Hypothese ist, dass im schwach dotierten n -Typ Wafer eine lateral leitfähige Löcher-leitende Schicht existiert, welche den Transport von Löchern unabhängig von der Diffusion

im Wafer zu den Defekten am Rand ermöglicht und die Rekombination dort erleichtert. Die Löcher-leitende Schicht kann entweder durch Dotierung des Wafers durch die Eindiffusion von Bor aus dem p^+ Poly-Si durch das 40-50 nm dicke SiO_2 auf der Rückseite verursacht werden und/oder durch eine Bandverbiegung im Wafer durch das hochdotierte p^+ Poly-Si durch die darunterliegende ca. 40-50 nm SiO_2 -Schicht hindurch induziert werden. Beide Ursachen für eine solche Löcher-leitende Schicht werden durch den Wechsel der Randpassivierung auf der Rückseite von einem Stapel aus $\text{SiO}_2/p^+\text{POLO}$ zu $\text{AlO}_x/\text{SiN}_y$ in der dritten Generation von 2T Bottomsolarzellen behoben.

Herstellung der dritten Generation an 2T Bottomsolarzellen

Der Herstellungsprozess der dritten Generation von 2T Bottomsolarzellen folgt dem Prozess der zweiten Generation, allerdings wird am Anfang das Wachstum der 100 nm dicken SiO_2 -Schicht weggelassen und damit auch die anschließende Laserdefinition und KOH-Ätzung der aktiven Zellfläche. Dafür wird bei der Strukturierung der $p\text{POLO}$ -Inseln nach der Kontaktformierung auf der Rückseite der Rand ebenfalls ablatiert und anschließend mit $\text{AlO}_x/\text{SiN}_y/\text{SiO}_2$ passiviert.

Zusätzlich wird bei den Bottomsolarzellen mit texturierter Vorderseite einerseits die Nanotextur vom assoziierten Partner SINGULUS TECHNOLOGIES AG bereitgestellt, welche $<1\ \mu\text{m}$ große Pyramiden statt wie bisher ca. $1 - 2\ \mu\text{m}$ aufweist. Andererseits wurden die Herstellungsparameter des texturierten $n\text{POLO}$ -Kontaktes optimiert. Abbildung 17e zeigt die Abhängigkeit des Rekombinationsvorfaktors J_{0C} von der Implantationsdosis, der Temperatur bei der Junctionformierung und von der Hydrogenierung. Ohne Hydrogenierung des POLO -Kontaktes ergibt sich ein minimales J_{0C} von $15\ \text{fA/cm}^2$ bei einer Implantationsdosis von $7\text{e}15\ \text{cm}^{-2}$ und einer Temperatur von 1035°C , was bisher den verwendeten Parametern entspricht. Nach der Hydrogenierung wird für diesem Parametersatz ein minimales J_{0C} von $6\ \text{fA/cm}^2$ erreicht. Für geringere Implantationsdosen von $3\text{e}15\ \text{cm}^{-2}$ bzw. $5\text{e}15\ \text{cm}^{-2}$ bei einer Temperatur von 1035°C werden vor Hydrogenierung minimale J_{0C} von $94\ \text{fA/cm}^2$ bzw. $22\ \text{fA/cm}^2$ erreicht – also höher als beim bisherigen Parametersatz. Nach Hydrogenierung werden für die geringeren Implantationsdosen von $3\text{e}15\ \text{cm}^{-2}$ bzw. $5\text{e}15\ \text{cm}^{-2}$ minimale J_{0C} von $2\ \text{fA/cm}^2$ erreicht. Der geringere J_{0C} bei höherer Implantationsdosis lässt sich vermutlich auf eine minimale Eindiffusion von Phosphor und damit eine Feldeffektpassivierung am noch defektreichen Grenzflächenoxid zurückführen. Nach der Hydrogenierung trägt der eindiffundierte Bereich jedoch zur stärkeren Auger-Rekombination bei und erreicht deshalb höhere J_{0C} als mit geringerer Implantationsdosis. Da mit steigender Implantationsdosis der Getter-Effekt stärker ausgeprägt ist und damit die Volumenlebensdauer des Wafers verbessert, wurde für die dritte Generation von Bottomsolarzellen und für die 3T Bottomsolarzellen eine Implantationsdosis von $5\text{e}15\ \text{cm}^{-2}$ gewählt.

Weiterhin wurde das n -dotierte Poly-Si auf der Vorderseite mittels Ammoniak-Wasserstoffperoxid-Lösung auf ca. $20 - 50\ \text{nm}$ im Vergleich zu $110\ \text{nm}$ (später $50\ \text{nm}$) bei der zweiten Generation. Um die parasitäre Absorption durch die ITO-Schicht auf der Vorderseite zu minimieren, wurde eine Doppelschicht aus einer $3\ \text{nm}$ dünnen Saatschicht für die Kontaktbildung zum Poly-Si und einer $10\ \text{nm}$ dicken transparenteren ITO-Deckschicht entwickelt.

Die beiden Versionen von 2T Bottomsolarzellen der dritten Generation nach Fertigstellung sind in Abbildung 17 dargestellt. Wie in Abbildung 17(a,b) erkennbar, wurden (wie bei der ersten Generation von Bottomsolarzellen) SiO_x -Isolationsstreifen auf die Vorderseite der Bottomsolarzellen mittels Sputterverfahren nach dem ITO-Sputtern abgeschieden und anschließend getempert. Die 2T Bottomsolarzellen mit polierter Vorderseite (Abbildung 17b) erreicht nach Fertigstellung (vor Schneiden) eine implizierte Pseudo-Effizienz von $12,36\%$ ($iV_{oc}=730\text{mV}$, $ipFF=84,69\%$,

$J_{Ph,assumed}=20\text{ m A/cm}^2$, Waferdicke: 275 μm). Das Laserschneiden der Bottomsolarzellen auf 25x25 mm^2 Substrate verursacht lediglich einen geringen Verlust, so dass die implizierte Pseudo-Effizienz von 12,36% auf 12,25% ($iV_{OC}=730\text{ mV}$, $ipFF=83,91\%$, $J_{Ph,assumed}=20\text{ m A/cm}^2$) absinkt.

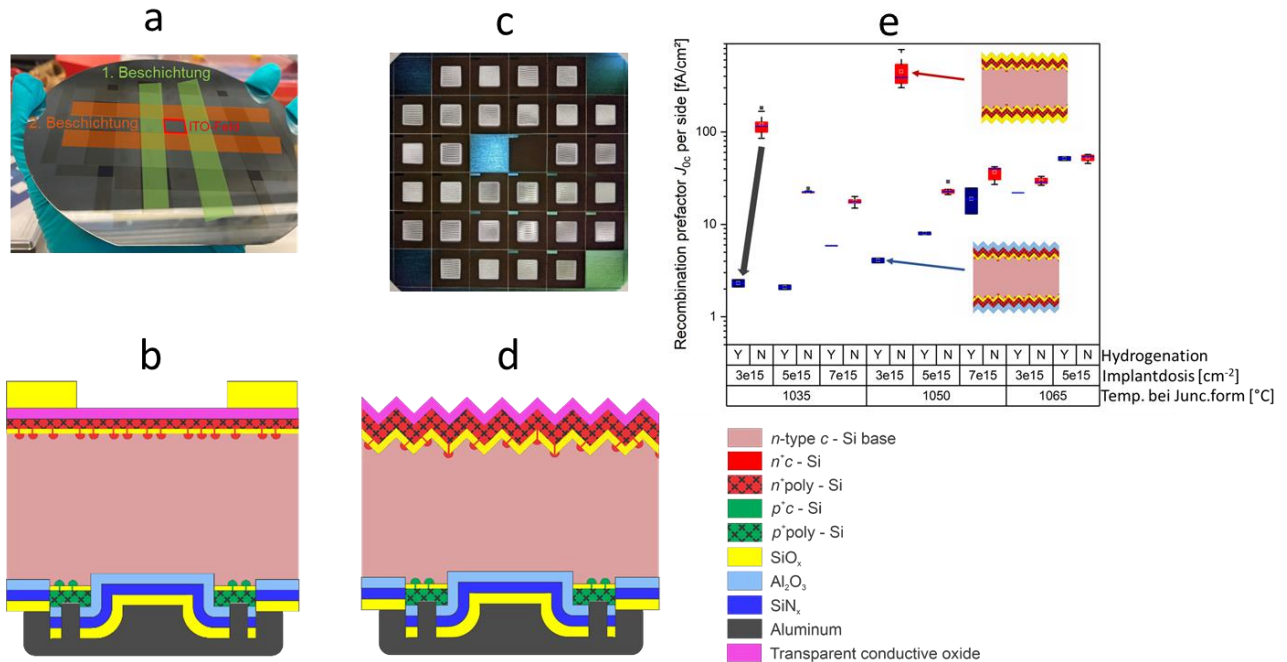


Abbildung 17: (a) Fotoaufnahme der Vorderseite und (b) schematischer Querschnitt der dritten Generation von 2T-Bottomsolarzellen mit polierter ITO-RJ-Vorderseite, (c) Fotoaufnahme der Vorderseite und (d) schematischer Querschnitt der dritten Generation von 2T-Bottomsolarzellen mit texturierter ITO-RJ-Vorderseite, (e) experimentell bestimmte Abhängigkeit des Rekombinationsvorfaktors J_{0c} von der Implantationsdosis, der Temperatur bei der Junctionformierung und von der Hydrogenierung

Die 2T Bottomsolarzellen mit texturierter Vorderseite (Abbildung 17d) und einer anvisierten Poly-Si-Dicke (an der dünnsten Stelle) auf der Vorderseite von 20 nm erreicht nach Fertigstellung und Schneiden eine implizierte Pseudo-Effizienz bis zu 12,6% ($iV_{OC}=740\text{ mV}$, $ipFF=85,15\%$, $J_{Ph,assumed}=20\text{ m A/cm}^2$, Waferdicke: 150 μm).

2T-Tandemsolarzellen

(Details zur Tandemprozessierung und Tandemergebnisse sind im 27Plus6-Abschlussbericht zum Teilvorhaben vom KIT mit FKZ 03EE1056B zu finden)

Am KIT wurden auf das ITO auf der Vorderseite der 2T Bottomsolarzellen mit polierter Vorderseite entweder einer 5 nm dicken NiO_x-Schicht gesputtert und anschließend 2PACZ als Hole Transport Layer (HTL) abgeschieden oder 2PACZ direkt auf das ITO deponiert. Anschließend wurde der Triple-Cation-Perowskit CsMaFaPbI₃Br mit einer Bandlücke von 1.68 eV und eine Electron Transport Layer (ETL) auf Basis von (LiF,) C60 und SnO_x, und Indiumzinkoxid (IZO)/Ag als Frontkontakt abgeschieden. Mit einer optimierten MgF-Antirefektionsschicht konnte eine Tandemsolarzelle mit NiO_x-Schicht mit einem Wirkungsgrad bis ca. 24% und ohne NiO_x-Schicht von mehr als 27% erreicht werden. Die geringere Effizienz des Tandems mit NiO_x wird vor allem durch ein geringeres V_{OC} und J_{SC} verursacht. Der J_{SC} -Verlust stammt höchstwahrscheinlich von der parasitären Absorption im NiO_x und das geringere V_{OC} spiegelt den Schaden am nPOLO-Frontkontakt durch den NiO_x-

Sputterprozess wieder. Auf Lebensdauerproben konnte auf einen Verlust von min. 40 mV durch den Sputterschaden geschlossen werden, welcher auf Lebensdauerproben durch Tempern bei 250-300°C ausgeheilt werden konnte. Im Tandem wurde das NiO_x oder die Grenzfläche durch das Tempern nach dem Sputterprozess jedoch so verändert, dass ein hoher Serienwiderstand beobachtet wurde, weshalb der Sputterschaden nicht einfach ausgeheilt werden konnte.

Im Anschlussexperiment auf den polierten Bottomsolarzellen wurde der Wirkungsgrad des Tandems sogar auf 30.4% aus der MPP-Tracking-Messung bzw. 31.2% aus der J - V -Messung erhöht werden. Nach Korrektur des Kurzschlussstroms mit Hilfe der Quanteneffizienz-Messung, ergab sich eine Effizienz von 28.5% aus der MPP-Tracking-Messung bzw. 29.1% aus der J - V -Messung.

Auf die 2T Bottomsolarzellen mit texturierter ITO-RJ-Vorderseite wurde eine Topzelle mit dem Schichtstapel $\text{NiO}_x/2\text{PACz}/\text{Triple-Cation-Perovskite}/\text{C60}/\text{SnO}_2/\text{IZO}/\text{MgF}_2$ abgeschieden und ein Wirkungsgrad von 27,6% ($V_{\text{OC}}=1,840\text{V}$, $\text{FF}=74\%$, $J_{\text{SC}}=20.2\text{m A/cm}^2$) erreicht.

2.1.7 Entwicklung und Evaluation eines industriellen Trockenätzverfahrens zur einseitigen Entfernung von Siliziumoxid auf POLO-Kontakten

Am Übergang zwischen Topsolarzelle und Bottomsolarzelle wird eine niederohmiger Kontakt benötigt, um Bottom- und Topsolarzelle elektrisch gut anzubinden. Häufig wird ein transparentes leitfähiges Metalloxid (TCO) – meistens ITO (Indiumzinnoxid) – am Übergang zur Perowskitesolarzelle bevorzugt u.a. wegen der Möglichkeit ein Self-Assembled Monolayer (SAM) als Löcher-sammelnden Kontakt zu verwenden. Bei der Verwendung von n POLO-Kontakten als Elektronen-sammelnden Kontakt auf der Vorderseite der Bottomsolarzelle kommt es jedoch zur Oxidation der Polysiliziumschicht z.B. durch natives Wachstum an Luft und damit zur Bildung einer vermeidlich Widerstandserhöhenden SiO_x -Schicht. Aus diesem Grund wird vor der Abscheidung einer ITO-Schicht auf den POLO-Kontakt typischerweise für Laborsolarzellen ein einseitiges nasschemisches Ätzen in verdünnter Flusssäure durchgeführt. Dieser Ätzschritt ist jedoch mit dem Risiko verbunden, Partikelkontamination auf dem POLO-Kontakt zu hinterlassen, welche bei der anschließenden ITO-Abscheidung vergraben werden und bei der weiteren Prozessierung zu Tandemsolarzellen massive Schwierigkeiten verursachen können.

Eine elegante Möglichkeit das SiO_x (und ggf. andere Schichten) auf der Oberfläche des POLO-Kontaktes vor der TCO-Abscheidung zu entfernen, stellt das Insitu-Trockenätzenverfahren dar, welches im Rahmen dieses Vorhabens beim assoziierten Partner VON ARDENNE GmbH entwickelt und am ISFH evaluiert wurde.

Das Trockenätzverfahren wird in einer industriellen Vakuumanlage in Plasma-Atmosphäre durchgeführt wie sie zur Abscheidung von TCO-Schichten Verwendung finden würde, so dass das Trockenätzen direkt vor der TCO-Abscheidung in einer vorgeschalteten Kammer durchgeführt werden könnte. Die detaillierte Prozessentwicklung des Trockenätzprozesses fand – mit insgesamt vier Feedback-Schleifen vom ISFH – beim assoziierten Partner VON ARDENNE GmbH statt. Abbildung 18(a) zeigt den schematischen Querschnitt der symmetrischen, texturierten n POLO-Lebensdauerproben, die für die Untersuchung einer potentiellen Lebensdauerdegradation durch das Trockenätzen hergestellt wurden. Der Herstellungsprozess der Lebensdauerproben folgt dem Herstellungsprozess für die o.g. Bottomsolarzellen: Auf einem texturierten M2 n -Typ-Wafer mit einer Dicke von ca. 160 μm und einer Waferohmigkeit von 2,9 Ωcm wurde ein trockenes Grenzflächenoxid gewachsen, anschließend unter intrinsischem LPCVD a -Si vergraben, mittels Ionenimplantation mit Phosphor dotiert und in einem Hochtemperaturprozess mit anschließender

feuchter Oxidation zu POLO-Kontakten geformt. Das gewachsene SiO_2 wurde in HF entfernt und das 110-nm-dicke Poly-Si in Ammoniak-Wasserstoffperoxid-Lösung (RCA) auf ca. 40-50 nm abgedünnt. Anschließend wurde der POLO-Kontakt mittels Tempens mit einer 10-nm-dicken Al_2O_3 -Schicht auf dem POLO-Kontakt hydrogeniert und die Al_2O_3 -Schicht anschließend entfernt. Der POLO-Kontakt wies in diesem Stadium eine Rekombinationsvorfaktor von 5-7 fA/cm^2 je Seite und eine Ladungsträgerlebensdauer von $3995 \pm 966 \mu\text{s}$ bei einer Überschussladungsträgerdichte von $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ auf. In diesem Zustand wurden die Lebensdauerproben an den assoziierten Partner VON ARDENNE GmbH verschickt. Bei der VON ARDENNE GmbH wurden die Proben beidseitig mittels Trockenätzen mit Parametersatz 1-5 behandelt und anschließend am ISFH untersucht. Dabei war die Zielätztiefe auf einer SiO_2 -Referenz auf 5 nm kalibriert worden. Während die unbehandelte Lebensdauerprobe (mit Transportreferenz bzw. Parametersatz 0 gekennzeichnet) nach Rückversand ans ISFH keine signifikante Lebensdauerdegradation zeigte, degradierten die mit Parametersatz 1 bis 5 behandelten Lebensdauerproben auf weniger als 10 μs . Durch das Tempern bei 300°C für 30 Min. letztgenannter Proben konnte die Lebensdauer auf über 100 μs für Parametersatz 1 und geringere Lebensdauern für die anderen Proben regeneriert werden.

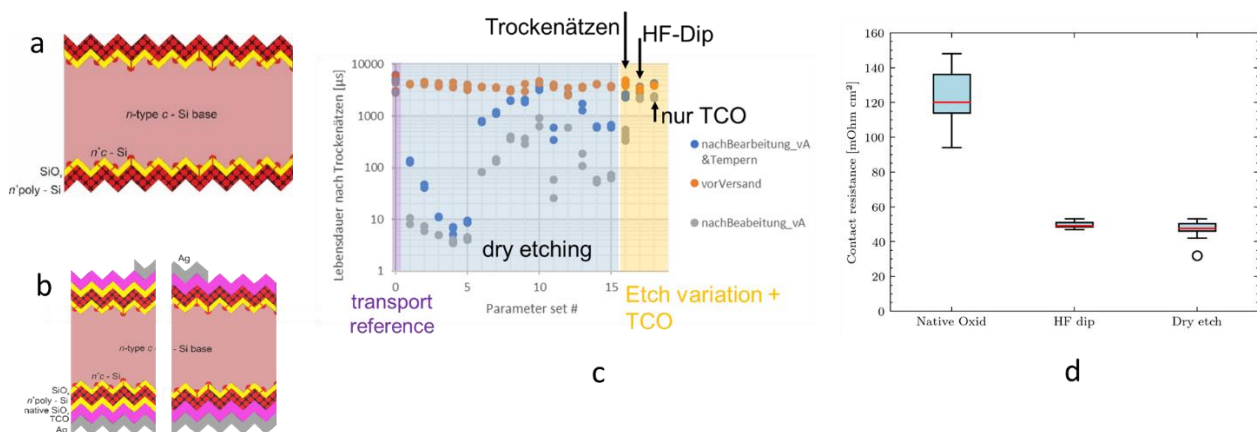


Abbildung 18: (a) Schematischer Querschnitt der symmetrischen, texturierten nPOLO-Lebensdauerproben zur Untersuchung des induzierten Schadens durch den Ätzprozess, (b) Schematisches Querschnitt der Kontaktwiderstandsproben mit nativem SiO_x und nach Entfernung des SiO_x , (c) Ladungsträgerlebensdauer der nPOLO-Lebensdauerproben vor Versand (orange), nach Bearbeitung bei VON ARDENNE (grau) und nach Bearbeitung bei VON ARDENNE und Tempern (blau), (d) Kontaktwiderstand.

In der zweiten Trockenätzversuchsreihe wurde auf die Erkenntnisse aufgebaut und weitere Parametersätze (6 bis 11) getestet, wobei die Zielätztiefe auf 1 nm, 1,5 nm und 3 nm reduziert wurde. Nach Rückversand, wiesen die Lebensdauerproben deutlich höhere Lebensdauern auf als in der ersten Versuchsreihe – bis zu 900 μs für Parametersatz 10. Nach Tempern wurde wie in der ersten Versuchsreihe eine weitere wesentliche Verbesserung der Lebensdauer erzielt, so dass alle Proben - außer diejenigen mit Parametersatz 6 und 11 – eine Lebensdauer jenseits von 1 ms aufwiesen. Die Lebensdauerproben mit Parametersatz 10 erreichten sogar eine Lebensdauer von 3.6 ms im Vergleich zu 4.7 ms vor Versand zur VON ARDENNE GmbH. Die Passivierungsqualität mit 6 fA/cm^2 je Seite entsprach dem Zustand vor Versand. Der geringe Lebensdauerunterschied wird durch eine geringere Volumenlebensdauer von 12 ms statt >20 ms vor Versand zur VON ARDENNE GmbH verursacht, die auf eine marginale Verunreinigung entweder im Ätzprozess oder beim Tempern zurückzuführen ist. Zusammenfassend hat die VON ARDENNE GmbH einen Trockenätzprozess entwickelt, welcher das Entfernen von parasitären, isolierenden SiO_x -Schichten

in-situ vor der Abscheidung einer gesputterten Metalloxid-Schicht (z.B. TCO oder auch NiO_x als Löcher-sammelnde Kontaktschicht) ohne irreparablen Schaden erlaubt. Der Tempervorgang wird bisher ohnehin benötigt, um den Sputterschaden nach der TCO-Abscheidung zu regenerieren. In einer dritten Versuchsreihe (Parametersatz 12 bis 15) wurden die Trockenätzexperimente aus der zweiten Versuchsreihe reproduziert und verfeinert. Parametersatz 12 zeigte ähnliche Ergebnisse wie Parametersatz 10 und bestätigt damit, dass mit dem Trockenätzverfahren eine Schadensfreien Entfernung der SiO_x -Schicht möglich ist.

In einer finalen vierten Versuchsreihe wurde das Trockenätzen (Parametersatz 16) mit der laborartigen Entfernung mittels HF (Parametersatz 17) und der Nicht-Entfernung (Parametersatz 18) verglichen, wobei auf den POLO-Kontakt nach der Vorbehandlung der Oberfläche mittels Trockenätzen bzw. HF oder Nicht-Vorbehandlung eine TCO-Schicht als Kontakt aufgesputtert wurde. Die Lebensdauer der unbehandelten und mit TCO beschichteten POLO-Probe (nur TCO in Abbildung 18 (c)) sankt von ca. 3,8 – 4 ms auf 2.2 – 2.4 ms und spiegelt den reinen Sputterschaden des TCO-Prozesses wieder, welcher durch die geeignete Wahl des Prozesses relativ gering ausfällt. Die Lebensdauer der HF-vorbehandelten Probe zeigt eine ähnliche Tendenz und bestätigt die Erwartung/Erfahrung einer schadensfreien Entfernung mittels HF. Das Trockenätzen (zusammen mit dem TCO-Sputtern) induziert wie bei den Versuchsreihen 2 und 3 gezeigt nach dem Ätzen einen Schaden und führt zur Abnahme der Lebensdauer auf 340 bis 550 μs . Der Sputterschaden wird durch das Tempern bei 300°C für 30 Min. vollständig ausgeheilt, jedoch erreicht die Proben mit dem Trockenätzprozess lediglich eine Lebensdauer von ca. 2 ms statt dem Ursprungswert von 4 ms wie vor Versand.

Um den Einfluss der Vorbehandlung auf die elektrischen Eigenschaften beurteilen zu können, wurden die Proben aus der vierten Versuchsreihe mit Silberkontakten versehen (Abbildung 18 (b)) und der Kontaktwiderstand mittels der Methode nach Cox & Strack bestimmt. Abbildung 18 (d) zeigt die Kontaktwiderstandswerte der unterschiedlich vorbehandelten Proben. Die Proben mit der Vorbehandlung mittels Trockenätzen und HF-Ätzen erreichen ähnliche Kontaktwiderstände von ca. 30 bis 50 $\text{m}\Omega\text{cm}^2$ und bestätigen, dass das Trockenätzen die parasitäre SiO_x -Schicht ähnlich gut entfernt wie HF. Die Kontaktwiderstände der unbehandelten Proben mit nativer SiO_x -Schicht weisen 2- bis 5-fach höhere Kontaktwiderstände von 110 bis 150 $\text{m}\Omega\text{cm}^2$ auf und deuten auf einen signifikanten Effekt der parasitären Schicht bereits beim $n\text{POLO}/\text{TCO}$ -Übergang hin. Dieser Effekt kann erwartungsgemäß bei einem direkten Übergang vom $n\text{POLO}$ -Kontakt zu einem Löcher-sammelnden Kontakt z.B. NiO_x stärker ausgeprägt sein und zu signifikanten Verlusten führen.

Zur Evaluation des entwickelten Trockenätzprozesses und des TCOs von der VON ARDENNE GmbH in einer Tandemsolarzelle wie in Abbildung 19 (a) wurden 2T Bottomsolarzellen mit einem texturierten $n\text{POLO}$ -Kontakt auf der Vorderseite hergestellt und vor der Al-Aufdampfung an die VON ARDENNE GmbH verschickt. Wie bei der vierten Versuchsreihe wurde das native SiO_x auf der Vorderseite der Bottomsolarzellen entweder nicht entfernt oder mittel HF oder Trockenätzen entfernt und anschließend mit einer TCO-Schicht versehen. Nach Rückversand wurden die Bottomsolarzellen wie die Lebensdauerproben getempert und anschließend mit einer Al-Rückkontakt versehen. Vor dem Versand an das KIT wurde die injektionsabhängige Lebensdauer mit Hilfe des Infrared Lifetime Mappings vermessen und die implizierten Pseudo-Effizienzen der drei Bottomzellvarianten bestimmt, wobei alle drei Varianten auf einem M2 Wafer hergestellt wurden und jeweils jede Dritte Solarzelle eine Variante darstellt.

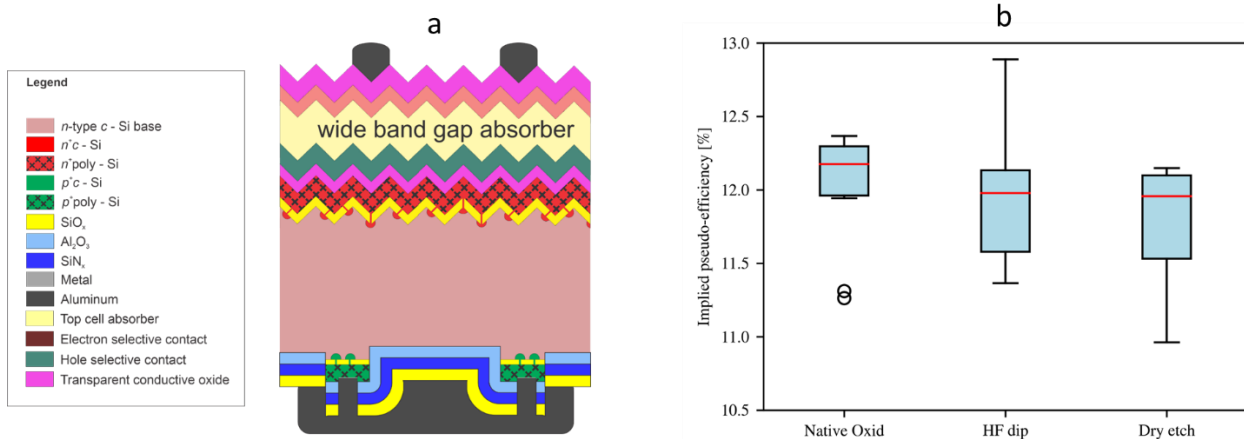


Abbildung 19: (a) Schematischer Querschnitt der anvisierten 2T Pk/Si-Tandemsolarzelle, (b) Vergleich der implizierten Pseudo-Effizienzen der Bottomsolarzellen vor dem Versand zum KIT mit nativem SiO_x , mit HF-Entfernung und Trockenätzen der nativen SiO_x -Schicht.

Die Bottomsolarzelle mit dem nativen SiO_x an der Grenzfläche weist eine mittlere implizierte Pseudo-Effizienz von 12.02%, die HF-Variante 11.95% und die Trockenätzvariante 11.76% bei einer angenommenen Fotogeneration von 20 mA/cm^2 auf. Damit sind alle drei Varianten vom Rekombinationsverhalten auf ähnlichem Niveau und wir erwarten vergleichbare Tandemsolarzellen-Effizienzen. Die Fertigstellung der Tandemsolarzellen befindet zum Zeitpunkt der Berichtserstellung beim KIT in der Fertigstellung und wird an geeigneter Stelle publiziert.

2.1.8 Entwicklung und Charakterisierung der p^+n^+ Poly-Si-Tunneldioden

In AP2.1 wurde am LPCVD-Ofen des ISFH der Abscheideprozess für in-situ-dotiertes p^+ Poly-Si etabliert, p^+n^+ poly-Si Tunneldioden hergestellt und die elektrischen und optischen Eigenschaften vermessen. Es konnte ein abrupter p^+n^+ Übergang mit Ladungsträger-Konzentrationen jenseits von $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ am p^+n^+ Übergang (Abbildung 20a) und einem spezifischen Widerstand der Tunneldiode von ca. 10 $\text{m}\Omega \text{cm}^2$ mittels der Teststruktur in Abbildung 20b nachgewiesen werden. Dabei wurde mit Hilfe von dicken p^+ Poly-Si-Schichten und Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahmen (Abbildung 20c) sichergestellt, dass der aufgedampfte Al-Kontakt lediglich die p^+ Poly-Si-Schicht kontaktiert und nicht zur n^+ Poly-Si-Schicht durchdringt und damit die elektrischen Eigenschaften der Tunneldiode vermessen werden. Der bestimmte spezifische Widerstand wird die Tandemsolarzelle elektrisch nicht limitieren. Zusätzlich wurden die optischen Eigenschaften der in-situ-dotiertes p^+ Poly-Si-Schicht mittels spektraler Ellipsometrie ermittelt (Abbildung 20d,e). Durch die hohe Ladungsträgerkonzentration in der Schicht kann bei hohen Wellenlängen eine starke Absorption durch freie Ladungsträger beobachtet werden. Jedoch ist die Absorption um einen Faktor 3-4 höher als die Superposition der Daten von undotiertem, rekristallisiertem Poly-Si-Schichten mit einem Modell für Freie-Ladungsträger-Absorption vorhersagt. Der Extinktionskoeffizient für das als Saatschicht am ISFH verwendete ITO weist bei 1100 nm einen Wert von 0.046 im Vergleich zu 0.037 für die p^+ Poly-Si-Schicht auf. Daher sind möglichst dünne p^+ Poly-Si-Schichten oder ein direkter Kontakt zwischen HTL und n^+ poly-Si des nPOLO-Kontaktes vorzuziehen.

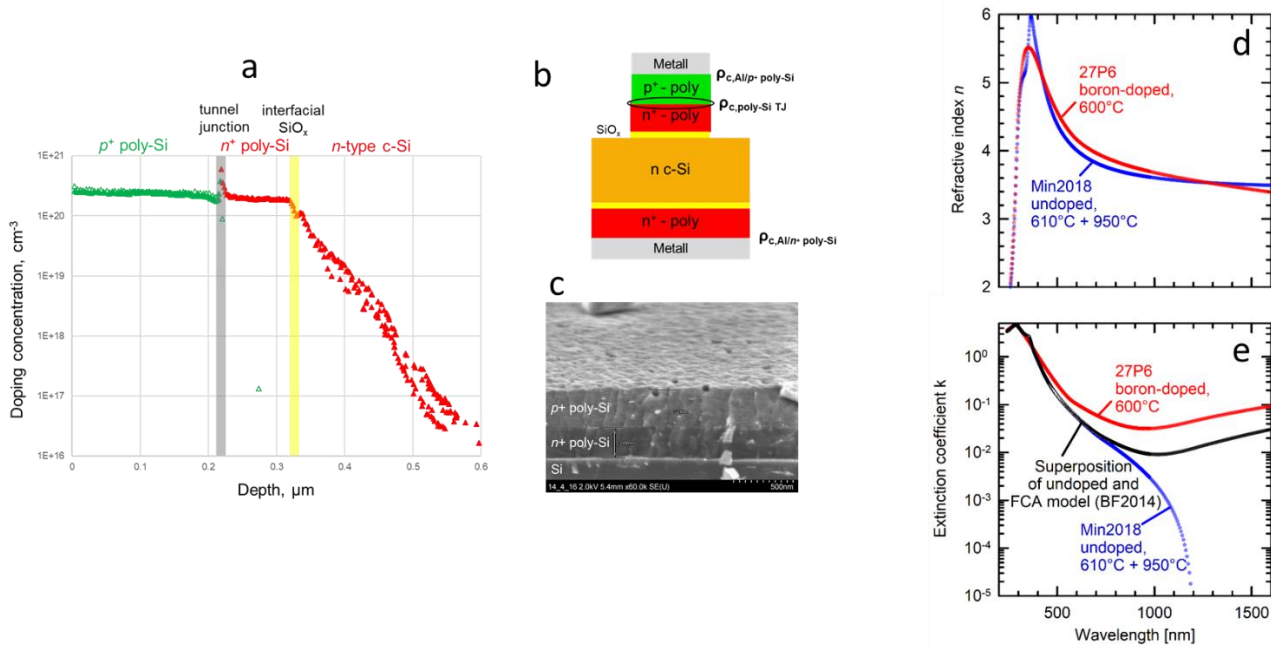


Abbildung 20: (a) Mittels elektrochemische Kapazitäts-Spannungsmessung bestimmtes Dotierprofil einer p⁺n⁺ Poly-Si-Tunnel diode, (b) schematischer Querschnitt der Kontaktwiderstandsprobe zur Bestimmung des elektrischen Widerstands der Tunnel diode, (c) Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahme des Querschnitts einer p⁺n⁺ Poly-Si-Tunnel diode nach Al-Aufdampfen und anschließendem Al-Ätzen, (d) Brechungsindex und Extinktionskoeffizient der in-situ dotierten p⁺ Poly-Si-Schichten im Vergleich zu undotierten Schichten

2.1.9 Entwicklung von Perowskit-Solarzellen am ISFH

Es wurden zu Beginn des Projekts vergleichsweise einfache Perowskit-Zusammensetzungen gewählt, um das Verhalten der Loch- und Elektronentransportschichten (HTL bzw. ETL), die mittels Verdampfungsprozessen abgeschieden werden sollten, zu evaluieren. Aus diesem Grund wurden Perowskit-Solarzellen basierend auf CH₃NH₃PbI₃ hergestellt. Der Perowskit wurde dabei mittels Ko-Verdampfung von PbI₂ und MAI (Methylammonium: CH₃NH₃I) aus zwei Quellen auf die zu beschichtenden Substrate abgeschieden. Für dieses Vorhaben wurden eine Vakuumverdampfungsanlage vom Typ MiniSpectros für die Perowskit- und Transportschichten (spiro-TTB, C60, BCP, siehe Abbildung 21) sowie eine Vakuumverdampfungsanlage vom Typ Nano36 für die Elektroden eingesetzt. Beide Anlagen stammen von der Firma Kurt J. Lesker und ermöglichten die Herstellung der Proben in einer inerten N₂-Atmosphäre unter Ausschluss von O₂ und H₂O. Hierbei konnten Einfachsolarzellen vollständig mittels Vakuumprozessierung der Schichtreihenfolge ITO/spiro-TTB/CH₃NH₃PbI₃/C60/BCP/Cu hergestellt werden. Diese erreichten Wirkungsgrade von bis zu η = 17 %. Höhere Effizienzen (η = 18,5 %) konnten erzielt werden, wenn statt des aufgedampften spiro-TTBs, nasschemisch aufgeschleuderte Lochleiter, wie MeO-2PACz verwendet wurden, welche sog. Self-assembled Monolayers (SAMs) auf den mit ITO beschichteten Glassubstraten bilden.

Im Weiteren wurde der Ko-Verdampfungsprozess von Formamidinium-basierten (FA) Perowskiten untersucht, da alle nasschemisch hergestellten Topzellabsorber von hocheffizienten Tandemzellen FA enthalten. Das Ziel der Untersuchung war im ersten Schritt eine gute Ratenkontrolle für FAI zu erzielen, da das Ko aufdampfen von MAPbI₃ gezeigt hatte, dass sich die Rate von MAI nur schwer

kotrollieren ließ. Die Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit zwischen den Projekten 27plus6 und P3T durchgeführt. Die detaillierte Beschreibung der Ergebnisse zur FAPbI_3 und einem Prozess mit drei Quellen (CsBr , FAI , PbI_2) zur Herstellung von Multi-Kationen-Multi-Anionen-Perowskiten ist im Abschlussbericht von P3T-Projekt (FKZ 03EE1017B, Tandemintegration von koverdampften Perowskit-Solarzellen auf texturierten POLO-PERC Bottomsolarzellen) zu finden.

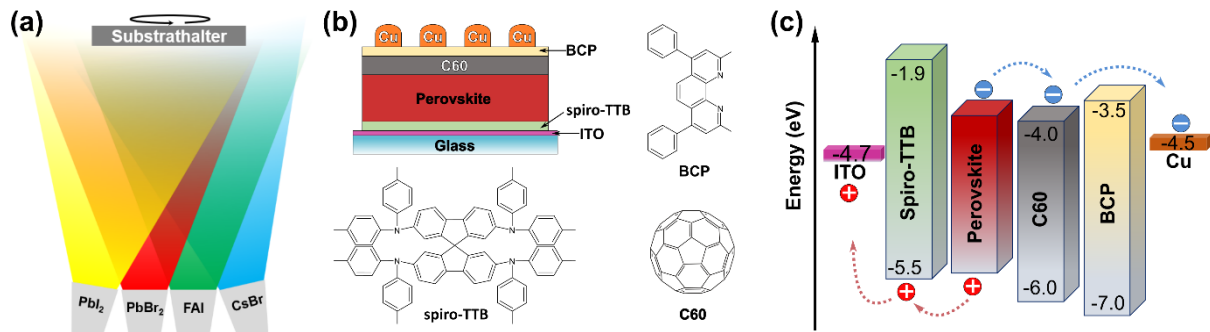


Abbildung 21: (a) Schematische Darstellung des Ko-Verdampfungsprozesses mit vier Quellen, (b) Strukturen der Solarzelle und der als Transportmaterial verwendeten Chemikalien sowie (c) relevante Energieniveaus der verschiedenen Schichten

Um die Zusammensetzung des Multi-Kationen-Multi-Anionen-Absorber noch feiner einstellen zu können, wurde ein Herstellungsprozess mit 4 Quellen entwickelt.

Es wurde ein DoE-Vorgehen basierend auf vier verschiedenen Verdampfungsquellen in einem Ko-Verdampfungsverfahren vorgenommen (siehe Abbildung 21). Insgesamt wurden die vier verschiedenen Quellen für die Ko-Verdampfung des Perowskiten mit PbBr_2 , PbI_2 , CsBr und FAI beladen, sodass es möglich war, insbesondere den Br-Anteil und Cs-Anteil unabhängig voneinander zu variieren, was bei einem Ko-Verdampfungsprozess mit einer geringeren Anzahl an Quellen nicht möglich ist. Folgende Randbedingungen wurden für das DoE festgesetzt, wobei n die Stoffmenge ist:

$$0.05 < \frac{n[\text{CsBr}]}{n[\text{CsBr}] + n[\text{FAI}]} < 0.5, \quad (1)$$

$$0.75 < \frac{n[\text{CsBr}] + n[\text{FAI}]}{n[\text{PbI}_2] + n[\text{PbBr}_2]} < 1.25, \quad (2)$$

$$2.5 < \frac{n[\text{CsBr}] + n[\text{FAI}] + 2n[\text{PbBr}_2] + 2n[\text{PbI}_2]}{2n[\text{PbI}_2] + 2n[\text{PbBr}_2]} < 3.5, \quad (3)$$

$$0.05 < \frac{n[\text{CsBr}] + 2n[\text{PbBr}_2]}{n[\text{FAI}] + 2n[\text{PbI}_2] + n[\text{CsBr}] + 2n[\text{PbBr}_2]} < 0.4, \quad (4)$$

$$1.64 < 1.5 + 0.23 \frac{n[\text{CsBr}]}{n[\text{FAI}] + n[\text{CsBr}]} + 0.57 \frac{n[\text{CsBr}] + 2n[\text{PbBr}_2]}{n[\text{FAI}] + 2n[\text{PbI}_2] + n[\text{CsBr}] + 2n[\text{PbBr}_2]} < 1.72. \quad (5)$$

Die fünf oben aufgelisteten Gleichungen legen die Variation für den Cs-Anteil im Bezug zur A-Position im Perowskiten (Gl. 1), den A/B-Anteil (Gl. 2), den X/B-Anteil (Gl. 3) sowie den Br-Anteil (Gl. 4) fest. Darüber hinaus wurde Gl. 5 verwendet, um die Bandlücke des resultierenden Perowskiten auf Basis empirischer Werte auf einen für Tandemsolarzellen relevant Bereich zu beschränken [98]. Ferner wurden die Ratenbereiche der Rate r während des Ko-Verdampfungsprozesses für die verschiedenen Edukte in einem Bereich von $r[\text{PbBr}_2] = 0.03 - 1 \text{ Å/s}$, $r[\text{PbI}_2] = 3 \text{ Å/s}$, $r[\text{CsBr}] = 0.1 - 1.5 \text{ Å/s}$ und $r[\text{FAI}] = 0.1 - 2.5 \text{ Å/s}$ gehalten, um zum einen das Zersetzen der Edukte bei zu hohen Raten zu

vermeiden und zum anderen den Einfluss von Messungenauigkeiten auf die Zusammensetzung des Perowskiten, die vor allem bei sehr geringen Raten auftreten, zu minimieren.

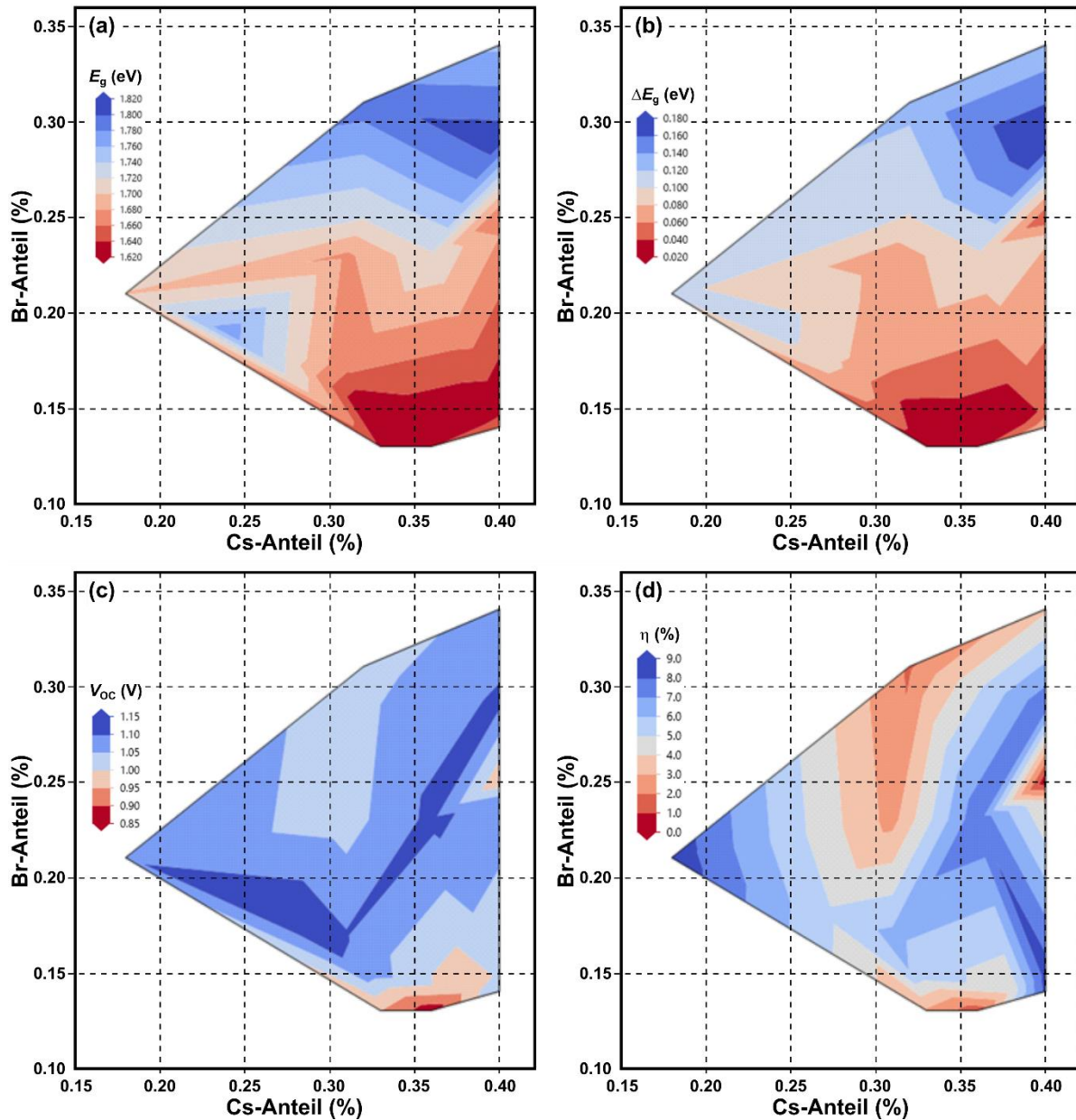


Abbildung 22: Übersicht der Ergebnisse des vier Quellen basierten DoEs. (a) Mittels PL bestimmte Bandlücke E_g , (b) nach 60 Minuten Dauerbeleuchtung beobachtete Rotverschiebung der Bandlücke ΔE_g , (c) offene Klemmspannung V_{OC} und (d) Solarzelleffizienz η in Abhängigkeit des Br- und Cs-Anteils der Perowskitschicht.

Im Allgemeinen konnte anhand des DoE festgestellt werden, dass mit einer Erhöhung des Br-Anteils eine Vergrößerung der Bandlücke E_g einhergeht, während der Cs-Anteil nur einen geringen Einfluss auf die Bandlücke hat (Abbildung 22(a)). Die Bestimmung der Bandlücken E_g erfolgte mittels PL-Spektroskopie. Diese Ergebnisse decken sich mit den in der Literatur gemachten Angaben. Ferner konnte anhand von zeitabhängigen PL-Messungen eine Rotverschiebung der Bandlücke von bis zu ca. 200 meV nach 60 Minuten Dauerbeleuchtung gemessen werden, speziell bei Zusammensetzungen mit erhöhtem Br-Anteil (Abbildung 22(b)). Dies spricht dafür, dass diese

Rotverschiebungen auf einen Phasensegregationsprozess innerhalb der Perowskitschicht zurückzuführen sind, was ebenfalls bereits in der Literatur diskutiert worden ist [99]. Neben den Perowskitschichten, die für die PL-Messungen angefertigt wurden, sind ebenfalls Einfachsolarzellen fertiggestellt worden. Hierbei hat sich ergeben, dass sich der oben beschriebene Zusammenhang zwischen der Bandlücke und dem Br-Anteil nur in deutlich abgeschwächter Form bei den Werten der offenen Klemmspannung V_{OC} widerspiegelt (Abbildung 22(c)). Hingegen konnten durch das DoE keine abschließenden Aussagen zur Erhöhung der Solarzelleffizienz η getroffen werden, da in diesem Fall keine Zusammenhänge zwischen Zusammensetzung und Effizienz ersichtlich waren (Abbildung 22(d)). Hierbei dürften andere Verlustprozesse, die unabhängig von der Zusammensetzung der Perowskitschicht auftreten, ausschlaggebend gewesen sein, wie etwa der Einfluss des Serien- und Shunt-Widerstandes.

2.1.10 Entwicklung von Tandemsolarzellen am ISFH

Die am ISFH fertig gestellten Silizium-Bottomsolarzellen wurden auch am ISFH zu Silizium-Perowskit Tandemsolarzellen fertig gestellt. Im Gegensatz zu den 2T/3T-Bottomsolarzellen aus den vorherigen Beschreibungen (Kapitel 2.1.4 & 2.1.6), wurden die folgenden Bottomsolarzellen auf lediglich eine chemisch nachpolierten Oberfläche hergestellt. Die Nachpolitur der Industrietypischen schadensgeätzten, sägerauen Oberfläche ist nötig, damit die dünne Perowskitschicht beim Spin-Coating-Prozess eine geschlossene Schicht bildet. Andernfalls besteht ein erhöhtes Risiko für Kurzschlüsse.

Wie in Abbildung 23 gezeigt, besteht die Tandemsolarzelle aus einer Siliziumsolarzelle aus n -Typ Silizium mit einem $Al-p^+$ Emitter auf der Rückseite und einem $nPOLO$ -Kontakt auf der Vorderseite. Als Rekombinationsschicht wird eine ITO Schicht gesputtert. Die Perowskitsolarzelle besteht aus einem MeO_2PACs Lochkontakt, der mit einer Lackschleuder aufgebracht wird. Nach einem Tempersschritt von $100^\circ C$ und 10 min wird ein Triple-Cation Absorber [100] wieder mittels einer Lackschleuder aufgebracht und die Lösungsmittel mit Ethylacetat verdrängt. Es folgt eine Aufdampfung des ETLs mit 23 nm C_{60} und 4 nm BCP. Darauf wird direkt die transparente und leitfähige Frontelektrode IZO gesputtert. Die Schichtdicke wurde auf 40 nm reduziert, um die parasitäre Absorption zu verringern. Dieser Prozess wurde so optimiert, dass er die darunter liegenden Schichten nicht schädigt [101]. Als Abschluss wurde ein Silberkontakt aufgedampft und eine MgF -Antirefektionsschicht aufgedampft. Im Randbereich wurde die Zelle mit aufgedampftem Silber kontaktiert, wie in Abbildung 23 zu sehen ist. Die 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 23 zeigt eine Photographie der fertiggestellten Tandemsolarzelle.

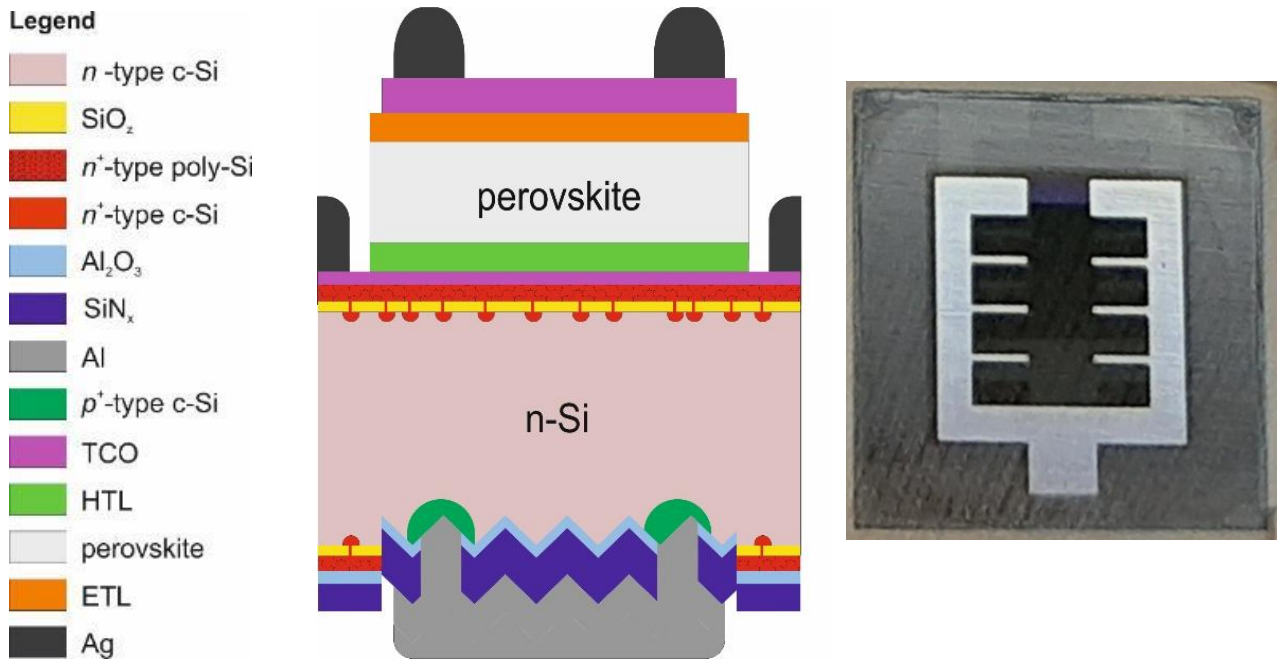


Abbildung 23: links: Schematischer Aufbau der am ISFH gefertigten Tandemsolarzelle, rechts: Fotografie der Vorderseite der Silizium/Perowskit Tandemsolarzelle. Die Si-Bottomzelle ist 2,5 x 2,5 cm² groß. Die aktive Tandemzelloberfläche innerhalb des Silberkontakts beträgt 1 cm²

Abbildung 24 zeigt die IV-Kennlinien der bisher besten vollständig am ISFH hergestellten Tandemsolarzelle. Der Kurzschlussstrom der Tandemsolarzelle beträgt ca. 19,3 mA/cm². Der Füllfaktor liegt bei 68,3%. Die Kennlinien zeigen praktisch keine Hysterese. Trotzdem ist der FF immer noch deutlich niedriger als erwartet. Die offene Klemmspannung beträgt 1698 mV. Die Effizienz der besten Tandemsolarzelle liegt bei 22,4%.

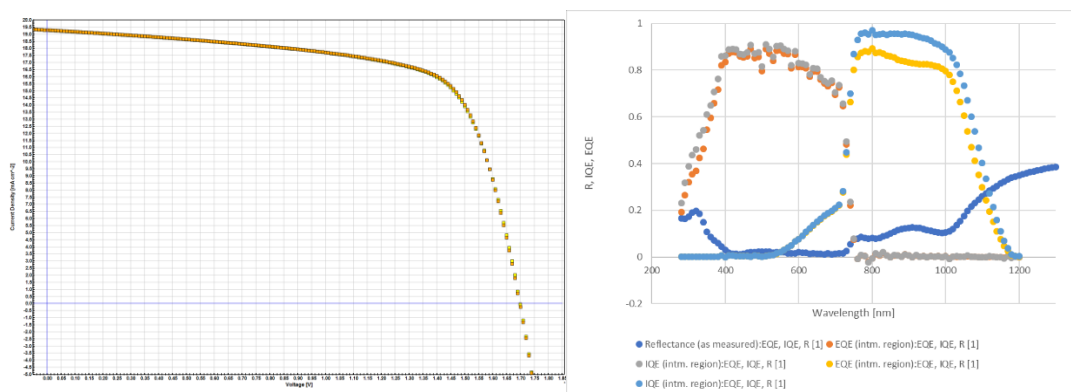


Abbildung 24: links: IV-Kennlinien der Tandemsolarzelle. Orange und gelb: Hellkennlinie vorwärts und rückwärts gemessen, rechts: Wellenlängenabhängige Reflektion und interne und externe Quanteneffizienz der Tandemsolarzelle und deren Aufteilung.

Abbildung 24 zeigt, die wellenlängenabhängige Reflektion, externe und interne Quanteneffizienz. Die Reflektion der Solarzelle beträgt bis zu einer Wellenlänge von 740 nm weniger als 3% und darüber ca. 10%. Die Quanteneffizienzanalyse der Tandemsolarzelle zeigt, dass beide Zellen ihren Beitrag leisten. Die Perowskitsolarzelle hat eine Quanteneffizienz von ca. 0,9 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 keine Kurzschlüsse in der Perowskitesolarzelle entstanden sind.

Die Effizienz der Tandemsolarzelle ist durch die Perowskitesolarzelle limitiert. Die offene Klemmspannung der Perowskitesinglejunction Solarzelle, welche zusammen mit der Tandemsolarzelle hergestellt wurde, beträgt ca. 1001 mV. Bei der Silizium-Bottomsolarzelle konnte mit $Sun\text{-}V_{OC}$ eine offene Klemmspannung von ca. 706 mV gemessen werden. Aus der Summe dieser beiden Spannungen ergibt sich eine offene Klemmspannung von max. 1707 mV. Diese Spannung ist nur 9 mV höher als die gemessenen offenen Klemmspannung der Tandemsolarzelle von max. 1698 mV. Es treten kaum Verluste am ITO/nPOLO-Kontakt auf.

2.1.11 Optimale Verschaltung von 3T-Tandemsolarzellen

Eine zentrale Fragestellung jeder Solarzellentwicklung ist die Verwendung im Modul. Im Gegensatz zu State-of-the-Art-Modulen mit Solarzellen mit lediglich zwei Anschlüssen, wirft die Verwendung einer 3T-Tandemsolarzelle im Modul neue Fragestellungen hinsichtlich der optimalen Verschaltung der Solarzellen auf. Diese Fragestellung wurde theoretisch und experimentell bearbeitet und die Ergebnisse in der renommierten Fachzeitschrift *Progress in Photovoltaics* veröffentlicht. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse als Auszüge aus dem ins Deutsche übersetzten Manuskript dargestellt. Die Literaturverweise aus dem Manuskript beziehen sich auf eine eigene Literaturliste, die direkt im Anschluss folgt.

Optimale Verschaltung von dreipoligen Tandem-Solarzellen

Henning Schulte-Huxel, Robert Witteck, Susanne Blankemeyer and Marc Köntges

1. Einleitung

Tandemsolarzellen mit Si-Bottomsolarzellen haben in den letzten Jahren großes Interesse geweckt, da sie es ermöglichen, den Wirkungsgrad konventioneller Si-Zellen deutlich zu erhöhen [1-3]. Der einfachste Weg, Tandem-Bauelemente in ein Modul zu integrieren, ist ein Stapel aus zwei in Reihe geschalteten Subzellen mit zwei Anschlüssen (2T) [4, 5], die ähnlich wie konventionelle Solarzellen in Reihe geschaltet werden. Dazu wird der hintere Kontakt einer Zelle mit dem vorderen Kontakt einer benachbarten Zelle verbunden. Dadurch entsteht ein Zellstrang mit zwei Kontakten, wie in Abbildung 25 a) dargestellt, der auf herkömmliche Weise integriert werden kann. Aufgrund der Serienschaltung der Teilzellen erfordert dieser Ansatz deren Stromanpassung, was bedeutet, dass die Bandlücken der Teilzellen in Bezug auf einander und die spezifischen Betriebsbedingungen optimiert werden müssen. Dies kann bei Outdoor-Betrieb mit unterschiedlichen Einstrahlungsspektren [5-8], unterschiedlichen Umgebungsbedingungen oder unterschiedlichen Degradationsraten der Subzellen eine Herausforderung darstellen. Dies kann vermieden werden, indem die beiden Teilzellen getrennt kontaktiert werden, was zu Solarzellen mit vier Anschlüssen (4T) führt, siehe Abbildung 25 b). Bei gestapelten Tandems erfordert dies zwei (zusätzliche) leitende Schichten, um die Anschlüsse einzeln zu kontaktieren, was mit optischen und elektrischen Verlusten verbunden ist [9, 10], sowie die getrennte Verarbeitung der Teilzellen und Teilzellstränge.

Als Alternative wurden 3T- Bauelemente entwickelt [5] und hergestellt [11, 12]. Ein gemeinsamer dritter Anschluss ermöglicht die Leistungsentnahme der einzelnen Subzellen und ermöglicht es den 3T-Zellen, genauso gut oder sogar besser als 4T-Bauelemente zu funktionieren [10, 13]. Außerdem

erfolgt die interne Verschaltung von oberer und unterer Subzelle monolithisch wie bei 2T-Tandems, ohne dass eine transparente laterale leitende Schicht erforderlich ist. Die meisten Forschungsarbeiten zu 3T-Tandems konzentrieren sich auf die Zellebene, doch bei der Integration der Bauelemente in Module und PV-Systeme müssen mehrere Aspekte berücksichtigt werden. 3T-Bauelemente können in verschiedenen Formen hergestellt werden, die sich nach der relativen Ausrichtung der p-n-Übergänge der Subzellen gruppieren lassen [14]. Ein Bauelement mit einem Tunnel- oder Rekombinationsübergang, bei dem beide Dioden die gleiche Ausrichtung in Bezug auf ihre Polarität haben und in Reihe geschaltet sind, wird als s-Typ 3T-Bauelement bezeichnet (siehe Abbildung 25 d). Dies erfordert eine Spannungsanpassung der Subzellen, wobei das Verhältnis m/n durch die gewählte Modulintegration definiert ist. Dies schränkt die Spannung ein und verringert den Wirkungsgrad im Vergleich zu einem unabhängigen Betrieb [5-7, 16]. Allerdings sind die Verluste aufgrund nicht optimaler Bandlückenkombinationen oder wechselnder Beleuchtungsspektren [5-7, 16] bei 3T-Bauelementen geringer als bei 2T-Bauelementen, da die Ströme der Subzellen unabhängig voneinander variieren können. Aufgrund der logarithmischen Abhängigkeit von Spannung und Beleuchtungsintensität ist ein spannungsangepasstes 3T-Tandem robuster gegenüber spektralen Schwankungen als ein stromangepasstes 2T-Tandem [5-7, 16]. Dies führt zu einer insgesamt höheren Energieausbeute, auch wenn Temperatureffekte berücksichtigt werden [6, 16-18]. Darüber hinaus kann bei 3T-Zellstrings das Stromverhältnis der oberen und unteren Zelle ohne große Verluste bei der Energieausbeute variieren [17]. Infolgedessen können 3T-Zellstrings aufgrund der Bifazialität zusätzliches Licht effizienter ernten als 2T-Geräte, was eine Steigerung der Energieausbeute ermöglicht.

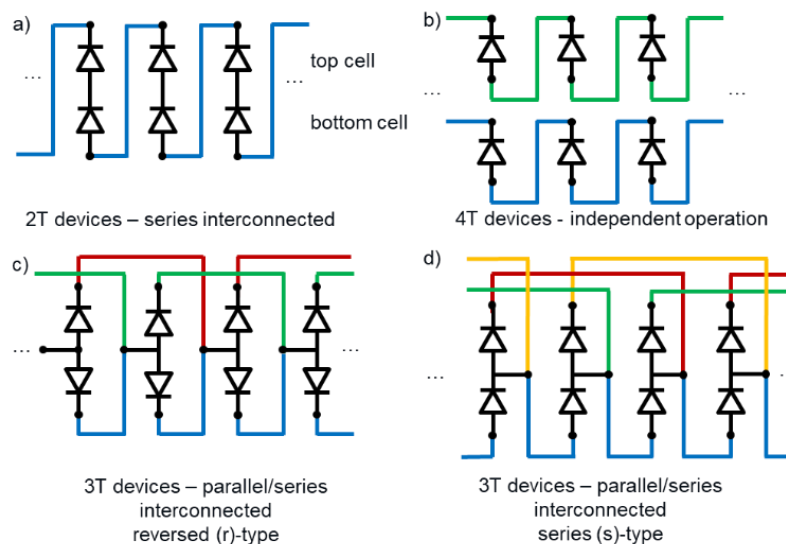


Abbildung 25: Veranschaulichung der Verschaltungsschemata von a) Zwei-Terminal- (2T), b) Vier-Terminal- (4T), c) R-Typ Drei-Terminal- (3T) und d) S-Typ 3T-Bauelementen. Bei den 3T-Bauelementen wird ein Spannungsverhältnis zwischen oberer und unterer Zelle von 2:1 angenommen. Die Schemata zeigen nur die mittleren Abschnitte eines Strings. Die farbigen Kanten zeigen die parallelen Pfade innerhalb des Strings.

Die Verschaltung von z. B. einer Topzelle parallel zu zwei Bottomzellen erfordert, dass die Anschlüsse eines 3T-Tandems nicht nur mit seinem nächsten Nachbarn, sondern auch mit seinem zweitnächsten Nachbarn kontaktiert werden (siehe Abbildung 25 c und d). Letzterer fehlt jedoch an den Stringenden, was zu Leistungsverlusten in der Größenordnung von mindestens einem 3T-

Bauelement führt, wie in ref.[5, 15]. Die Verluste an den Stringenden variieren mit der Anzahl der in Reihe und parallel geschalteten Zellen sowie mit der Konfiguration der Subzellen, d. h. ob die Subzellen in Reihe oder in umgekehrter Richtung geschaltet sind.

Neben den grundsätzlichen String-End-Verlusten für r- und s-Typ-Zellen sowie den verschiedenen String-Spannungsanpassungskonfigurationen sind verschiedene Aspekte der praktischen Modulintegration in der Literatur bisher nicht behandelt worden. Daher analysiert diese Arbeit die praktische Modulintegration von 3T-Zellen in Abhängigkeit von der Zellkonfiguration. Wir konzentrieren uns auf 2:1 spannungsangepasste Zellen, da diese im Allgemeinen die geringsten String-End-Verluste aufweisen [5, 15]. Darüber hinaus analysieren wir die String-End-Verluste im Hinblick auf nicht-ideal spannungsangepasste Unterzellen von der Teilstring- bis zur Systemebene. Darüber hinaus stellen wir zum ersten Mal ein Bypass-Diodenkonzept für einen String mit 3T-Zellen vor, um partielle Abschattungsverluste und Vorspannungsschäden zu vermindern.

2. Modellparameter und experimentelle Überprüfung

Zelldesign

In dieser Studie konzentrieren wir uns auf die r- und s-Typ-Zellenkonfiguration mit einem Spannungsverhältnis für die obere Zellspannung V_{top} und die untere Zellspannung V_{bot} von 2:1, d. h. $V_{top} = 2 \times V_{bot}$, wenn sie im Zellstrang verschaltet sind. Eine typische Materialkombination für monolithische Bauelemente, die ein solches Spannungsverhältnis ermöglicht, ist z. B. ein Perowskit/Silizium-Tandem [12]. Höhere Spannungsverhältnisse sind aus verschiedenen Gründen weniger vorteilhaft [5, 6, 15], wie im Folgenden noch erläutert wird. Abbildung 26 zeigt beide Zellkonfigurationen, wobei a) die r-Typ und b) die s-Typ Konfiguration dargestellt sind. Für die Zellarchitektur betrachten wir eine interdigitale rückseitig kontaktierte (IBC) Bottomzelle mit einer vollflächigen Topzelle [19]. Auf der Rückseite des Tandem-Bauelements befinden sich also der Root-Kontakt (R) und der zusätzliche Kontakt (Z), während die Vorderseite den Top-Kontakt (T) aufweist [14]. Diese Architektur hat den Vorteil, dass für den Z-Kontakt kein lateraler leitender Kontakt zwischen den Subzellen erforderlich ist, der zu zusätzlichen optischen und elektrischen Verlusten führen würde.

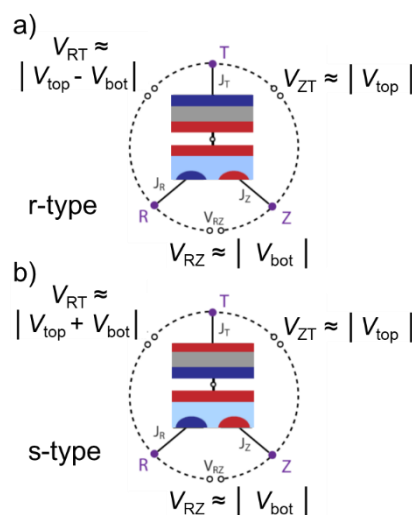


Abbildung 26: Spannung zwischen den drei Anschlüssen einer 3T-Solarzelle. Die Nomenklatur und die Zellabbildungen wurden aus [14] übernommen. Die Schemata zeigen nur die mittleren Abschnitte eines Strings. Die farbigen Kanten zeigen die parallelen Pfade innerhalb des Strings.

Zellparameter

Für unsere Simulationsstudie zu den String-End-Verlusten betrachten wir eine Perowskit-(PSC)-Top- und eine Silizium-Bottom-Zelle als Tandemzellen-Anwendungsszenario. Unser Modell basiert

auf den Messparametern, die in der Referenz [20] angegeben sind. Wir verwenden ein in LTspiceXVII implementiertes Ein-Dioden-Modell (SDM) und modellieren die Referenzwerte innerhalb einer Abweichung von 1% von den gemessenen Parametern nach. Als Eingangsparameter für das SDM verwenden wir die Kurzschlussstromdichte J_{sc} und passen die Dunkelsättigungsstromdichte J_{01} an, bis unsere modellierte Leerlaufspannung V_{oc} mit der in der Referenz übereinstimmt. Außerdem passen wir den Serienwiderstand R_s so an, dass er mit dem angegebenen Füllfaktor FF übereinstimmt. Wir variieren J_{01} der oberen Zelle im Bereich von $9,22 \times 10^{-4} \text{ fA/cm}^2$ bis $9,22 \times 10^{-13} \text{ fA/cm}^2$, um die Auswirkung unterschiedlicher Spannungsverhältnisse zwischen oberer und unterer Zelle auf die String-End-Verluste zu simulieren. Die Variation des J_{01} führt zu einer V_{oc} -Variation von 0,97 V bis 1,50 V.

Table 1 Parameter eines Ein-Dioden-Modells zur Reproduktion der in [20] berichteten JV-Parameter der Perowskit-Top- und Silizium-Bottom-Zelle und der resultierenden Wirkungsgrade η . Bei der String-End-Verlust-Variation ist J_{01} der oberen Zelle ein freier Parameter, um die Auswirkungen unterschiedlicher Spannungsanpassungsverhältnisse der oberen und unteren Zelle zu simulieren, und variiert von ($9,22 \times 10^{-4}$ bis $9,22 \times 10^{-13}$) fA/cm^2 .

	$J_{sc} [\text{mA/cm}^2]$	$J_{01} [\text{fA/cm}^2]$	$R_s [\Omega\text{cm}^2]$	R_{sh} [$\text{k}\Omega\text{cm}^2$]	η [%]	FF [%]	V_{oc} [V]
Topzelle	19.85	9.22×10^{-7}	7.7402	10	17.4	76.7	1.14
Bottomzelle	15.6	108.8	1.5471	13,3	8.3	80.6	0.66

String-Modellierung und experimentelle Verifikation

Wir verwenden einen String aus 20 zusammengeschalteten 3T-Silizium-Solarzellen, um unser elektrisches Modell für die Modellierung von String-End-Verlusten zu überprüfen. Der String besteht nur aus vollen und halbierten Si-Solarzellen, da uns zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts keine Perowskit-Solarzellen mit den Abmessungen von Silizium-Solarzellen in voller Größe zur Verfügung stehen. Eine volle Si-Solarzelle, die die untere Zelle nachbildet, ist parallel zu zwei in Reihe geschalteten Si-Halbzellen geschaltet, die die obere Zelle nachbilden. Die auf Silizium basierenden oberen und unteren Zellen werden in der R-Typ-Konfiguration verschaltet, um eine Parallel-/Reihenschaltung von 20 3T-Zellen zu erreichen. Für die Zellverschaltung verwenden wir Zellverbindungsbander (CIR), die an die Busbars der Zellen gelötet sind. Die CIR der Unterzellen können einzeln zwischen den Zellen auf der Rückseite des Moduls kontaktiert werden, um die Strom-Spannungs-Charakteristik (IV) eines Strings mit einer unterschiedlichen Anzahl von Zellen zu messen. Darüber hinaus ermöglicht der Emulator das Anschließen und Trennen der ersten oberen und der letzten unteren Zelle vom Stromkreis, was zusätzliche Messkonfigurationen zur Überprüfung des elektrischen Modells ermöglicht. Weitere Einzelheiten über das Modul und die Modellierung sind in [21] zu finden.

Zellenverschaltung je nach Zelldesign

Abbildung 25 zeigt die konzeptionelle Stringverschaltung von 3T-Zellen für die c) r-Typ und d) s-Typ Zellkonfiguration. Diese Zellkonfigurationen führen auch zu einer unterschiedlichen Potenzialdifferenz zwischen den drei Anschlüssen des Bauelements, wenn sie unter Beleuchtung betrieben werden, wie in Abbildung 26 dargestellt ist. Bei den r-Typ- Tandemzellen ist die maximale Spannungsdifferenz die Spannung der Topzelle und damit zwischen den Kontakten T und Z. Bei den s-Typ-Zellen liegt die maximale Spannung zwischen den Kontakten T und R und entspricht damit der Summe der beiden Subzellen. Dies hat auch Auswirkungen auf die Modulintegration und führt zu einer unterschiedlichen Verschaltung der Zellen bei r- und s-Typ 3TT, wie im Folgenden gezeigt wird.

Abbildung 27 zeigt eine zweidimensionale Darstellung der Verschaltung für die a) r-Typ und b) s-Typ Konfiguration. Die blau gefärbte Vorderseite stellt den oberen Kontakt T der 3T-Zellen dar. Die rot- und grüngefärbten Rückseiten stellen die Z- bzw. R-Kontakte des 3T-Bauelements dar. Der Einfachheit halber zeigt Abbildung 27 nur eine Stromschiene pro Polarität für die 3T-Zellen. Man beachte, dass beispielsweise eine IBC-Bottomzelle in Wirklichkeit viele Busbars auf der Rückseite mit wechselnder Polarität aufweist. Außerdem sind die IBC-Sammelschienen-Verbinders in dieser zweidimensionalen Darstellung übereinander und nicht nebeneinander dargestellt.

In Abbildung 27 a) ist der rot markierte Z-Kontakt mit dem Masseanschluss verbunden und die Spannungsdifferenz zwischen dem Z- und dem R-Kontakt ist V_{bot} , die Spannung der Bottom-Zelle. Die erste Top-Zelle zwischen dem blauen und dem roten Kontakt hat die doppelte Spannung wie die Bottom-Zelle. Die Verschaltung der Bottom-Zellen erfolgt analog zu typischen IBC-Zellen mit Busbars, bei denen die nachfolgenden Zellen so angeordnet sind, dass die Busbars für jede Polarität abwechselnd ausgerichtet sind, so dass eine gerade Verbindung zwischen den Zellen möglich ist. Dieselbe Verbindung, die die R- und Z-Kontakte zweier benachbarter Zellrückseiten kontaktiert, kann verwendet werden, um den vorderen Kontakt T der nachfolgenden Top-Zelle mit demselben Potential zu kontaktieren, siehe die orange Verbindung in Abbildung 27 a). Da der grüne und der blaue Kontakt die gleiche Polarität haben, können sie miteinander verbunden werden, um ihren Strom zu sammeln, wie bereits in [22] gezeigt. Daraus ergibt sich eine einfache Abfolge einer Vorderseiten-Rückseiten-Verschaltung und einer IBC-Verschaltung mit demselben Verbindungselement, d. h. es handelt sich um eine Kombination zweier etablierter Verschaltungsverfahren, eines, wie es für bifacial kontaktierte Solarzellen verwendet wird, und eines für rückseitenkontaktierte Solarzellen. Die Vorderseiten-Rückseiten-Verbindung kann auch durch andere Verfahren wie das Shingling-Verfahren erfolgen, bei dem beispielsweise eine druckempfindliche Perowskit-Schicht nicht mit einem Verbinder kontaktiert werden muss.

Bei einer Zusammenschaltung von S-Typ-Tandems in Abbildung 27 b) liegen aus der Perspektive der gemeinsamen Z-Kontakte (rot) der T- (blau) und der R-Kontakt (grün) in entgegengesetzten Richtungen. Dies führt zu längeren Verbindungen im Vergleich zum R-Typ, siehe z. B. die orangefarbene Verbindung in Abbildung 27 a) und b). Zusätzlich zu dem um 33 % längeren Weg muss der Verbinder eine Zelle passieren, ohne die Metallisierung oder den anderen Verbinder zu berühren, was eine zusätzliche Isolationschicht auf der Rückseite der Zelle erfordert.

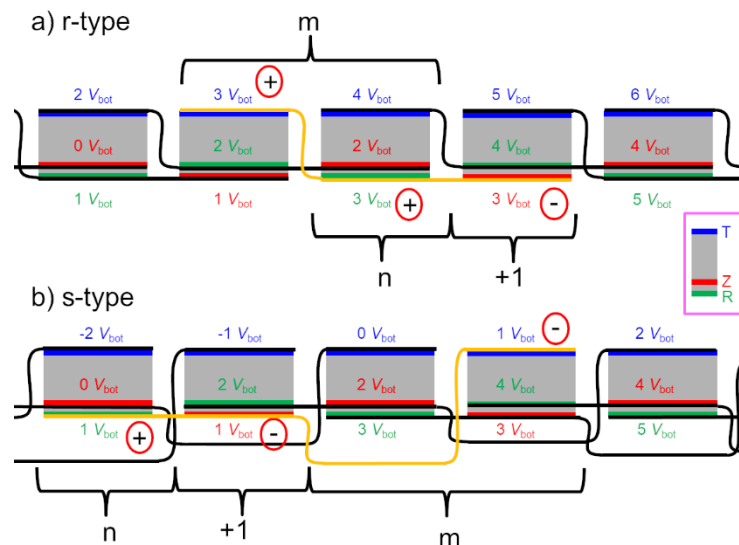


Abbildung 27: Strings von a) r- und b) s-Typ 2:1 3T-Tandems mit beispielhafter Orientierung der Polaritäten an den Anschlüssen. Entspricht der Kontaktbezeichnung in Abbildung 26 und ist im magentafarbenen Kasten dargestellt. Der rote Kontakt in dieser Abbildung ist der verbundene Kontakt Z, der mit dem grünen Kontakt R der unteren und dem blauen Kontakt T der oberen Zellen über einen pn-Übergang verbunden ist. Die Verbindungen sind in Schwarz

dargestellt, außer einem Kontakt in Orange, um das sich wiederholende Element hervorzuheben. Die beiden Kontakte der unteren Zelle wechseln sich von Zelle zu Zelle ab. Der Einfachheit halber sind die Kontakte der unteren Zelle übereinander abgebildet. Bei einer echten Zelle liegen die unteren Kontakte nebeneinander. m und n beziehen sich auf die ganzzahlige Größe des Spannungsverhältnisses $m/n = V_{top}/V_{bot}$, hier 2:1.

Betrachtet man die Position des Kontakts auf dem gleichen Potential in Bezug auf den Z-Kontakt, so stellt man fest, dass bei den r-Typ-Strings die Verbindung zwischen den äquipotentialen R- und T-Kontakten in die gleiche Richtung wie der Z-Kontakt verläuft. Daher führt die Verbindung zwischen dem T- und dem Z-Kontakt am R-Kontakt vorbei und verbindet ihn, siehe Abbildung 27 a). Im Gegensatz dazu liegen bei einem s-Typ String die Äquipotentialkontakte in Bezug auf den Z-Kontakt in entgegengesetzten Richtungen. Daher muss die Verbindung zwischen dem T- und dem Z-Kontakt verlängert werden, um eine Zelle zu überspringen. Die Länge der Verbindungen ist proportional zu den ganzen Zahlen des Spannungsverhältnisses $m/n = V_{top}/V_{bot}$, wie in Abbildung 27 dargestellt. Daraus ergibt sich für eine lineare Verschaltung der 3T-Zellen mit einem Spannungsverhältnis von m/n die folgende Länge des Verbinders L_{ic} :

$$L_{ic} \approx \begin{cases} [\max(m, n) + 1] * L_{cell} & \text{for r-type (1a)} \\ (m + n + 1) * L_{cell} & \text{for s-type (1b)} \end{cases}$$

Dabei ist L_{cell} die Länge einer Zelle in Stringrichtung. Da der Verbinder auch den Z-Kontakt berühren muss, ergibt sich daraus der Ausdruck "+1". Der Einfachheit halber ignorieren wir den Zellenabstand und den Abstand zwischen dem Ende des Verbinders und dem Zellenrand. Für die Zusammenschaltung von 2T-Bauelementen wäre die Länge des Verbinders also das Doppelte von L_{cell} . Ein r-Typ String und ein s-Typ von 3:2 spannungsangepassten 3T-Zellen ergibt folglich eine Gesamtlänge der Verbinder von etwa dem Vier- bzw. Sechsfachen der Zellenlänge. Da die Zellen drei Kontakte haben, müssen bei den s-Typ- Tandems die drei anderen Verbinder an der Zelle vorbeigeführt werden, ohne sie zu berühren. Dies verursacht zusätzlichen Aufwand für die Isolierung sowie Kosten und Serienwiderstandsbeiträge durch die langen Verbinder. Daher sind für 3:2 s-Typ 3T-Bauelemente lineare Verbindungsschemata nicht durchführbar, und Matrixansätze [23] in Kombination mit mehrlagigen leitfähigen Rückseitenfolien können eine (teure) Alternative darstellen.

Effekte an den Enden der Strings

Abbildung 28 a) zeigt einen String aus 3T-Zellen in r-Typ-Konfiguration für ein Spannungsverhältnis von 2:1 für die obere und untere Zelle in einfacher Diodendarstellung. Die Stringenden auf der linken und rechten Seite haben jeweils zwei Anschlüsse auf unterschiedlichen Spannungsebenen. Die Verbindungen sind in Abbildung 28 a) mit 1 und 2 nummeriert, um im Folgenden auf die Möglichkeit zu hinweisen, dass die Verbindungen ein- oder ausgeschlossen werden können. Im Allgemeinen wird die Leistungselektronik an den Stringenden mit einer Anschlussklemme pro Polarität angeschlossen. Da die Anschlüsse an den Stringenden alle auf unterschiedlichen Potentialniveaus liegen, führt das Zusammenführen der Stringenden in eine einzelne Anschlussstelle zu einem teilweisen Spannungsverlust, da die erste bzw. die letzte Topzelle nur zu einer Bottomzelle parallel geschaltet sind. Außerdem wird die Bottomzelle am linken Stringende kurzgeschlossen, wenn man den schwarzen und grünen Kontakt mit der Leitung 1 verbindet. Alternativ könnte man auch die Verbindung 1 und 2 auf der linken und rechten Seite weglassen.

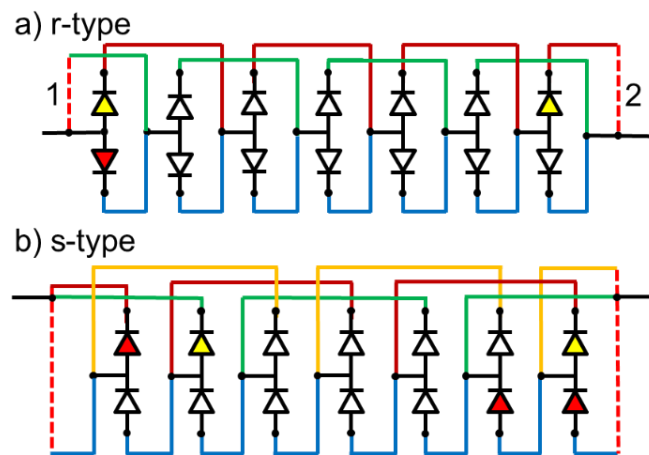


Abbildung 28: Veranschaulichung von Verbindungsschemata in einer Diodendarstellung für Strings aus a) r-Typ und b) s-Typ 3T-Solarzellen. Es wird ein Spannungsverhältnis von 2:1 zwischen oberer und unterer Zelle angenommen. Die rot gestrichelten Linien sind optionale Verbindungen zwischen den Stringanschlüssen, die einen großen Einfluss auf die Gesamtleistung des Strings haben. Wenn die nummerierten rot gestrichelten Verbindungen 1 und 2 hergestellt werden, liefern die roten Zellen (die eine einzelne Diode darstellen) keine Leistung an den String und die gelben Zellen etwa die Hälfte ihrer Leistung

Wir messen die Auswirkungen verschiedener String-End-Konfigurationen für eine unterschiedliche Stringlänge mit unserem Si-basierten 3T-Emulator-Modul. Diese Messungen helfen, die Auswirkungen verschiedener String-End-Konfigurationen auf die String-End-Verluste zu verstehen und das elektrische Modell zu verifizieren. Die blauen und grünen Symbole in Abbildung 29 zeigen unsere Messergebnisse für den Fall, dass die linke untere Zelle im Kurzschluss betrieben wird und keinen Strom an den String liefert oder aber in den String eingebunden ist. Man beachte, dass das Abklemmen der linken unteren Zelle und ihr Betrieb im offenen Stromkreis zu einem ähnlichen Ergebnis führt. Die gemessene Leistung am Punkt maximaler Leistung (MPP) des Strings P_{mpp} wird durch die Summe der MPP-Leistungen der einzelnen Zellen P_{ideal} geteilt. Das Diagramm zeigt daher auch die String-Endverluste in Abhängigkeit von der Stringlänge.

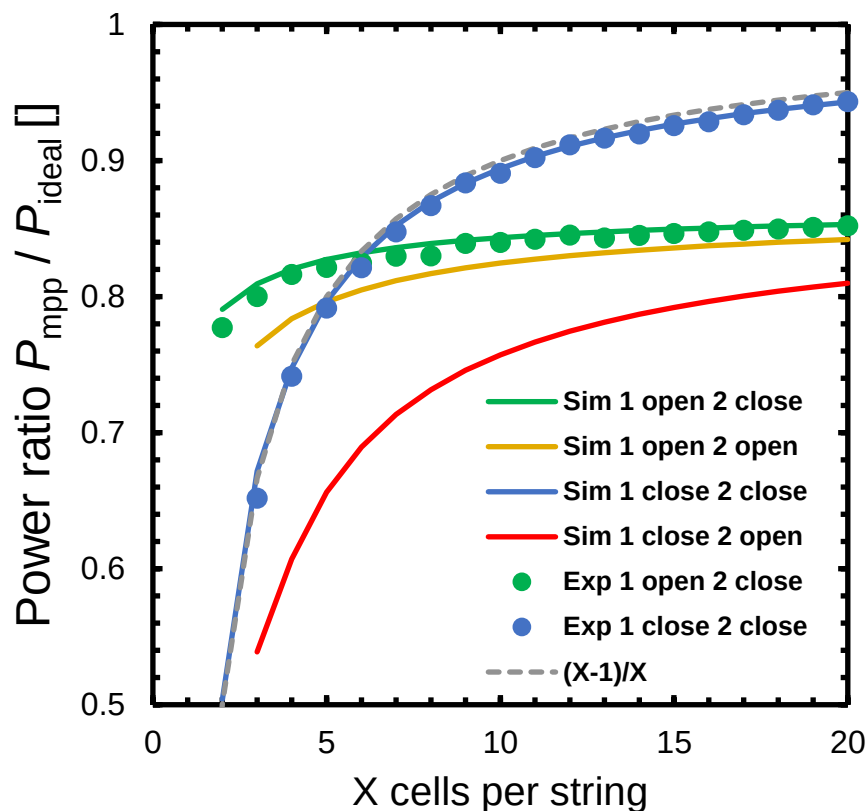


Abbildung 29: Die gemessene (Symbole) und simulierte (durchgezogene Linien) Leistung am Punkt maximaler Leistung (MPP) des Strings P_{mpp} wird durch die Summe der MPP-Leistungen der einzelnen Zellen P_{ideal} geteilt. Die grünen bzw. blauen Symbole zeigen die experimentellen Ergebnisse für die Fälle, in denen die linke untere Zelle mit dem String verbunden ist bzw. von ihm getrennt ist. Die simulierten Ergebnisse sind für alle vier Kombinationen von offenen oder geschlossenen Verbindungen 1 und 2 in Abbildung 28 dargestellt. Die gestrichelte graue Linie entspricht dem Verlust einer Zelle pro String mit X Zellen gemäß Gl. 2a.

Wenn der Kontakt 1 nicht angeschlossen ist, wird die linke Bottom-Zelle in den String einbezogen und die linke Top-Zelle wird parallel zu zwei Bottom-Zellen angeschlossen. Diese Situation führt bei kurzen Strings mit bis zu sechs Zellen zu einer höheren Leistung aufgrund der höheren Spannung durch die Einbeziehung der linken Bottomzelle (grüne Symbole) im Vergleich zu dem Fall, in dem die linke Bottomzelle nicht mit dem String verbunden ist (blaue Symbole). Allerdings wird der Strom für die zweite Top- und Bottom-Zelle auf der linken Seite durch den Strom durch die Bottom-Zelle ganz links begrenzt. Dadurch wird der Strom des gesamten Strings begrenzt, so dass bei Strings mit mehr als sechs Zellen die Abtrennung der linken Bottomzelle zu einer höheren Stringleistung führt als in dem Fall, in dem der Stringstrom durch die linke Bottomzelle begrenzt wird. Die Anzahl der Zellen, für die es vorteilhaft ist, den Anschluss 1 zu öffnen oder zu schließen, hängt von dem Strom ab, der aufgrund der begrenzenden Zelle an den Stringenden fehlt, sowie von dem Spannungsverlust beim Umgehen der linken Bottomzelle. Der Umschaltzeitpunkt hängt also von den Eigenschaften der Subzellen ab, d. h. von ihren spezifischen I-V-Parametern.

Die durchgezogenen Linien in Abbildung 29 zeigen die Simulationen mit unserem elektrischen Modell. Die Simulationen beschreiben die experimentelle Messung innerhalb der Messunsicherheit. Der Vollständigkeit halber ist auch die Auswirkung der offenen bzw. geschlossenen Verbindung 2 dargestellt. Von den vier Kombinationen aus offener bzw. geschlossener Verbindung 1 und 2 ermöglicht das Schließen von 1 und 2 die höchste Leistung bei langen Strings, da der Strom aller

parallelen Pfade in der Mitte des Strings zur Anschlussklemme transportiert werden kann. Wenn einer der beiden Kontakte offen ist, begrenzt entweder die erste oder die letzte Bottomzelle im String den Stringstrom. Wenn Kontakt 1 geschlossen und Kontakt 2 offen ist, hat der String die geringste Leistung, da die Spannung durch die fehlende linke Bottomzelle reduziert wird und der Strom durch die rechte Bottomzelle begrenzt wird. Eine detaillierte Analyse der IV-Kurven findet sich in Ref. [21].

Bei der bevorzugten Kombination für längere Strings, bei der alle Kontakte an den Enden des Strings geschlossen werden, kann der Strom in allen parallelen Pfaden (blau, dunkelrot und grün) die Anschlussklemmen des Strings erreichen. Die linke Bottomzelle (rote Diode in Abbildung 28 a)) ist vom String abgeklemmt. Die erste und die letzte Top-Zelle des Strings sind parallel zu ihren Bottom-Zellen geschaltet, um den benötigten Strom der anderen Zellen im String zu erreichen. Aufgrund der fehlenden Nachbarzellen arbeiten sie jedoch mit etwa halber Spannung (gelbe Dioden). Dies führt in der Summe zu einem Leistungsverlust von etwa einer 3T-Tandemzelle. Bei den 3T-Bauelementen vom s-Typ mit dem gleichen Spannungsanpassungsverhältnis (VM) in Abbildung 28 b) gehen sogar zwei 3T-Zellen verloren. Wir haben in [15] einen verallgemeinerten Ansatz zur Annäherung an den Leistungsverlust an den Stringenden P_{endloss} definiert:

$$P_{\text{endloss}} \approx \begin{cases} [\max(m, n) - 1] * P_{\text{tandem}} & \text{for r-type} \quad (2a) \\ (m + n - 1) * P_{\text{tandem}} & \text{for s-type} \quad (2b) \end{cases}$$

Dabei ist $m/n = V_{\text{top}}/V_{\text{bot}}$ das Verhältnis der n Top-Zellen parallel zu m Bottom-Zellen, was zu dem gegebenen Verhältnis ihrer Spannungen führt, und P_{tandem} ist die Leistung einer 3T-Zelle unter den gegebenen VM-Bedingungen. Alle höheren m - und n -Werte des Spannungsverhältnisses führen zu deutlich höheren String-End-Verlusten, z. B. führt eine s-Typ-Zelle mit einem Perowskit mit niedrigeren Bandlücke und einem Spannungsverhältnis von 3:2 zu einem Leistungsverlust von etwa 4 Zellen pro String. Die graue Linie in Abbildung 29 entspricht dem Verlust einer Zelle pro String mit X Zellen $((X-1)/X)$ nach Gl. 2a.

Abbildung 29 zeigt die Ergebnisse für ein experimentelles Bauelement, das eine Reihe von 3T-Zellen mit den gleichen Zelltypen emuliert, d. h. nur Si-Zellen. Dies führt zu nahezu perfekten Spannungsanpassungsbedingungen mit nur geringen Spannungsunterschieden am Punkt maximaler Leistung infolge von Widerstandseffekten. Um die String-End-Verluste für ein realistisches Bauelement zu untersuchen, passen wir unser elektrisches Modell an die Parameter einer Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle an. In [20] zeigen die Autoren, dass Perowskite eine abstimmbare Bandlücke ermöglichen, was sich auf die Leerlaufspannung der Zelle und damit auf die VM auswirkt. Wir passen unser Ein-Dioden-Modell an die Messergebnisse in der Referenz [20] an. Der Einfachheit halber variieren wir J_{01} im Bereich von $9,22 \times 10^{-4} \text{ fA/cm}^2$ bis $9,22 \times 10^{-13} \text{ fA/cm}^2$, um die Auswirkungen von Abweichungen von der idealen Spannungsanpassung zu simulieren. Wir definieren diese Abweichung als Spannungsdifferenz $\Delta V_{\text{mpp}} = V_{\text{mpp,top}} - 2 \times V_{\text{mpp,bottom}}$, um die Fehlanpassung zwischen den Subzellen zu charakterisieren. $V_{\text{mpp,top}}$ und $V_{\text{mpp,bottom}}$ sind die Spannungen am MPP, wenn die Teilzellen unabhängig voneinander betrieben werden.

Abbildung 30 zeigt die Leistungsverhältnisse der simulierten MPP-Stringleistung P_{mpp} geteilt durch P_{ideal} , parametrisiert durch verschiedene Zellspannungsfehlanspassungen ΔV_{mpp} , die als farbige Zahlen in der Darstellung angegeben sind. Hier beschränken wir unsere Analyse auf den r-Typ-Fall, bei dem die letzte Bottomzelle (linke Bottomzelle in Abbildung 28 a)) abgetrennt ist, da dies die am besten geeignete Verbindung für Strings mit mehr als sechs Zellen ist. Auf der rechten Seite ist das Leistungsverhältnis dargestellt, das durch die Spannungsfehlanspassung ΔV_{mpp} zwischen einer Topzelle und zwei Bottomzellen begrenzt wird, was einem unendlichen String entspricht. Es wird durch Simulationen bestimmt, bei denen wir zwei Topzellen parallel zu einer Reihe von zwei Bottomzellen schalten. Wir simulieren die höchste Stringleistung für eine Spannungsdifferenz nahe 0. Das Leistungsverhältnis in Abhängigkeit von der Anzahl der Zellen pro String folgt wieder der Form des Grenzfalles durch $((X-1)/X)$ gemäß Gl. 2a (grau gestrichelte Linie), verschoben um die Verluste aufgrund der Spannungsfehlanspassung der Bottomzellen.

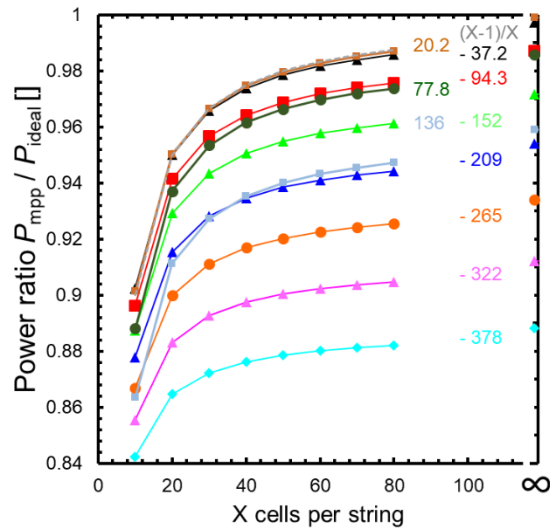


Abbildung 30: Simulierte Leistung des Zellstrings P_{mpp} geteilt durch die Leistung P_{ideal} der Zellen im String bei Betrieb der Teilzellen an ihren individuellen maximalen Leistungspunkten (mpp) für verschiedene Spannungsdifferenzen ΔV_{mpp} , die in mV durch die farbigen Zahlen im Diagramm angegeben sind, in Abhängigkeit von der Anzahl der Zellen pro String. Die gestrichelte graue Linie entspricht dem Verlust einer Zelle pro String mit X Zellen gemäß Gl. 2a. Man beachte den Schnittpunkt der Abszisse, um das Leistungsverhältnis für einen unendlichen String anzugeben.

Abbildung 31 zeigt die Überlagerung der String-End-Verluste nach Gl. 2a und der Mismatch-Verluste (gestrichelte Linien), d.h. $((X-1)/X)$ multipliziert mit der Leistung eines unendlichen Strings, sowie die simulierten Werte (durchgezogene Linien) für Strings von 10 (rot) und 80 Zellen (schwarz). Die Abbildung zeigt eine asymmetrische Verlustleistung bei gleichen absoluten Spannungsunterschieden $|\Delta V_{mpp}|$. Eine positive Fehlanpassung, die im simulierten Fall einer Topzelle mit höherem V_{mpp} entspricht, führt zu höheren Leistungsverlusten im Vergleich zu denselben absoluten Werten der Spannungsdifferenz $|\Delta V_{mpp}|$ im Falle einer negativen Fehlanpassung. Im Falle einer negativen Fehlanpassung wird die Spannung der Topzelle durch Erhöhung von J_{01} verringert. Dies führt zu einer Verringerung des Füllfaktors und damit zu einer geringeren Verlustleistung bei Abweichung vom maximalen Leistungspunkt.

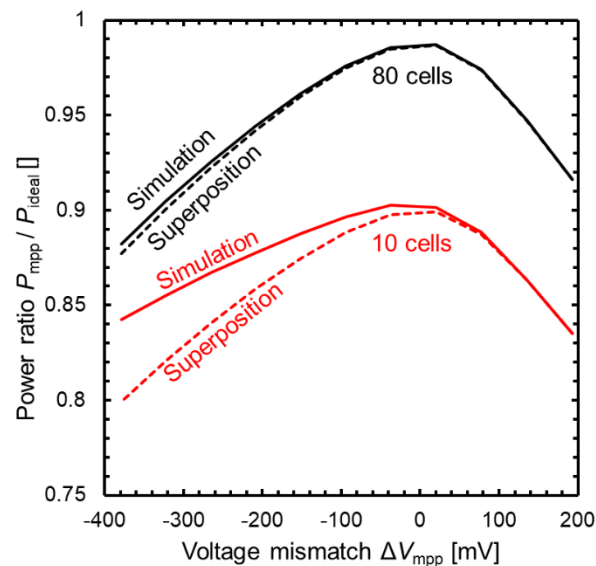


Abbildung 31: Durch Netzsimulationen simuliertes Leistungsverhältnis $P_{\text{mpp}} / P_{\text{ideal}}$ (durchgezogene Linien) im Vergleich zur Überlagerung der String-Endverluste nach Gl. 2a. In rot und schwarz werden Strings mit 10 bzw. 80 Zellen analysiert.

Ein weiterer bemerkenswerter Aspekt in Abbildung 31 ist, dass die simulierte Leistung für den String höher ist als die Leistung aus der Überlagerung des Fehlens einer Zelle pro String (Gl. 2) und der Spannungsfehlانpassung ΔV_{mpp} .

Theoretisch arbeiten die letzten Topzellen im String mit halber Spannung und es wird angenommen, dass sie nur die Hälfte ihrer Leistung abgeben, d.h. insgesamt geht die Leistung einer Top-Zelle verloren [15]. Wie in Abbildung 32 für den Fall von $\Delta V_{\text{mpp}} = -209$ mV und einem String aus 20 Zellen gezeigt (vgl. blaue Kurve in Abbildung 30), sind die Verluste der linken und rechten Top-Zelle im String geringer als die Hälfte ihrer Leistung. Der Grund dafür ist, dass sie parallel zu einer einzigen Bottomzelle (zweite linke bzw. rechte Bottomzelle) geschaltet sind und zu niedrigeren Spannungen als ihren $V_{\text{mpp,top}}$ gezwungen werden, wenn sie einzeln betrieben werden. Daher ist ihr Strom im Vergleich zu $I_{\text{mpp,top}}$ erhöht. Folglich sinkt auch der Strom der Bottomzellen, um die Summe der Ströme im gesamten String in den parallelen Pfaden konstant zu halten. Letzteres führt zu einer höheren Spannung für die Top- und Bottomzellen. Somit arbeiten die Topzellen mit einer höheren Spannung als der Hälfte ihrer $V_{\text{mpp,top}}$ und mit höheren Strömen, was zu einer höheren Leistung als 50 % der Leistung der Zellen in der Mitte des Strings führt.

10.9	17.5	17.7	17.5	17.7	17.6	17.7	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6	17.7	17.6	17.7	17.5	17.7	17.5	10.9
0.0	8.3	6.2	8.1	6.5	7.9	6.7	7.7	6.8	7.7	6.8	7.7	6.8	7.7	6.7	7.9	6.5	8.1	6.2	8.3

Abbildung 32: Die obere und untere Reihe zeigen den Wirkungsgrad in % der Subzellen in einem Zellstrang von 20 Zellen für die Top- bzw. Bottom-Zelle. Als Eingangsparameter des Ein-Dioden-Modells verwenden wir die Werte aus Tabelle 1. Der Farbcode hebt die relative Leistung der einzelnen Zellen zwischen 0 (rot) und 17,7 % (grün) hervor.

Wenn die Spannungsabweichung positiv und größer ist, arbeiten die Top-Zellen in der Mitte auch bei Spannungen, die niedriger sind als ihre $V_{\text{mpp,top}}$ und bei Strömen, die höher sind als ihre $I_{\text{mpp,top}}$ im unabhängigen Betrieb. Daher hat die Verschiebung zu kleineren Spannungen für die erste und letzte Topzelle nur geringe bis gar keine Auswirkungen auf ihren Strom an diesem Betriebspunkt.

Außerdem ist der Füllfaktor der Topzellen bei höheren ΔV_{mpp} größer und die Differenz zwischen $I_{mpp,top}$ und dem Strom an den Betriebspunkten nimmt ab. Somit verschwindet die Stromverstärkung für die erste und letzte Topzelle, und die Verschiebung der Betriebspunkte zur Minimierung der String-Endverluste nimmt im Vergleich zum Fall von negativem ΔV_{mpp} ab.

Eine negative Verschiebung des Arbeitspunktes ermöglicht eine Verringerung der Leistungsverluste am Stringende im Vergleich zu Gl. 2a. Für $\Delta V_{mpp} = -209$ mV wie im Fall der in Tabelle 1 angegebenen Parameter und einem String aus 10 und 80 Zellen beträgt der Leistungsverlust beispielsweise 81 % und 82 % der Leistung einer 3T-Zelle. Eine positive Verschiebung des Betriebspunktes nähert sich der Theorie, die einen Verlust von 100 % einer vollen Tandemzelle vorhersagt. Bei $\Delta V_{mpp} = 135$ mV und einem String aus 10 bzw. 80 Zellen beträgt der Leistungsverlust beispielsweise 99,7 % bzw. 98,8 %. Es ist zu beachten, dass die Verschiebung des Arbeitspunktes an den Stringenden ein wechselndes Muster der Ströme durch die Top- und Bottomzellen verursacht, was zu einem wechselnden Muster der Zellwirkungsgrade innerhalb des Strings führt, siehe Abbildung 32. Das Ausmaß der Leistungsdifferenz des alternierenden Musters nimmt aus den oben erläuterten Gründen mit zunehmendem ΔV_{mpp} ab.

String-End-Verluste auf Systemebene

Die vorgestellte Zellverschaltung zeigt einen praktischen Weg auf, sehr lange Zellstrings zu erzeugen und damit die Stringendverluste auf ein Minimum zu reduzieren. Von Standard-Solarmodulen ist jedoch bekannt, dass lange Strings das Risiko von Reverse-Bias-Problemen im Falle einer Stromfehlanspassung im String, z. B. durch Teilverschattung, mit sich bringen. Im Folgenden quantifizieren wir die String-End-Verluste für PV-Systeme mit 3T-Tandemzellen und schlagen eine Bypass-Diodenschaltung vor, um Probleme im Zusammenhang mit Reverse-Bias zu entschärfen.

In [21] haben wir die Robustheit von r-Typ-Strings mit 2:1 spannungsangepassten 3T-Zellen in Bezug auf Teilabschattung aufgrund des parallelen Strompfads gezeigt. Dennoch ist eine Bypass-Diode erforderlich, um die Zellen im Falle einer Abschattung vor zu hoher Verlustleistung aufgrund von Reverse-Bias zu schützen. Man könnte die String-Enden kurzschließen, wie in Abbildung 28 a) und b) (rote Linien) gezeigt, was zu String-End-Verlusten für jeden Teilstring gemäß Gleichung 2a und 2b führt. Alternativ könnten die Teilstränge auf Systemebene durch zwei Verbindungen an den String-Enden verbunden werden, um das Problem der fehlenden Nachbarzellen zu umgehen und die periodische Parallelschaltung einer Topzelle mit zwei Bottomzellen beizubehalten. Dabei ist zu beachten, dass die Anzahl der Verbindungen um eins geringer ist als die Anzahl der oben erwähnten parallelen Pfade (Gl. 1). Für ein s-Typ-Modul mit einem Spannungsverhältnis von 3:2 würde man also fünf Verbindungen benötigen. Die Verschaltung in Modulstrings erfordert jedoch eine geeignete Integration der Bypass-Dioden zum Schutz der Zellstrings. Die 2:1 r-Typ Konfiguration erlaubt es, eine Bypass-Diode parallel zu einem durchgehenden String zu integrieren. Dadurch kann der Verlust am String-Ende von der Teilstring-Ebene eines Moduls zum Ende des Modulstrings auf Systemebene verlagert werden, siehe Abbildung 33. Aufgrund der parallelen Strompfade ist die letzte Top-Zelle in den Strings jedoch nicht durch die Bypass-Diode parallel zum String geschützt (bei allen anderen Konfigurationen als 2:1 spannungsangepassten R-Typ-Strings ist die Anzahl der nicht geschützten Unterzellen höher als eine Zelle pro String). Eine Möglichkeit, diese Top-Zelle zu schützen, ist eine zusätzliche Bypass-Diode parallel zu dieser Top-Zelle. Auf diese Weise wird der gesamte Teilstring durch zwei Bypass-Dioden geschützt und hat zwei Anschlüsse an jedem Stringende, was eine Verbindung der Teilstrings mit marginalen Stringendverlusten für 2:1 spannungsangepasste Strings ermöglicht. Man beachte, dass die Länge des durch die Bypass-Dioden geschützten Substrats angepasst werden kann, um die maximale Rückwärtsspannung für die Tandemzellen zu begrenzen. Diese innovative Art der Verschaltung und Integration der Bypass-Dioden wurde zum Patent angemeldet [24].

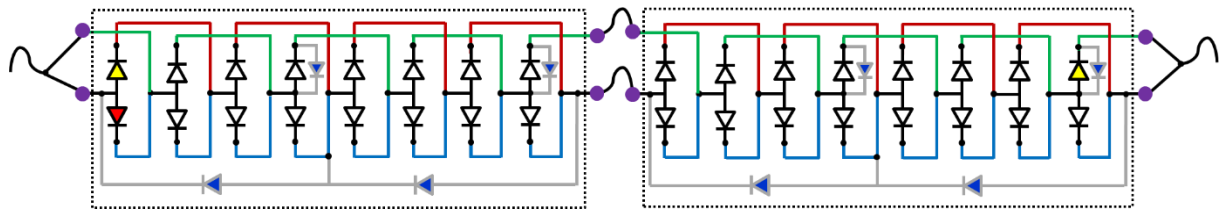


Abbildung 33: Veranschaulichung des Verschaltungsschemas in der Diodendarstellung für zwei Module (gestrichelte Rahmen) mit je zwei Teilstrings in der R-Typ-Konfiguration mit integrierten Bypass-Dioden zum Schutz der Modulsubstrings vor zu großer Rückwärtsspannung. Die String-End-Verluste werden von der Teilstring-Ebene auf die Enden der Modulstrings übertragen.

Eine moderne PV-Anlage wird heute in der Regel für eine Systemspannung von 1000 V ausgelegt. Wir betrachten daher ein typisches Moduldesign für das simulierte Perowskit-Silizium-Tandemmodul mit 72 Zellen pro Modul und 20 solcher Module pro Wechselrichter zur Bildung der PV-Anlage. Alle 72 3T-Zellen eines Moduls sind in Reihe geschaltet, ebenso wie die 20 Module des Systems. Unter Berücksichtigung der Leerlaufspannung des simulierten Perowskit-Silizium-Tandemmoduls ergibt sich eine PV-Systemspannung von etwa 950 V. Aufgrund der Serienschaltung aller Teilstrings und Module machen die String-End-Verluste in einem solchen PV-System 1/1440 der Leistung eines r-Typ 2:1 3T-Tandemsolarzelle aus, statt 1/24 wie beim Teilstring des Moduls in einem Modul mit 72 Zellen und 3 Bypass-Dioden. Damit wird ein weiterer wesentlicher Vorteil von Modulen mit 3T-Zellen berücksichtigt: Die Spannung eines Strings entspricht der Anzahl der Zellen mal V_{mpp} der Bottomzelle (annähernd perfekte VM) abzüglich der String-End-Verluste gemäß Gl. 2a oder 2b. Die Erweiterung um eine Tandemzelle ergibt die gleiche Spannung wie die Erweiterung um eine Single Junction (Bottom) Zelle. Im Falle von 2T-Tandems wird durch das Hinzufügen einer Zelle zum String die $V_{mpp, bottom}$ der unteren Zelle plus die $V_{mpp, top}$ der Topzelle hinzugefügt, d. h. etwa das Dreifache des V_{mpp} der Single Junction Si-Zelle. Dieser Aspekt ist für die Verschaltung von Tandem-Bauelementen von großer Bedeutung, da die Topzellen aus Perowskit sehr empfindlich auf Rückwärtsspannung reagieren [25]. In Verbindung mit der Tatsache, dass im Falle einer teilweisen Abschattung der fehlende Strom nicht nur von der einen abgeschatteten Topzelle, sondern auch von den benachbarten parallelen Topzellen (rote und grüne Strompfade in Abbildung 33) getragen werden muss, wird der Spannungsabfall auf zwei Topzellen verteilt. Daher sind weniger Bypass-Dioden erforderlich, um einen String aus 3T-Tandems im Vergleich zu einem String mit 2T-Tandemzellen zu sichern.

Schlussfolgerungen

Aus Sicht der Module bieten 3T-Tandemzellen und -Strings im Vergleich zu 2T-Tandems erhebliche Vorteile, z. B. niedrigere Spannungen pro Tandemzelle, Robustheit gegenüber spektraler Fehlanpassung und Teilabschattung. Außerdem können 3T-Tandemzellenmodule im Vergleich zu 2T-Tandemzellenmodulen die absorbierte bifaciale Bestrahlungsstärke voll ausnutzen, da der Strom der Top- und Bottomzellen ungleich sein kann. Allerdings ist ein komplexeres Verbinderschema erforderlich, das je nach Spannungsverhältnis der Top- und Bottomzellen und deren Verschaltung mit String-End-Verlusten behaftet ist. Auch wenn beispielsweise eine s-Verschaltung für die Verarbeitung und Leistung einzelner 3T-Bauelemente [11] vorteilhaft sein mag, führt sie bei allen Spannungsverhältnissen zu erheblichem Mehraufwand bei der Isolierung, zu Kosten für die längeren Verbinder sowie zu entsprechenden Serienwiderständen und String-End-Verlusten. Die attraktivste 3T-Zellvariante für die Modulintegration ist eine r-Typ-Zelle mit einem Spannungsverhältnis von 2:1 aufgrund der geringsten String-End-Verluste. Außerdem haben wir in dieser Studie ein relativ einfaches Verbinderschema für diese Art von Zellen vorgestellt. Diese Verschaltung kombiniert zwei etablierte Verschaltungsverfahren, wobei das eine für bifacial verschaltete Solarzellen und das andere für Rückseitenkontakt-Solarzellen verwendet wird. Es erfordert die geringste Leitungslänge im Vergleich zu anderen Spannungsverhältnissen oder S-Typ-Strings, ohne dass komplexe Verbinder oder Isolierungen erforderlich sind.

Die Verluste am Ende der Strings hängen hauptsächlich von der Zellkonfiguration (r- oder s-Typ) ab und führen zu Verlusten, die der Leistung eines oder mehrerer 3T-Geräte entsprechen. In dieser Studie haben wir auch gezeigt, dass sie von den Eigenschaften und dem Spannungsverhältnis der Subzellen beeinflusst werden. Ein Teil der String-End-Verluste kann bei Zellen mit niedrigem Füllfaktor und bei spannungsbegrenzenden Topzellen wiedergewonnen werden. Bei hocheffizienten Subzellen und gut angepasster Spannungs Kombination beträgt die partielle Rückgewinnung jedoch nur einen kleinen Bruchteil der Leistung eines 3T-Tandems. Für lange Strings beschreibt die in [15] veröffentlichte Näherung die String-End-Verluste also recht gut.

Das Ergebnis der vorgestellten IBC-basierten Verschaltung von 3T-Tandems ist, dass sie die Verwendung sehr langer Strings ermöglicht und die effektive Stringlänge für die relativen String-End-Verluste auf die Modul- oder PV-Systemebene erweitert. Dadurch werden die Stringendverluste von einem Teilstring auf das gesamte PV-System übertragen. Wir haben die String-End-Verluste für ein auf 1000 V begrenztes Beispielsystem quantifiziert, das aus 20 Modulen mit jeweils 72 Zellen in einer R-Typ-Konfiguration und einem Spannungsverhältnis von 2:1 besteht. Unsere Analyse zeigt, dass der String-End-Verlust nur 1/1440 der Leistung einer Tandemzelle beträgt. Eine Erhöhung der Systemgröße, z. B. auf ein 1500-V-System, wird die String-End-Verluste weiter reduzieren. Wir haben auch das Problem der Rückwärtsspannung im Falle einer Stromfehlanspassung bei teilweiser Abschattung eines so langen Strings gelöst, indem wir ein neuartiges Verbinderschema mit Bypass-Dioden vorgestellt haben.

Wir haben gezeigt, dass die Verschaltung von 3T-Bauelementen auf einfache Weise erfolgen kann und dass die Verluste an den String-Enden minimiert werden können, um von den Vorteilen der 3T-Tandem-Solarzellen zu profitieren, die es ermöglichen, größere Bandlückenkombinationen der Subzellen zu verwenden, eine höhere Energieausbeute zu erzielen und das volle Potenzial einer bifacialen Anwendung von Tandem-Bauelementen zu nutzen.

Literaturverzeichnis (nur diese Manuskript)

1. Essig S, Allebé C, Remo T, Geisz JF, Steiner MA, Horowitz K, et al. Raising the one-sun conversion efficiency of III–V/Si solar cells to 32.8% for two junctions and 35.9% for three junctions. *Nat. Energy*. 2017;2:17144. doi:10.1038/nenergy.2017.144.
2. Rienäcker M, Schnabel M, Warren E, Merkle A, Schulte-Huxel H, Klein TR, et al. Mechanically Stacked Dual-Junction and Triple-Junction III-V/Si-IBC Cells with Efficiencies of 31.5 % and 35.4 %. In: ; 2017. doi:10.4229/EUPVSEC20172017-1AP.1.2.
3. Al-Ashouri A, Köhnen E, Li B, Magomedov A, Hempel H, Caprioglio P, et al. Monolithic perovskite/silicon tandem solar cell with 29% efficiency by enhanced hole extraction. *Science*. 2020;370:1300–9. doi:10.1126/science.abd4016.
4. Bobela DC, Schmieder KJ, Lumb MP, Moore JE, Walters RJ, Armour EA, et al. Demonstration of GaInP2/Si Voltage Matched Tandem Solar Cells. In: 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC); 25.06.2017 - 30.06.2017; Washington, DC: IEEE; 25.06.2017 - 30.06.2017. p. 2506–2510. doi:10.1109/PVSC.2017.8366407.
5. Gee JM. A comparison of different module configurations for multi-band-gap solar cells. *Solar Cells*. 1988;24:147–55. doi:10.1016/0379-6787(88)90044-0.
6. Schulte-Huxel H, Friedman DJ, Tamboli AC. String-Level Modeling of Two, Three, and Four Terminal Si-Based Tandem Modules. *IEEE J. Photovoltaics*. 2018;8:1370–5. doi:10.1109/JPHOTOV.2018.2855104.
7. Trupke T, Würfel P. Improved spectral robustness of triple tandem solar cells by combined series/parallel interconnection. *J. Appl. Phys.* 2004;96:2347. doi:10.1063/1.1766091.

8. Almansouri I, Ho-Baillie A, Bremner SP, Green MA. Supercharging Silicon Solar Cell Performance by Means of Multijunction Concept. *IEEE J. Photovoltaics*. 2015;5:968–76. doi:10.1109/JPHOTOV.2015.2395140.
9. Zhang D, Verhees W, Dörenkämper M, Qiu W, Bakker K, Gutjahr A, et al. Combination of advanced optical modelling with electrical simulation for performance evaluation of practical 4-terminal perovskite/c-Si tandem modules. *Energy Procedia*. 2016:to be published.
10. Gota F, Langenhorst M, Schmager R, Lehr J, Paetzold UW. Energy Yield Advantages of Three-Terminal Perovskite-Silicon Tandem Photovoltaics. *Joule*. 2020;4:2387–403. doi:10.1016/j.joule.2020.08.021.
11. Schnabel M, Schulte-Huxel H, Rienäcker M, Warren EL, Ndione PF, Nemeth B, et al. Three-terminal III–V/Si tandem solar cells enabled by a transparent conductive adhesive. *Sustainable Energy Fuels*. 2020;4:549–58. doi:10.1039/C9SE00893D.
12. Tockhorn P, Wagner P, Kegelmann L, Stang J-C, Mews M, Albrecht S, Korte L. Three-Terminal Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells with Top and Interdigitated Rear Contacts. *ACS Appl. Energy Mater*. 2020;3:1381–92. doi:10.1021/acsaem.9b01800.
13. Warren EL, Deceglie MG, Rienäcker M, Peibst R, Tamboli AC, Stradins P. Maximizing tandem solar cell power extraction using a three-terminal design. *Sustainable Energy Fuels*. 2018;2:1141–7. doi:10.1039/C8SE00133B.
14. Warren EL, McMahon WE, Rienäcker M, VanSant KT, Whitehead RC, Peibst R, Tamboli AC. A Taxonomy for Three-Terminal Tandem Solar Cells. *ACS Energy Lett*. 2020;5:1233–42. doi:10.1021/acseenergylett.0c00068.
15. McMahon W, Schulte-Huxel H, Buencuerpo J, Geisz J, Young M, Klein T, et al. Homogenous Voltage-Matched Strings Using Three-Terminal Tandem Solar Cells: Fundamentals and End Losses. *IEEE J. Photovoltaics*. 2021;11:1078–86. doi:10.1109/JPHOTOV.2021.3068325.
16. Lentine AL, Nielson GN, Okandan M, Cruz-Campa J-L, Tauke-Pedretti A. Voltage Matching and Optimal Cell Compositions for Microsystem-Enabled Photovoltaic Modules. *IEEE J. Photovoltaics*. 2014;4:1593–602. doi:10.1109/JPHOTOV.2014.2345437.
17. Schulte-Huxel H, Silverman TJ, Deceglie MG, Friedman DJ, Tamboli AC. Energy Yield Analysis of Multiterminal Si-Based Tandem Solar Cells. *IEEE J. Photovoltaics*. 2018;8:1376–83. doi:10.1109/JPHOTOV.2018.2846520.
18. Liu H, Rodríguez-Gallegos CD, Liu Z, Buonassisi T, Reindl T, Peters IM. A Worldwide Theoretical Comparison of Outdoor Potential for Various Silicon-Based Tandem Module Architecture. *Cell Reports Physical Science*. 2020;1:100037. doi:10.1016/j.xcrp.2020.100037.
19. Nagashima T, Okumura K, Murata K, Kimura Y. Three-terminal tandem solar cells with a back-contact type bottom cell. In: 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference; 15–22 Sept. 2000; Anchorage, AK, USA: IEEE; 2000. p. 1193–1196. doi:10.1109/PVSC.2000.916102.
20. Gharibzadeh S, Hossain IM, Fassel P, Nejand BA, Abzieher T, Schultes M, et al. 2D/3D Heterostructure for Semitransparent Perovskite Solar Cells with Engineered Bandgap Enables Efficiencies Exceeding 25% in Four-Terminal Tandems with Silicon and CIGS. *Adv. Funct. Mater*. 2020;30:1909919. doi:10.1002/adfm.201909919.
21. Witteck R, Blankemeyer S, Siebert M, Köntges M, Schulte-Huxel H. Partial shading of one solar cell in a photovoltaic module with 3-terminal cell interconnection. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2021;219:110811. doi:10.1016/j.solmat.2020.110811.

22. Zehender M, Antolín E, García-Linares P, Artacho I, Ramiro I, Villa J, Martí A. Module interconnection for the three-terminal heterojunction bipolar transistor solar cell:40013. doi:10.1063/1.5053521.
23. Uzu H, Koizumi G., Solar cell modul, International Patent Application No. PCT/JP2020/012359, 2020.
24. Schulte-Huxel H, Witteck R, Köntges M. Patent pending: Solarmodul mit 3-Terminal-Tandem-Solarzellen, 2022.
25. Bowring AR, Bertoluzzi L, O'Regan BC, McGehee MD. Reverse Bias Behavior of Halide Perovskite Solar Cells. Adv. Energy Mater. 2018;8:1702365. doi:10.1002/aenm.201702365.

2.2 Gegenüberstellung der Projektergebnisse mit den Projektzielen

Die in 27plus6 gesteckten Ziele (siehe auch Abschnitt 1.3)

- Demonstration von Leuchtturm-Wirkungsgraden > 27% für c-Si- Solarzellen
- Entwicklung der Verbindung zwischen Si-Bottom- und Perowskit-Topsolarzelle im Rahmen einer optimierten 3-Terminal Konfiguration
- Entwicklung einer semitransparenten Perowskit-Solarzelle mit Wirkungsgraden über 19% auf texturierten Oberflächen
- Demonstration von Leuchtturm-Wirkungsgraden > 33% für Si/Perowskit-Tandemsolarzellen
- Flexibilisierung der Herstellungsprozesse für POLO²-IBC-Solarzellen und Si/Perowskit-Tandemsolarzellen als Evaluierungsplattform für innovative Einzelprozesse der Industriepartner
- Wegbereitung für die Anwendung von Si/Perowskit-Tandemsolarzellen: Stabilitätsuntersuchungen (auf Zellniveau), CoO-Grundlagen, Demonstration einer 2T-Modulverschaltung der 3T-Tandemsolarzellen, Ertragsberechnungen

konnten lediglich teilweise erreicht werden. Alle Bausteine zur Verbesserung des POLO²-IBC-Zellprozess zur Demonstration von Wirkungsgraden >27% wurden adressiert und wesentliche Verbesserungen der Bausteine gezeigt. Allerdings führte die Verbesserung der implizierte Pseudo-Effizienz der Zellvorläufer nach der Front-End-Prozessierung auf >27,5% (Meilenstein 1.1.3) und die Minimierung der Back-End-Degradation auf <0,1% (Meilenstein 1.1.1) in der finalen Solarzelle lediglich zu einem Wirkungsgrad von 26%. Die entwickelten Konzepte zur Reduktion der Randeffekte wurden auf Lebensdauerproben getestet (Meilenstein 1.1.2), jedoch erwies sich die Integration auf Solarzellen mit höchsten Wirkungsgraden als schwierig. Zusammenfassend wurden sieben POLO²-IBC-Zellchargen mit insgesamt über zweihundert 4-Zoll-Wafern durchgeführt, die jeweils ca. 6 Monate in Anspruch nahmen und entsprechend eine geringe Lernrate auf Zellniveau erlaubten. Trotz engmaschigem Monitoring, zeigten sich Probleme in den einzelnen Prozessstadien z.B. Kontamination oder bei der Fotolithographie und das entsprechende Effizienzpotential sich erst nach einigen Monaten Bearbeitungszeit. Weiterhin ergaben sich die oben dargestellten parasitären Ladungseffekte auf der Rückseite der POLO²-IBC-Zellen, welche eine erneute Anpassung und damit Re-Optimierung des Zellprozesses benötigte. Zum Projektende wurden wegen Prozessinstabilitäten im Front-End-Prozess – trotz mehrfacher Anläufe – keine Zellvorläufer auf exzellentem Niveau ($\eta > 27\%$) mehr erreicht. Schlussendlich schätzen wir die Erreichbarkeit von POLO²-IBC-Solarzellen

mit einem Wirkungsgrad von 27% weiterhin als realistisch an, jedoch muss hierzu die Lernrate wesentlich gesteigert und damit die Prozesskomplexität und Herstelldauer gesenkt werden – ohne das Wirkungsgradpotential zu beeinträchtigen.

Die intensiven Entwicklungsarbeiten bei der POLO²-IBC-Einfachsolarzelle hatten zu jeder Zeit die Synergie zur Bottomsolarzelle im Blick, weshalb alle Verbesserungen direkt bei der Bottomsolarzell-Entwicklung einfließen. In AP2 wurden Bottomsolarzellen in unterschiedlichen Varianten hergestellt, Poly-Si-Tunndeldioden untersucht und erfolgreich integriert, unterschiedliche 3T-Konfigurationen betrachtet und die Unijunction-3T-POLO²-IBC-Bottomsolarzelle mit nanotexturiertem *n*POLO-Frontkontakt im Einvernehmen mit dem KIT ausgewählt und auf exzellentem Niveau hergestellt.

Bei der Entwicklung von koverdampften Methylammoniumbleiiodid-Solarzellen mit einer Bandlücke von ca. 1,6 eV konnte das ISFH einen Wirkungsgrad von 18,5% zeigen, welcher jedoch mit einer opaken Solarzelle und auf einer planaren Oberfläche erreicht wurde. Basierend darauf wurden Aufdampfprozesse für FAPbI₃ und FA-basierte Multi-Kationen-Multi-Anionen(MKMA)-Absorber entwickelt. Die koverdampften MKMA-Absorber erreichten einen Wirkungsgrad von lediglich ca. 10%. Die Absorbersynthese mittels Koverdampfen stellte sich – vor allem mit zunehmender Anzahl der Verdampferquellen – schwieriger und aufwendiger dar als im Projektantrag geplant/erhofft, weshalb am ISFH neben Koverdampfen die lösungsbasierte Absorbersynthese etabliert wurde und am KIT die lösungsbasierte Herstellung auf texturierten Oberflächen entwickelt wurde. Vor allem bei letzterer Entwicklung konnte das KIT einer semitransparenten Perowskit-Solarzelle mit einer Bandlücke von 1.58 eV und einem Wirkungsgrad von 21,6% auf einer texturierter 3T-Bottomsolarzelle herstellen.

Bei der Entwicklung von Tandemsolarzellen mit Wirkungsgraden >33% gab es starke Verzögerungen bei der Bottomsolarzellherstellung am ISFH und der Tandemzellherstellung am KIT. Diese waren bedingt durch pandemiebedingten Einstellungsverzögerungen, allgemeine Einschränkungen und Krankheitsausfälle, massive Verzögerungen bei der Instandsetzung von Anlagen aufgrund von Lieferengpässen als Folge der Pandemie und teilweisen Einschränkungen bei energieintensiven Prozessen und Laborschließungen aufgrund der Energiekriege. Nichtsdestotrotz wurden am ISFH mehrere Generationen an 2T Bottomsolarzellen mit planaren und texturierten Vorderseiten und mit ITO-RJ oder Poly-Si-TJ entwickelt und dem KIT zur Verfügung gestellt. Insgesamt wurden über 700 2T-Bottomsolarzellen der zweiten Generation, über 700 2T-Bottomsolarzellen der dritten Generation mit nanotexturierter Vorderseite und ITO-RJ, ca. 500 2T-Bottomsolarzellen der dritten Generation mit polierter Vorderseite und ITO-RJ, ca. 200 3T-Bottomsolarzellen und einige wenige 4T-Bottomsolarzellen (1cm², $\eta > 25\%$) zur Verfügung gestellt. Die 2T-Tandemsolarzellen mit texturierter Vorderseite erreichten einen Wirkungsgrad von 27.6% und mit einer polierten Vorderseite wurde ein Wirkungsgrad über 30% erreicht. Die 3T-Tandemsolarzellen mit einer PSC-Bandlücke von 1.68 eV erreichten in 2T- und 3T-Betrieb jeweils ca. 25% und mit einer PSC-Bandlücke von 1.58 eV einen Wirkungsgrad von 23% in 2T-Betrieb und 29.6% im 3T-Betrieb.

Der Tandemzellprozess bot eine gute Plattform für die involvierten Industriepartnern von Ardenne und Singulus. Mit beiden Partnern konnten erfolgreiche Zusammenarbeiten durchgeführt werden, in denen einzelnen Prozessen im Tandemzellprozess evaluiert werden konnten.

Die optimale Verschaltung von 3T-Tandemzellen zu 2T-Modulen wurde untersucht und klar auf der Ebene von Strings und Systemen dargelegt. Am KIT wurden Energieertragssimulationen auf Zell- und Stringebene durchgeführt.

3 ERFOLGTE ODER GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN DES ERGEBNISSES

Im Folgenden sind alle veröffentlichten Ergebnisse aufgelistet.

Veröffentlichungen in Fachzeitschriften:

- (i) R. C. Whitehead et al. "Optimization of four terminal rear heterojunction GaAs on Si interdigitated back contact tandem solar cells." *Applied Physics Letters* 118.18 (2021)
- (ii) M. Rienäcker, Y. Larionova, J. Krügener, S. Wolter, R. Brendel & R. Peibst (2021). Rear side dielectrics on interdigitating p+-(i)-n+ back-contact solar cells– hydrogenation vs. charge effects. *EPJ Photovoltaics*, 12, 6.
- (iii) J. Krügener, M. Rienäcker, S. Schäfer, M. Sanchez, S. Wolter, R. Brendel & R. Peibst (2021). Photonic crystals for highly efficient silicon single junction solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 233, 111337
- (iv) Robert Witteck, Susanne Blankemeyer, Michael Siebert, Marc Köntges, Henning Schulte-Huxel, Partial shading of one solar cell in a photovoltaic module with 3-terminal cell interconnection, Special Issue "SiliconPV2020" in *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 219, 110811 (2021)
- (v) J. F. Geisz, W. E. McMahon, J. Buencuerpo, M. S. Young, M. Rienäcker, A. C. Tamboli & E. L. Warren (2021). Characterization of multiterminal tandem photovoltaic devices and their subcell coupling. *Cell Reports Physical Science*, 2(12)
- (vi) R. Peibst, M. Rienäcker, Y. Larionova, N. Folchert, F. Haase, C. Hollemann, R. Brendel (2022). Towards 28%-efficient Si single-junction solar cells with better passivating POLO junctions and photonic crystals. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 238, 111560.
- (vii) K. T. VanSant, E. L. Warren, J. F. Geisz, T. R. Klein, S. Johnston, W. E. McMahon, A. C. Tamboli (2022). A performance comparison between GaInP-on-Si and GaAs-on-Si 3-terminal tandem solar cells. *Iscience*, 25(9).
- (viii) Robert Witteck, Susanne Blankemeyer, Michael Siebert, Marc Köntges, Henning Schulte-Huxel (2021), Partial shading of one solar cell in a photovoltaic module with 3-terminal cell interconnection, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 219, 110811
- (ix) H. Schulte-Huxel, R. Witteck, S. Blankemeyer, M. Köntges (2023). Optimal interconnection of three-terminal tandem solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 31(12), 1350-1359.
- (x) B. Grimm, S. J. Wolter, J. Schmidt (2023). Contactless quasi-steady-state photoconductance (QSSPC) characterization of metal halide perovskite thin films. *Scientific Reports*, 13(1), 11163.
- (xi) H. Hu et al. Triple-junction perovskite–perovskite–silicon solar cells with power conversion efficiency of 24.4%. *Energy & Environmental Science*, 2024, 17. Jg., Nr. 8, S. 2800-2814
- (xii) T. Katkus, S. Hock Ng, H. Mu, N. Hoai An Le, D. Stonyte, Z. Khajehsaeidimabadi, G. Seniutinas, J. Baltrukonis, O. Ulcinas, M. Mikutis, V. Sabonis, Y. Nishijima, M. Rienäcker, J. Krügener, R. Peibst, S. John, S. Juodkasis, Bessel-beam direct-write of the etch-mask in a nano-film of alumina for high-efficiency Si solar cells, *Advanced Engineering Materials*, under review
- (xiii) Leon Salomon, Michael Rienäcker, Robby Peibst, Jan Krügener, Optimisation of Photolithographic Fabrication of Photonic Crystals on Rough Wafers for High Efficiency Solar Cells, in preparation

Beiträge auf Fachkonferenzen:

- (i) M. Rienäcker, H. Schulte-Huxel, E. L. Warren, A. C. Tamboli, R. Peibst, Three-terminal tandem solar cells - an overview, TandemPV workshop, online (2020)
- (ii) M. Rienäcker, V. Titova, J. Schmidt, R. Peibst, Measuring selectivity and extraction efficiency: The three-terminal Suns-VOC method applied to an *n*-c-Si/SiO_y/TiO_x/Al junction, SiliconPV 2021, Hamelin
- (iii) J. Krügener, M. Rienäcker, S. Schäfer, M. Sanchez, S. Wolter, R. Brendel & R. Peibst. Photonic crystals for highly efficient silicon single junction solar cells, SiliconPV 2021, Hamelin
- (iv) R. Peibst, M. Rienäcker, Y. Larionova, N. Folchert, F. Haase, C. Hollemann, R. Brendel, Towards 28%-efficient Si single-junction solar cells with better passivating POLO junctions and photonic crystals, SiliconPV 2021, Hamelin
- (v) M. Rienäcker, V. Titova, J. Schmidt, R. Peibst, R. Brendel, Selectivity and Extraction Efficiency of Solar Cell Contacts: Comparing different definitions and their experimental quantification, MRS Fall Meeting 2021, Invited talk
- (vi) M. Rienäcker, Y. Larionova, J. Krügener, S. Wolter, R. Brendel, R. Peibst, Rear side dielectrics on interdigitating p⁺-(i)-n⁺ back-contact solar cells – hydrogenation, laser ablation and charge effects, 38th European PV Solar Energy Conference and Exhibition (2021)
- (vii) M. Diederich, S. Kajari-Schröder, S. J. Wolter, T. Wietler, D. Winter (2021). Modelling Perovskites with Reduced Absorption from Reflection Measurements of Perovskite Solar Cells. In Proceedings of 13th Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics (HOPV21)
- (viii) S. J. Wolter, V. Barnscheidt, M. Diederich, M. Rienäcker, T. Wietler, S. Kajari-Schröder, Refined Model for the Growth Mechanism of Perovskite Absorber Films from Vacuum Deposition, 2nd TandemPV workshop, 2022
- (ix) J. F. Geisz, W. E. McMahon, J. Buencuerpo, M. Rienäcker, A. C. Tamboli, E. L. Warren, Subcell coupling in tandem solar cells: measurements and modeling, TandemPV workshop 2022
- (x) S. Mack & M. Rienäcker, Tutorial 2: Passivating Contacts on Basis of Polycrystalline Silicon, SiliconPV 2022, online
- (xi) R. Peibst, C. Schwarz, Y. Larionova, S. Wolter, M. Rienäcker, T. Wietler, M. Diederich, R. Brendel. Interface between Poly-Si on Oxide Passivated Si Bottom and Perovskite Top Cells – Search for the Leanest and Best Working Layer Stack, Proceedings of the 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, S. 255 - 259, Milano, Italy, 2022.
- (xii) H. Schulte-Huxel, R. Witteck, S. Blankemeyer, M. Köntges, M. Rienäcker, S. Kajari-Schröder, R. Peibst, Cell-to-Module Losses of Three Terminal Tandem Solar Devices, Proceedings of the 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, S. 255 - 259, Milano, Italy, 2022
- (xiii) M. Rienäcker, V. Titova, J. Schmidt, R. Peibst, R. Brendel, Selectivity of solar cell contacts, SiliconFOREST workshop, Falkau, Germany, 2022
- (xiv) M. Rienäcker, J. Maksimovic, Y. Larionova, S. Hock Ng, T. Katkus, T. Pinedo Rivera, M. Stuißer, J. Krügener, F. Haase, R. Brendel, S. John, S. Juodkazis, R. Peibst, Integration of photonic crystals in highly efficient POLO²-IBC cells – interplay between structural, optical and electrical properties, SiliconPV, Delft, The Netherlands, 2023
- (xv) L. Salomon, M. Rienäcker, R. Peibst, J. Krügener, Optimisation of Photolithographic Fabrication of Photonic Crystals on Rough Wafers for High Efficiency Solar Cells, SiliconPV, Delft, The Netherlands, 2023
- (xvi) M. Rienäcker, S. Moghadamzadeh, P. Fassel, Y. Larionova, P. Noack, B. Wattenberg, U. W. Paetzold and R. Peibst, Towards a three-terminal perovskite/silicon tandem solar cell with highest efficiency, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Juan, Puerto Rico, 2023
- (xvii) M. Rienäcker, S. Moghadamzadeh, P. Fassel, Y. Larionova, P. Noack, B. Wattenberg, U. W. Paetzold and R. Peibst, Towards a three-terminal perovskite/silicon tandem solar cell with highest efficiency, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Juan, Puerto Rico, 2023

Abschlussarbeiten:

C. M. Sánchez Jordan, Optimierung von Oberflächenpassivierung auf Solarzellen und ihre optische und elektrische Charakterisierung, Masterarbeit 2021

C. Schwarz, Untersuchung der elektronischen Eigenschaften des Heteroübergangs von polykristallinem Silizium zu Löcher-sammelnden Schichten in monolithischen Perowskit/Silizium-Tandemsolarzellen, Masterarbeit 2022

Doktorarbeiten:

M Rienäcker, Three-terminal tandem solar cells enabled by back-contacted bottom cells featuring passivating, carrier-selective polysilicon-based junctions, 2022, Doktorarbeit, Leibniz Universität Hannover (DOI: 10.15488/11835)

4 VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE

4.1 Wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse

Das Projekt „27plus6“ hat Prozesse, Materialien und Verfahren entwickeln, um stabile und hocheffiziente Si-Einfach- und Perowskit-Si-Tandemsolarzellen herzustellen. Es wurde essentielles Know-How entwickelt, um diese innovative Technologie auf höchstem Wirkungsgradniveau zu evaluieren und ggf. verbessern zu können. Der generierte Wissensvorsprung ergibt direkten Nutzen für die deutsche Industrie, insbesondere für die beteiligten deutschen Industriepartner (Centrotherm in Bezug auf poly-Si-Abscheidung und $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ -Abscheidung, Singulus und vonArdenne in Bezug auf die Herstellung von Perowskit-Absorbern). Hervorzuheben ist die Entwicklung & Integration von Nanotexturen von Singulus in 2T- und 3T-Tandemsolarzellen mit Effizienzen nahe 30%, die im Nachgang an 27plus6 zum Bewerben der nasschemischen Anlagen und Kompetenzen von Singulus genutzt werden können. Mit der Firma von Ardenne konnte ein industrieller Trockenätzprozess zur Entfernung von parasitären dielektrischen Schichten auf dünnen POLO-Kontakten und anschließende TCO-Abscheidung auf Teststrukturen und Bottomsolarzellen evaluiert werden. Die Bottomsolarzellen sollen zu Tandemsolarzellen fertiggestellt werden und als Werbeplattform dienen.

Basierend auf diesen Erkenntnissen können die beteiligten Industriepartner ihre Anlagen und Einzelprozesse verbessern und sich so einen Wettbewerbsvorteil gegenüber asiatischen Mitbewerbern erarbeiten.

Ein weiterer indirekter Nutzen des „27plus6“ Vorhabens ist der Erhalt einer Spitzenstellung der deutschen PV-Forschung. Hierzu ist es neben der Bearbeitung von Themen mit kurzer Zeitskala für die potentielle Überführung in die Massenproduktion auch notwendig, in gewissem Umfang auch Vorlaufforschung zu betreiben. China als größter Wettbewerber betreibt inzwischen auch PV-Grundlagenforschung auf hohem Niveau. Si-basierte Tandemsolarzellen sind ein wichtiges Zukunftsthema, auf dem noch viele Innovationen möglich sind und Differenzierungsmöglichkeiten bestehen. Deshalb ist es besonders wichtig, schnell hochwertige Forschungsergebnisse zu

generieren und zu präsentieren, die die Spitzenstellung der deutschen PV-Forschung erhalten und belegen.

Schließlich können die Ergebnisse dieses Projekts durch Patentanmeldungen durch das ISFH verwertet werden. Dies ist sehr wünschenswert für die bevorzugte Lizenzierung an heutige und zukünftige deutsche und europäische Firmen in der PV. Beispielsweise wurde ein Patent zur Verschaltung von 3T-Tandemsolarzellen in Module eingereicht (WO2024061746A1). Da das Halten und vor allem die juristische Verteidigung von Patenten gegen Anfechtungen die Ressourcen eines relativ kleinen Institutes erfahrungsgemäß jedoch schnell überfordern kann, wurde mit wissenschaftlichen Veröffentlichungen des ISFH eventuelle Patentanmeldungen von (asiatischen) Wettbewerbern verhindern, und so die Technologieoptionen für die deutsche PV-Industrie offengehalten.

4.2 Wissenschaftliche Verwertung der Ergebnisse

Die große wissenschaftliche Relevanz der erarbeiteten Ergebnisse spiegelt sich in der hohen Zahl an Publikationen wider: Mit ISFH-Beteiligung entstanden 13 Artikel in renommierten peer-reviewed Fachzeitschriften, 17 Beiträge auf internationalen Konferenzen, sowie 2 studentische Abschlussarbeiten und eine Doktorarbeit. Drei der Konferenzbeiträge wurde auf der SiliconPV 2020 & SiliconPV 2021 als einer der besten 20 Beiträge ausgewählt und ins Special Issue der renommierten Fachzeitschrift Solar Energy Materials and Solar Cells eingeladen. Die Publikationen decken eine große Themenspannweite ab, die von der Erweiterung des Grundlagenverständnisses der Messprinzipien für 3T-Tandemsolarzellen und grundlegenden physikalischen Untersuchungen der Perowskit-Aufdampfprozesse, über die Anwendung neuartiger Photonischer Kristalle in Solarzellen, bis zu Verschaltung von 3T-Zellen in Modulen reicht. Während die „anwendungsbezogenen“ Publikationen wichtig für die Bewertung der wirtschaftlichen Relevanz von 3T-Tandemsolarzellen im Modul ist, hoffen wir mit den „grundlagenbezogenen“ Publikationen z.B. zur 3T-Thematik wichtige und bleibende Beiträge für das physikalische Verständnis von 3T-Tandems geleistet zu haben. Die in 27plus6 gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse, insbesondere zur Perowskittechnologie fließen nun in die weiteren Entwicklungsarbeiten zu Silizium-basierten Tandemsolarzellen am ISFH ein.

Einige im Ergebnisteil aufgeführten Arbeiten z.B. die Entwicklung des Trockenätzverfahrens mit der Firma vonArdenne oder die 3T-Bottom- und Tandemzellergebnisse befanden sich zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch in Vorbereitung auf eine Publikation.

4.3 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Das Projekt 27plus6 legte die Grundlagen für zahlreicher Anschlussmöglichkeiten und Projekte.

Hier sind die vom Land Niedersachsen geförderten Projekte NextGenPV (Photovoltaik der nächsten Generation – Niedersächsisches Kompetenznetzwerk, ZN4271) und FuturePV (Grundlagen Photovoltaik – Technologien der Zukunft) zu erwähnen, welche sich mit Pk/Si-Tandemsolarzellen der nächsten Generation – vor allem mit dem Fokus auf Stabilitätsaspekte – beschäftigt. Die in 27plus6 etablierte Kollaboration mit dem KIT kommt in NextGenPV zum Tragen.

Weiterhin werden die anfänglichen Arbeiten zu höchsteffizienten POLO²-IBC-Zellen mit verbesserter Lichteinkopplung mittels Photonischer Kristalle im Rahmen des EU-geförderten

Forschungsprojektes BURST (ID:101146684) weitergeführt und die internationale Kollaboration zwischen der Swinburne University of Technology (Australien), Melbourne Center for Nanofabrication (Australien), University of Toronto (Kanada) und dem Institut für Materialien und Bauelemente der Elektronik (Leibniz Universität Hannover) weitergeführt und verfestigt.

Die Weiterführung der erfolgreichen Zusammenarbeit mit den assoziierten Partnern von Ardenne und Singulus zu einzelnen Aspekten der Tandemsolarzellen in 27plus6 wäre im Rahmen von zukünftigen Bundesgeförderten Projekten wünschenswert.

Zusammenfassend lässt sich zu Abschnitt 4 sagen, dass die Aussichten für die Verwertung und die Anschlussfähigkeit der im Projekt 27plus6 erreichten Ergebnisse gut sind. Durch die im Projekt 27plus6 ausgebaute Vernetzung innerhalb der nationalen und internationalen Forschungslandschaft bleibt das ISFH für die Industriepartner auch in zukünftigen Entwicklungsprojekten zu Silizium-basierten Einfachsolarzellen und Tandemsolarzellen ein exzellenter Partner.

5 WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG DES VORHABENS DEM ZUWENDUNGSEMPFÄNGER BEKANNT GEWORDENER FORTSCHRITT AUF DIESEM GEBIET BEI ANDEREN STELLEN

Die Forschungsaktivitäten bei den c-Si-Rekordsolarzellen war im Projektzeitraum vor allem durch Forschungszentren der Industrie aus Asien geprägt. Das chinesische Unternehmen Longi ist dabei besonders herausgestochen, da es mit seinem Technologieportfolio Lichtturmergebnisse für viele Varianten von c-Si-Solarzellen erreicht hat. Beispielsweise ist die 26,8%-effiziente n-type HTJ - Solarzelle [102] zu nennen, welche den Rekord mit der 26,7%-effiziente HJT-IBC-Solarzelle von Kaneka ablöste. In Ref. [103] werden die Details der 26,8%-Zelle und weiterer Erfolge von Longi berichtet. Diese Solarzelle weist ein V_{OC} von 751,4mV, ein J_{SC} von 41,45mA/cm² und ein FF von 86,1% auf. Die hohe offene Klemmspannung von 751,4mV wird durch die hervorragende Passivierung aller Oberflächen und die Verwendung 130µm-dicker, leicht dotierter Wafer erreicht. Der resultierende FF von 86,1% deutet auch die exzellenten Rekombinationseigenschaften und den geringen Serienwiderstand der Solarzelle hin. Letztere wird durch die Verwendung von ladungsträgerselektiven Kontakten aus nanokristallinem Silizium erreicht. Zum Jahresende 2023 vermeldete Longi nochmals eine deutliche Verbesserung auf 27,1% [104] und im Mai 2024 nochmals eine Steigerung auf 27,3% [105], womit es seine Vorreiterrolle bei der Entwicklung von c-Si-Rekordzellen zementiert.

Die Forschungsaktivität bei den Perowskitsolarzellen und Perowskite/Silizium-Tandemsolarzellen im Projektzeitraum wird durch einige Zehntausend Publikationen bezeugt. Ref. [106] fasst die Fortschritte von emergenten Solarzellen zusammen. Vor allem interessant ist der Zusammenhang zwischen der Publikationstätigkeit einer Technologie und dem Wirkungsgrad, wo Perowskite-Solarzellen sowohl bei der (kumulierten) Gesamtzahl an Publikationen, als auch beim Wirkungsgrad zu c-Si aufschließt. Der Wirkungsgradrekord für Perowskit-Solarzellen konnte Anfang 2024 auf 26,1% erhöht werden [107] und resultiert aus einem aktuellen Trend den Perowskit-Absorber und die ladungsträgerselektiven Kontakte – also Defekte – durch Additive oder Oberflächenbehandlung zu passivieren. Im gleichen Tempo konnte auch der Wirkungsgrad von Perowskit/Siliziumsolarzellen erhöht werden. Der Wirkungsgradrekord wurde von 29,15% (HZB, 2020) bzw. 29,52% (OxfordPV, 2021) in 2020 auf 29,8% (HZB, 2021) und auf 31,25% (EPFL/CSEM, 2022) bzw. 32,5% (HZB, 2022)

in 2022 und auf 33,2% bzw. 33,7% (KAUST, 2023) in 2023 [108] und schließlich 33,9% (Longi, 2023) [109] Ende 2023 erhöht. Im Juni 2024 berichtete Longi sogar eine weitere Verbesserung auf 34,6% für eine kleine Laborsolarzelle [110] und sogar einen neuen Rekord von 30,1% für eine großflächige M6 Perowskit/Silizium-Tandemsolarzelle [111].

- 1 <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.20190923.pdf>, aufgerufen am 25.09.2019
- 2 M. A. Green, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, A. W. Y. Ho-Baillie, *Solar cell efficiency tables (version 54)*. Prog. Photovoltaics Res. Appl. 27, 565–575 (2019).
- 3 K. Yamamoto, K. Yoshikawa, H. Uzu, and D. Adachi, *High-efficiency heterojunction crystalline Si solar cells*, Japanese Journal of Applied Physics 57, 08RB20 (2018).
- 4 J. P. Mailoa, C. D. Bailie, E. C. Johlin, E. T. Hoke, A. J. Akey, W. H. Nguyen, M. D. McGehee, and T. Buonassisi, *A 2-terminal perovskite/silicon multijunction solar cell enabled by a silicon tunnel junction*, Applied Physics Letters 106, 121105 (2015).
- 5 D. T. Grant, K. R. Catchpole, K. J. Weber, & T. P. White *Design guidelines for perovskite/silicon 2-terminal tandem solar cells: an optical study*, Optics Express, 24 (22), A1454 (2016).
- 6 F. Sahli, B. A. Kamino, J. Werner, M. Bräuninger, B. Paviet-Salomon, L. Barraud, R. Monnard, J. P. Seif, A. Tomasi, Q. Jeangros, A. Hessler-Wyser, S. De Wolf, M. Despeisse, S. Nicolay, B. Niesen, C. Ballif, *Improved Optics in Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells with a Nanocrystalline Silicon Recombination Junction*. Adv. Energy Mater. 8, 1701609 (2018).
- 7 R. Peibst, M. Rienacker, B. Min, C. Klamt, R. Niepelt, T. F. Wietler, T. Dullweber, E. Sauter, J. Hubner, M. Oestreich, R. Brendel, *From PERC to Tandem: POLO- and $p + /n +$ Poly-Si Tunneling Junction as Interface Between Bottom and Top Cell*. IEEE J. Photovoltaics. 9, 49–54 (2019).
- 8 A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, T. Miyasaka, *Organometal, Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells*. J. Am. Chem. Soc. 131, 6050–6051 (2009).
- 9 S. De Wolf, J. Holovsky, S.-J. Moon, P. Löper, B. Niesen, M. Ledinsky, F.-J. Haug, J.-H. Yum, C. Ballif, *Organometallic Halide Perovskites: Sharp Optical Absorption Edge and Its Relation to Photovoltaic Performance*. J. Phys. Chem. Lett. 5, 1035–1039 (2014).
- 10 S. D. Stranks, G. E. Eperon, G. Grancini, C. Menelaou, M. J. P. Alcocer, T. Leijtens, L. M. Herz, A. Petrozza, H. J. Snaith, *Electron-Hole Diffusion Lengths Exceeding 1 Micrometer in an Organometal Trihalide Perovskite Absorber*. Science. 342, 341–344 (2013).
- 11 J. G. Tait, S. Manghooli, W. Qiu, L. Rakocevic, L. Kootstra, M. Jaysankar, C. A. Masse De La Huerta, U. W. Paetzold, R. Gehlhaar, D. Cheyns, P. Heremans, J. Poortmans, *Rapid composition screening for perovskite photovoltaics via concurrently pumped ultrasonic spray coating*. J. Mater. Chem. A. 4, 3792–3797 (2016).
- 12 L. Rakocevic, R. Gehlhaar, T. Merckx, W. Qiu, U. W. Paetzold, H. Fledderus, J. Poortmans, *Interconnection Optimization for Highly Efficient Perovskite Modules*. IEEE J. Photovoltaics. 7, 404–408 (2017).
- 13 F. Mathies, H. Eggers, B. S. Richards, G. Hernandez-Sosa, U. Lemmer, U. W. Paetzold, *Inkjet-Printed Triple Cation Perovskite Solar Cells*. ACS Appl. Energy Mater. 1, 1834–1839 (2018).

- 14 I. A. Howard, T. Abzieher, I. M. Hossain, H. Eggers, F. Schackmar, S. Ternes, B. S. Richards, U. Lemmer, U. W. Paetzold, *Coated and Printed Perovskites for Photovoltaic Applications*. Adv. Mater. 31, 1806702 (2019).
- 15 J. Ávila, C. Momblona, P. P. Boix, M. Sessolo, H. J. Bolink, *Vapor-Deposited Perovskites: The Route to High-Performance Solar Cell Production?*, Joule. 1, 431–442 (2017).
- 16 F. Sahli, J. Werner, B. A. Kamino, M. Bräuninger, R. Monnard, B. Paviet-Salomon, L. Barraud, L. Ding, J. J. Diaz Leon, D. Sacchetto, G. Cattaneo, M. Despeisse, M. Boccard, S. Nicolay, Q. Jeangros, B. Niesen, C. Ballif, *Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency*. Nat. Mater. 17, 820–826 (2018).
- 17 B. Chen, Z. Yu, K. Liu, X. Zheng, Y. Liu, J. Shi, D. Spronk, P. N. Rudd, Z. Holman, J. Huang, *Grain Engineering for Perovskite/Silicon Monolithic Tandem Solar Cells with Efficiency of 25.4%*. Joule. 3, 177–190 (2019).
- 18 E. Köhnen, M. Jošt, A. B. Morales-Vilches, P. Tockhorn, A. Al-Ashouri, B. Macco, L. Kegelman, L. Korte, B. Rech, R. Schlattmann, B. Stannowski, S. Albrecht, *Highly efficient monolithic perovskite silicon tandem solar cells: analyzing the influence of current mismatch on device performance*. Sustain. Energy Fuels. 3, 1995–2005 (2019).
- 19 K. A. Bush, S. Manzoor, K. Frohna, Z. J. Yu, J. A. Raiford, A. F. Palmstrom, H. P. Wang, R. Prasanna, S. F. Bent, Z. C. Holman, M. D. McGehee, *Minimizing Current and Voltage Losses to Reach 25% Efficient Monolithic Two-Terminal Perovskite-Silicon Tandem Solar Cells*. ACS Energy Lett. 3, 2173–2180 (2018).
- 20 M. Jaysankar, M. Filipič, B. Zielinski, R. Schmager, W. Song, W. Qiu, U. W. Paetzold, T. Aernouts, M. Debucquoy, R. Gehlhaar, J. Poortmans, *Perovskite–silicon tandem solar modules with optimised light harvesting*. Energy Environ. Sci. 11, 1489–1498 (2018).
- 21 S. Gharibzadeh, I. M. Hossain, P. Fassel, B. A. Nejad, T. Abzieher, M. Schultes, E. Ahlswede, P. Jackson, M. Powalla, S. Schäfer, M. Rienäcker, T. Wietler, R. Peibst, U. Lemmer, B. S. Richards, U. W. Paetzold, *2D/3D Heterostructure for Semi-transparent Perovskite Solar Cells with Engineered Bandgap Enables Efficiencies Exceeding 25% in 4-Terminal Tandems with Silicon and CIGS*. In preparation
- 22 D. Zhang, M. Najafi, V. Zardetto, M. Dörenkämper, X. Zhou, S. Veenstra, L. J. Geerligs, T. Aernouts, R. Andriessen, *High efficiency 4-terminal perovskite/c-Si tandem cells*. Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 188, 1–5 (2018).
- 23 C. O. Ramírez Quiroz, Y. Shen, M. Salvador, K. Forberich, N. Schrenker, G. D. Spyropoulos, T. Heumüller, B. Wilkinson, T. Kirchartz, E. Spiecker, P. J. Verlinden, X. Zhang, M. A. Green, A. Ho-Baillie, C. J. Brabec, *Balancing electrical and optical losses for efficient 4-terminal Si-perovskite solar cells with solution processed percolation electrodes*. J. Mater. Chem. A. 6, 3583–3592 (2018).
- 24 H. A. Dewi, H. Wang, J. Li, M. Thway, R. Sridharan, R. Stangl, F. Lin, A. G. Aberle, N. Mathews, A. Bruno, S. G. Mhaisalkar, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, in press, doi:10.1021/acsami.9b13145.
- 25 T. Duong, Y. Wu, H. Shen, J. Peng, X. Fu, D. Jacobs, E.-C. Wang, T. C. Kho, K. C. Fong, M. Stocks, E. Franklin, A. Blakers, N. Zin, K. McIntosh, W. Li, Y.-B. Cheng, T. P. White, K. Weber,

- K. Catchpole, *Rubidium Multication Perovskite with Optimized Bandgap for Perovskite-Silicon Tandem with over 26% Efficiency*. *Adv. Energy Mater.* 7, 1700228 (2017).
- 26 M. Jaysankar, B. A. L. Raul, J. Bastos, C. Burgess, C. Weijtens, M. Creatore, T. Aernouts, Y. Kuang, R. Gehlhaar, A. Hadipour, J. Poortmans, *Minimizing Voltage Loss in Wide-Bandgap Perovskites for Tandem Solar Cells*. *ACS Energy Lett.* 4, 259–264 (2019).
- 27 S. Ternes, T. Börnhorst, J. A. Schwenzler, I. M. Hossain, T. Abzieher, W. Mehlmann, U. Lemmer, P. Scharfer, W. Schabel, B. S. Richards, U. W. Paetzold, *Drying Dynamics of Solution-Processed Perovskite Thin-Film Photovoltaics: In Situ Characterization, Modeling, and Process Control*. *Adv. Energy Mater.* 1901581, 1901581 (2019).
- 28 R. Santbergen, R. Mishima, T. Meguro, M. Hino, H. Uzu, J. Blanker, K. Yamamoto, M. Zeman, *Minimizing optical losses in monolithic perovskite/c-Si tandem solar cells with a flat top cell*, *Opt. Express*. 24, A1288 (2016).
- 29 T. Abzieher, J. A. Schwenzler, S. Moghadamzadeh, F. Sutterluti, I. M. Hossain, M. Pfau, E. Lotter, M. Hetterich, B. S. Richards, U. Lemmer, M. Powalla, U. W. Paetzold, *Efficient All-Evaporated pin -Perovskite Solar Cells: A Promising Approach Toward Industrial Large-Scale Fabrication*, *IEEE J. Photovoltaics*. 9, 1249–1257 (2019).
- 30 B. Chen, Z. Yu, K. Liu, X. Zheng, Y. Liu, J. Shi, D. Spronk, P. N. Rudd, Z. Holman, J. Huang, *Grain Engineering for Perovskite/Silicon Monolithic Tandem Solar Cells with Efficiency of 25.4%*. *Joule*. 3, 177–190 (2019).
- 31 E. Köhnen, M. Jošt, A. B. Morales-Vilches, P. Tockhorn, A. Al-Ashouri, B. Macco, L. Kegelman, L. Korte, B. Rech, R. Schlatmann, B. Stannowski, S. Albrecht, *Highly efficient monolithic perovskite silicon tandem solar cells: analyzing the influence of current mismatch on device performance*. *Sustain. Energy Fuels*. 3, 1995–2005 (2019).
- 32 M. Jošt, E. Köhnen, A. B. Morales-Vilches, B. Lipovšek, K. Jäger, B. Macco, A. Al-Ashouri, J. Krč, L. Korte, B. Rech, R. Schlatmann, M. Topič, B. Stannowski, S. Albrecht, *Textured interfaces in monolithic perovskite/silicon tandem solar cells: advanced light management for improved efficiency and energy yield*, *Energy Environ. Sci.* 11, 3511–3523 (2018).
- 33 E. Köhnen, M. Jošt, A. B. Morales-Vilches, P. Tockhorn, A. Al-Ashouri, B. Macco, L. Kegelman, L. Korte, B. Rech, R. Schlatmann, B. Stannowski, S. Albrecht, *Highly efficient monolithic perovskite silicon tandem solar cells: analyzing the influence of current mismatch on device performance*. *Sustain. Energy Fuels*. 3, 1995–2005 (2019).
- 34 Shi, B., Liu, B., Luo, J., Li, Y., Zheng, C., Yao, X., Zhang, X., *Enhanced light absorption of thin perovskite solar cells using textured substrates*, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 168, 214–220 (2017).
- 35 F. Sahli, J. Werner, B. A. Kamino, M. Bräuninger, R. Monnard, B. Paviet-Salomon, L. Barraud, L. Ding, J. J. Diaz Leon, D. Sacchetto, G. Cattaneo, M. Despeisse, M. Boccard, S. Nicolay, Q. Jeangros, B. Niesen, C. Ballif, *Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency*. *Nat. Mater.* 17, 820–826 (2018).
- 36 M. Liu, M. B. Johnston, H. J. Snaith, *Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition*, *Nature*. 501, 395–398 (2013).

- 37 F. Palazon, D. Pérez-del-Rey, B. Dänekamp, C. Dreessen, M. Sessolo, P. P. Boix, H. J. Bolink, *Room-Temperature Cubic Phase Crystallization and High Stability of Vacuum-Deposited Methylammonium Lead Triiodide Thin Films for High-Efficiency Solar Cells*, *Adv. Mater.* 1902692, 1902692 (2019).
- 38 S.-Y. Hsiao, H.-L. Lin, W.-H. Lee, W.-L. Tsai, K.-M. Chiang, W.-Y. Liao, C.-Z. Ren-Wu, C.-Y. Chen, H.-W. Lin, *Efficient All-Vacuum Deposited Perovskite Solar Cells by Controlling Reagent Partial Pressure in High Vacuum*, *Adv. Mater.* 28, 7013–7019 (2016).
- 39 T. Abzieher, S. Moghadamzadeh, F. Schackmar, H. Eggers, F. Sutterlüti, A. Farooq, D. Kojda, K. Habicht, R. Schmager, A. Mertens, R. Azmi, L. Kloth, J. A. Schwenzler, M. Hetterich, U. Lemmer, B. S. Richards, M. Powalla, U. W. Paetzold, *Electron-Beam-Evaporated Nickel Oxide Hole Transport Layers for Perovskite-Based Photovoltaics*, *Adv. Energy Mater.* 9, 1802995 (2019).
- 40 T. Leijtens, K. A. Bush, R. Prasanna, M. D. McGehee, *Opportunities and challenges for tandem solar cells using metal halide perovskite semiconductors*, *Nat. Energy.* 3, 828–838 (2018).
- 41 J. Lehr, M. Langenhorst, R. Schmager, S. Kirner, U. Lemmer, B. S. Richards, C. Case, U. W. Paetzold, *Energy yield modelling of perovskite/silicon two-terminal tandem PV modules with flat and textured interfaces*, *Sustain. Energy Fuels.* 2, 2754–2761 (2018).
- 42 M. Langenhorst, B. Sautter, R. Schmager, J. Lehr, E. Ahlswede, M. Powalla, U. Lemmer, B. S. Richards, U. W. Paetzold, *Energy yield of all thin-film perovskite/CIGS tandem solar modules*, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 27, 290–298 (2019).
- 43 E. L. Warren, M. G. Deceglie, P. Stradins, and A. C. Tamboli, *Modeling Three-Terminal III-V/Si Tandem Solar Cells*, *Proceedings of the 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, (2017)
- 44 1. E. L. Warren, M. G. Deceglie, M. Rienäcker, R. Peibst, A. C. Tamboli, P. Stradins, *Maximizing tandem solar cell power extraction using a three-terminal design*. *Sustain. Energy Fuels.* 2, 1141–1147 (2018).
- 45 M. Rienäcker, M. Schnabel, E. Warren, A. Merkle, H. Schulte-Huxel, T. R. Klein, M. F. A. M. van Hest, M. A. Steiner, J. Geisz, S. Kajari-Schröder, R. Niepelt, J. Schmidt, R. Brendel, P. Stradins, A. Tamboli, and R. Peibst, *Current-matching of monolithic tandem cells by using interdigitated back contact bottom cells with three terminals*, presented as plenary at the 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, (2017).
- 46 1. M. Rienäcker, E. L. Warren, M. Schnabel, H. Schulte-Huxel, R. Niepelt, R. Brendel, P. Stradins, A. C. Tamboli, R. Peibst, *Back-contacted bottom cells with three terminals: Maximizing power extraction from current-mismatched tandem cells*. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 27, 410–423 (2019).
- 47 M. Rienäcker, M. Schnabel, E. Warren, A. Merkle, H. Schulte-Huxel, T. R. Klein, M. F. A. M. van Hest, M. A. Steiner, J. Geisz, S. Kajari-Schröder, R. Niepelt, J. Schmidt, R. Brendel, P. Stradins, A. Tamboli, and R. Peibst, *Mechanically Stacked Dual-Junction and Triple-Junction III-V/Si-IBC Cells with Efficiencies of 31.5 % and 35.4 %*, in *Proceedings of the 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp. 1–4 (2017).
- 48 M. Schnabel, M. Rienäcker, A. Merkle, T. R. Klein, N. Jain, S. Essig, H. Schulte-Huxel, E. Warren, M. F. A. M. van Hest, J. Geisz, J. Schmidt, R. Brendel, R. Peibst, P. Stradins, and A. C. Tamboli, *III-V/Si Tandem Cells Utilizing Interdigitated Back Contact Si Cells and Varying Terminal Configurations*, in *Proceedings of the 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, (2017).

- 49 M. Schnabel, H. Schulte-Huxel, M. Rienäcker, E. L. Warren, T. R. Klein, M. F. A. M. van Hest, J. F. Geisz, R. Peibst, P. Stradins, and A. C. Tamboli, *Three-Terminal III-V/Si Tandem Solar Cells Enabled by a Transparent Conductive Adhesive*, Energy & Environmental Science, submitted, (2018).
- 50 M. Schnabel, M. Rienacker, E. L. Warren, J. F. Geisz, R. Peibst, P. Stradins, A. C. Tamboli, *Equivalent Performance in Three-Terminal and Four-Terminal Tandem Solar Cells*. IEEE J. Photovoltaics. 8, 1584–1589 (2018).
- 51 1. H. Schulte-Huxel, D. J. Friedman, A. C. Tamboli, *String-Level Modeling of Two, Three, and Four Terminal Si-Based Tandem Modules*. IEEE J. Photovoltaics. 8, 1370–1375 (2018).
- 52 M. Rienäcker, M. Schnabel, E. Warren, A. Merkle, H. Schulte-Huxel, T. R. Klein, M. F. A. M. van Hest, M. A. Steiner, J. Geisz, S. Kajari-Schröder, R. Niepelt, J. Schmidt, R. Brendel, P. Stradins, A. Tamboli, and R. Peibst, *Current-matching of monolithic tandem cells by using interdigitated back contact bottom cells with three terminals*, presented as plenary at the 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, (2017).
- 53 1. E. L. Warren, M. G. Deceglie, M. Rienäcker, R. Peibst, A. C. Tamboli, P. Stradins, *Maximizing tandem solar cell power extraction using a three-terminal design*. Sustain. Energy Fuels. 2, 1141–1147 (2018).
- 54 M. Rienäcker, M. Schnabel, E. Warren, A. Merkle, H. Schulte-Huxel, T. R. Klein, M. F. A. M. van Hest, M. A. Steiner, J. Geisz, S. Kajari-Schröder, R. Niepelt, J. Schmidt, R. Brendel, P. Stradins, A. Tamboli, and R. Peibst, *Current-matching of monolithic tandem cells by using interdigitated back contact bottom cells with three terminals*, presented as plenary at the 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, (2017).
- 55 1. M. Rienäcker, E. L. Warren, M. Schnabel, H. Schulte-Huxel, R. Niepelt, R. Brendel, P. Stradins, A. C. Tamboli, R. Peibst, *Back-contacted bottom cells with three terminals: Maximizing power extraction from current-mismatched tandem cells*. Prog. Photovoltaics Res. Appl. 27, 410–423 (2019).
- 56 1. M. Rienäcker, E. L. Warren, M. Schnabel, H. Schulte-Huxel, R. Niepelt, R. Brendel, P. Stradins, A. C. Tamboli, R. Peibst, *Back-contacted bottom cells with three terminals: Maximizing power extraction from current-mismatched tandem cells*. Prog. Photovoltaics Res. Appl. 27, 410–423 (2019).
- 57 J. M. Gee, *A comparison of different module configurations for multi-band-gap solar cells*, Sol. Cells, 24 (8), pp. 147–155, (1988).
- 58 J. M. Gee, *Novel two- and three-junction monolithic multijunction solar cells**, Tech. Dig. 2nd Int. Photovolt. Sci. Eng. Conf., Beijing, China, PVSEC, no. 2, p. 584, (1986).
- 59 P. G. Borden, (1984), United States Patent Number 4,513,168
- 60 R. Santbergen, H. Uzu, K. Yamamoto, M. Zeman, *Optimization of Three-Terminal Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells*, IEEE J. Photovoltaics. 9, 446–451 (2019).
- 61 R. Peibst et al. "Towards 28%-efficient Si single-junction solar cells with better passivating POLO junctions and photonic crystals." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 238 (2022): 111560
- 62 A. Fell, "A free and fast three-dimensional/two-dimensional solar cell simulator featuring conductive boundary and quasi-neutrality approximations," *IEEE Transactions on Electron Devices*, **60**, pp. 733–738, 2013

- 63 C. Hollemann et al., "26.1%-efficient POLO-IBC cells: Quantification of electrical and optical loss mechanisms." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 27.11 (2019): 950-958.
- 64 R. Brendel et al., "Theory of analyzing free energy losses in solar cells." *Applied Physics Letters* 93.17 (2008).
- 65 R. M. Swanson, R. A. Sinton, (1990). High-Efficiency Silicon Solar Cells. In: Böer, K.W. (eds) *Advances in Solar Energy*. *Advances in Solar Energy*, vol 6. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9948-3_4
- 66 C. Hollemann et al., "26.1%-efficient POLO-IBC cells: Quantification of electrical and optical loss mechanisms." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 27.11 (2019): 950-958
- 67 C. Hollemann et al., "26.1%-efficient POLO-IBC cells: Quantification of electrical and optical loss mechanisms." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 27.11 (2019): 950-958
- 68 S. Bhattacharya, Sajeev John, *Scientific Reports* **9**, 12482 (2019)
- 69 M.K. Stodolny et al., *Proc. of the 35th EUPVSEC*, 414 (2018)
- 70 A. Grove and D. Fitzgerald, "Surface effects on pn junctions: Characteristics of surface space-charge regions under non-equilibrium conditions," *Solid-State Electronics*, vol. 9, no. 8, pp. 783–806, 1966.
- 71 J. Y. W. Seto, "The electrical properties of polycrystalline silicon films," *Journal of Applied Physics*, vol. 46, no. 12, pp. 5247–5254, 1975. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.321593>
- 72 B. Tyagi and K. Sen, "On the resistivity of polycrystalline silicon," *physica status solidi (a)*, vol. 80, no. 2, pp. 679–684, 1983
- 73 C. H. Seager, "Grain boundaries in polycrystalline silicon," *Annual Review of Materials Science*, vol. 15, no. 1, pp. 271–302, 1985. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1146/annurev.ms.15.080185.001415>
- 74 H. N. Chern, C. L. Lee, and T. F. Lei, "An analytical model for the above-threshold characteristics of polysilicon thin-film transistors," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 42, no. 7, pp. 1240–1246, 1995
- 75 M. K. H. Mark Stewart, "High performance gated lateral polysilicon PIN diodes," *Solid-State Electronics*, vol. 44, no. 9, pp. 1613–1619, sep 2000. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038110100001106>
- 76 F. Haase et al., Laser contact openings for local poly-Si-metal contacts enabling 26.1%-efficient POLO-IBC solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 186, 184-193 (2018)
- 77 M. Rienäcker et al., *Rear side dielectrics on interdigitating p⁺-(i)-n⁺ back-contact solar cells—hydrogenation vs. charge effects*. *EPJ Photovoltaics*, 12, 6 (2021)
- 78 M. Rienäcker et al., *Rear side dielectrics on interdigitating p⁺-(i)-n⁺ back-contact solar cells—hydrogenation vs. charge effects*. *EPJ Photovoltaics*, 12, 6 (2021)
- 79 Krügener J, Rienäcker M, Schäfer S, Sanchez M, Wolter S, Brendel R, John S, Osten HJ, Peibst R. Photonic crystals for highly efficient silicon single junction solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2021;233:111337, doi:10.1016/j.solmat.2021.111337
- 80 J. Maksimovic et al. "Beyond Lambertian light trapping for large-area silicon solar cells: Fabrication methods." *Opto-Electronic Advances* 5.9: 210086-1 (2022)
- 81 Krügener J, Rienäcker M, Schäfer S, Sanchez M, Wolter S, Brendel R, John S, Osten HJ, Peibst R. Photonic crystals for highly efficient silicon single junction solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2021;233:111337, doi:10.1016/j.solmat.2021.111337
- 82 L. Salomon, M. Rienäcker, R. Peibst, J. Krügener, Optimisation of Photolithographic Fabrication of Photonic Crystals on Rough Wafers for High Efficiency Solar Cells, in preparation
- 83 S. Gharibzadeh et al., *EES*, 2021
- 84 X. Zheng et al., *Nature Energy*, 2020
- 85 J. Tong et al., *ACS Energy Letters*, 2020
- 86 A. Forgas et al., *ACS AEM*, 2022

- 87 B. Chen *et al.*, *Joule*, 2020
- 88 Y. Hou *et al.*, *Science*, 2020
- 89 J. Liu, *et al.*, *Joule*, 2021
- 90 M. Rienäcker *et al.*, *PiP*, 2019
- 91 M. Rienäcker *et al.* in *IEEE PVSC*, 2019
- 92 P. Stradins *et al.*, in *IEEE PVSC*, 2019
- 93 E. L. Warren *et al.*, *ACS Energy Letters*, 2020
- 94 M. Rienäcker, Ph.D. thesis, Universität Hannover, 2022
- 95 Thorsten Dullweber, Maximilian Stöhr, Christian Kruse, Felix Haase, Martin Rudolph, Birgit Beier, Philip Jäger, Verena Mertens, Robby Peibst, Rolf Brendel, Evolutionary PERC+ solar cell efficiency projection towards 24% evaluating shadow-mask-deposited poly-Si fingers below the Ag front contact as next improvement step, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 212, 2020, 110586
- 96 Y. Larionova, M. Turcu, S. Reiter, R. Brendel, D. Tetzlaff, J. Krügener, T. Wietler, U. Höhne, J.-D. Kähler, and R. Peibst, "On the recombination behavior of p⁺-type polysilicon on oxide junctions deposited by different methods on textured and planar surfaces," *physica status solidi (a)*, vol. 214, no. 8, p. 1700058 (2017)
- 97 Farag, A.; Schmager, R.; Fassel, P.; Noack, P.; Wattenberg, B.; Dippell, T.; Paetzold, U. W., Efficient Light Harvesting in Thick Perovskite Solar Cells Processed on Industry-Applicable Random Pyramidal Textures (2022), *ACS Applied Energy Materials*, 5 (6), 6700–6708
- 98 Kevin A. Bush, Kyle Frohna, Rohit Prasanna, Rachel E. Beal, Tomas Leijtens, Simon A. Swifter, and Michael D. McGehee, "Compositional Engineering for Efficient Wide Band Gap Perovskites with Improved Stability to Photoinduced Phase Segregation", *ACS Energy Letters* **2018** 3 (2), 428-435
- 99 Daniel J. Slotcavage, Hemamala I. Karunadasa, and Michael D. McGehee, *ACS Energy Letters*, **2016** 1 (6), 1199-1205
- 100 Amran Al-Ashouri *et al.*, Monolithic perovskite/silicon tandem solar cell with >29% efficiency by enhanced hole extraction. *Science* 370,1300-1309(2020)
- 101 R. Clausing *et al.*, "Utilizing a Soft IZO Sputtering Process to Contact Buffer-Free Semitransparent Perovskite Pin Solar Cells," *2023 IEEE 50th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, San Juan, PR, USA, 2023
- 102 M. A. Green *et al.*, Solar cell efficiency tables (Version 61), *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Volume 31, Issue 1 p. 3-16 (2022)
- 103 Lin, H., Yang, M., Ru, X. *et al.* Silicon heterojunction solar cells with up to 26.81% efficiency achieved by electrically optimized nanocrystalline-silicon hole contact layers. *Nat Energy* **8**, 789–799 (2023)
- 104 Longi press release, December 18, 2023, <https://www.longi.com/en/news/heterojunction-back-contact-battery/>
- 105 Longi press release, May 7, 2024, <https://www.longi.com/en/news/longi-hi-mo9-bc-world-record/>
- 106 O. Almora *et al.*, Device Performance of Emerging Photovoltaic Materials (Version 4), *Advanced Energy Materials*, Volume 14, Issue 4 2303173
- 107 Hao Chen *et al.*, Improved charge extraction in inverted perovskite solar cells with dual-site-binding ligands. *Science* 384,189-193(2024)
- 108 NREL efficiency charts, <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- 109 Longi press release, November 3, 2023, <https://www.longi.com/en/news/new-world-record-for-the-efficiency-of-crystalline-silicon-perovskite-tandem-solar-cells/>
- 110 Longi press release, June 14, 2024, <https://www.longi.com/en/news/2024-snec-silicon-perovskite-tandem-solar-cells-new-world-efficiency/>

111 Longi press release, June 19, 2024, <https://www.longi.com/en/news/is-m6-wafer-silicon-perovskite-tandem-cells-new-efficiency-record/>