

Abschlussbericht SWiTch

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Zuwendungsempfänger:	Oxford PV Germany GmbH
Förderkennzeichen:	03EE1067B
Vorhaben:	Verbundvorhaben: SWiTch – Smart Wire Connection Technology für Perowskit-Tandem-Solarzellen Teilvorhaben: Entwicklung der Top-Zelle
Laufzeit des Vorhabens:	01.08.2020 - 30.06.2022
Verfasser / Datum:	Dr. Alexei Richter / 13.02.2023

1. Aufgabenstellung

Die Aufgabe des Verbundvorhabens SWiTch bestand zu Beginn des Vorhabens in dem Aufbau und der Weiterentwicklung einer Produktionslinie für neuartige Perowskit-Silizium-Tandem-Solarzellen (PVST) durch die Oxford PV Germany GmbH in Brandenburg an der Havel. Außerdem sollte eine Verschaltungs- sowie Modulintegrationslösung mit Smart Wire (SWCT) Drahtverschaltung und Niedertemperatur-Lamination für diese Solarzellen entwickelt werden. Wesentliches Projektziel war die Demonstration einer schädigungsfreien, langzeitstabilen Modultechnologie bei geringen Zelle-zu-Modul-Verlusten und industrierelevantem Durchsatz. Auf Basis von Zellwirkungsgraden zwischen 25 % und 27 % sollten Module (60-Zeller) mit hohen Leistungen realisiert werden, um zu einer deutlichen Reduzierung der „Levelized Costs of Electricity“ (LCOE) der Photovoltaik beizutragen.

Wesentliche Ziele des Teilvorhabens waren die Weiterentwicklung der Tandem-Zellentechnologien zur Erreichung von Wirkungsgraden >27 % auf industriell relevanten Waferformaten. Dazu gehörten sowohl Optimierungen im Bereich der Heterojunction Technology(HJT)-Zelle als Bottomzelle als auch die Erhöhung der möglichen Durchsätze bei der Herstellung der Topzelle und der Charakterisierung der Tandemzelle. Ein weiteres wesentliches Ziel war die Analyse und Verbesserung der Zuverlässigkeit von Tandemzellen in Mini-Modulen.

Diese Aufgabenstellung wurde im Projektverlauf dahingehend angepasst, dass alternative Modultechnologien zur SWCT in den Fokus der Entwicklungen gerückt sind.

2. Voraussetzungen der Durchführung

Oxford PV wurde im Jahr 2010 unter anderem von Henry Snaith, einem der Pioniere der PWSK-Technologie für die Photovoltaik. Nach dieser Entdeckung wurde sich schnell auf die Tandem-Technologie fokussiert am F&E Standort in Oxford, an dem heute [REDACTED] Mitarbeiter tätig sind. Zu Beginn des Projekts stand dort eine Technologie bereit, die in etwa 28 % Wirkungsgrad auf kleiner Fläche (ca. 1 cm²) ermöglichte. Im Jahr 2019 beschloss Oxford PV Germany den Aufbau einer HJT-Produktionslinie und die Entwicklung und Installation von entsprechenden Perowskit (PWSK)-Produktionsanlagen in Brandenburg für die integrierte Tandemzellfertigung. Die Anlieferung der HJT-Anlagen begann schließlich Anfang 2020. Unmittelbar vor Projektbeginn lag der Wirkungsgrad in Brandenburg bei [REDACTED]. Am Standort in Brandenburg waren zu dieser Zeit [REDACTED] Mitarbeiter beschäftigt, aktuell sind [REDACTED] Mitarbeiter.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Es war im Arbeitspaket 2 (AP2 – „Entwicklung der HJT-Bottom-Zelle“) geplant, die industrielle HJT-Technologie so anzupassen, dass diese optimal als Bottomzellen in der Konfiguration mit einer PWSK-Topzelle eingesetzt werden können. Dazu gehörten sowohl die Optimierung von bereits genutzten Einzelschichten als auch die Entwicklung neuartiger bzw. Tandemzellen-spezifischer Schichten für die Bottomzelle. Ursprünglich sollte diese Weiterentwicklung zu einem Großteil bei Oxford PV in Brandenburg stattfinden. Hier kam es zu erheblichen Verzögerungen beim Aufbau der HJT-Produktionsanlagen und deren Inbetriebnahme durch die Folgen der COVID-19-Pandemie und durch die strategische Neuausrichtung eines Anlagenlieferanten zu Beginn des Projektes. Dadurch wurde die experimentelle Ausführung der Optimierung der Bottomzellen zunächst extern durchgeführt und konnte anschließend teilweise auch intern weitergeführt werden. Als ein wichtiger Teilespekt der Bottomzelle sollte die Oberflächentopographie der Bottomzelle gezielt optimiert werden, um eine bestmögliche Integration der Topzelle zu ermöglichen. Eine verzögerte Inbetriebnahme der hierzu benötigten nasschemischen Anlagen als Teil der HJT-Produktionsanlagen führte dazu, dass die Arbeiten in diesem Unterarbeitspaket reduziert und soweit möglich in Zusammenarbeit mit externen Partnern durchgeführt wurden. Dadurch freigewordene Kapazitäten

wurden überwiegend im Arbeitspaket 3 eingesetzt. Ein weiterer Fokus lag auf der Analyse von Randeffekten und deren Anpassung für die Tandemzelle. Hier konnten wichtige Randeffekte identifiziert und teilweise auch berücksichtigt werden. Dabei wurden sowohl Effekte identifiziert, die unmittelbar aus der Herstellung der Bottomzelle resultieren als auch Effekte der Topzellenprozesse, die durch Anpassungen der Bottomzellenfertigung mitigiert werden konnten. Trotz der Einschränkungen konnte die Weiterentwicklung der Bottomzelle in AP2 erfolgreich durchgeführt werden und so wurde auch der Meilenstein MS2-6 zur Entwicklung einer Bottomzelle mit angepasster n-Schicht bei $V_{oc} > 730$ mV und $FF > 75\%$ termingetreu erreicht.

Ein weiterer Schwerpunkt des Teilvorhabens lag in dem Arbeitspaket 3 (AP3 – „Erste Industrialisierung der Herstellung von Perowskit-Top-Zellen“). Hierin sollten die einzelnen Teilarbeitspakte dazu beitragen, die Fertigung von PWSK-HJT-Tandemsolarzellen bei industrierelevanten Durchsätzen zu ermöglichen. Die meisten Teilarbeitspakte in AP3 wurden dadurch erheblich beeinflusst, dass die Anlieferung der geplanten Hochdurchsatzanlagen für die Topzellenfertigung sich während der Projektlaufzeit immer wieder verspätete und schließlich erst nach der Ende der verlängerten Projektlaufzeit erfolgte. Dadurch mussten alle geplanten Arbeiten mit der Laborlinie in Brandenburg durchgeführt werden und teilweise waren deutliche Anpassungen der ursprünglichen Planung nötig.

In AP3 wurden unter anderem Konzepte erarbeitet und erprobt, die eine durchsatzoptimierte Prozessierung ermöglichen, wobei z. B. die besonderen Anforderungen an die Zwischenlagerbedingungen der Tandemzellen untersucht und einbezogen wurden. Diese Konzepte mussten im Projektverlauf schließlich für die Laborlinie in Brandenburg abgeändert werden. Dadurch ließen sich die Anzahl an produzierten Tandemzellen von ca. [REDACTED] zu Projektbeginn auf einen maximalen Durchsatz auf [REDACTED] Tandemzellen pro Woche steigern. Damit konnte der in der Projektverlängerung angepasste Meilenstein MS3-23 (bzw. MS3-15) „Durchsatz von [REDACTED]“ erreicht werden. Weiterhin wurden im AP3 Anpassungen der Topzelle an die Anforderungen der SWCT vorgenommen. Besonders lagen hier die Metallisierung und die elektrischen Eigenschaften der transparenten leitenden Kontaktsschicht (TCO) im Fokus. Diese Anpassungen ließen sich in der zweiten Hälfte der Projektlaufzeit auch erfolgreich auf die Anwendung in Schindelmodulen übertragen. Insgesamt sollten in AP3 [REDACTED] Tandemzellen für die Herstellung von 60-Zell Modulen in SWCT-Verschaltung produziert werden, was unter Einbeziehung weiterer Modultechnologien innerhalb der erweiterten Projektlaufzeit gelang, obwohl die ursprünglichen Hochdurchsatzanlagen für die Produktion der Topzelle nicht verfügbar waren. Dies bedingte einen erheblichen personellen Mehraufwand in der Produktion dieser Zellen, die unter anderem durch verringerte Aufwendungen in dem Teilarbeitspaket 2.5 kompensiert werden konnten. Insgesamt konnte dadurch der Meilenstein MS3-23 (bzw. MS3-18) „Mindestens [REDACTED] Tandemzellen für Modulproduktion hergestellt“ erreicht werden.

Teil der Arbeiten in AP3 war auch eine Optimierung der Messung der Strom-Spannungskennlinie der Tandemsolarzellen, um die Zellen bei höheren Durchsätzen dennoch möglichst genau charakterisieren zu können. Ein weiterer Fokus lag in der Untersuchung und Optimierung der Versandbedingungen von Tandemzellen in größeren Stückzahlen wie sie für die Herstellung großformatiger Module benötigt werden. Im Unterarbeitspaket AP3.5 wurde das Light Soaking von PWSK-HJT-Tandems untersucht. Hier konnten wichtige Erkenntnisse zur optimalen Abstimmung zwischen einem Light Soaking Prozess (Homogenität, Dauer, Timing) und einer Hochdurchsatz-IV-Charakterisierung erarbeitet werden, die Durchsätze von über 2000 Zellen pro Stunde ermöglichen.

Ein wichtiger Schwerpunkt des AP3 lag außerdem in der Fertigung von kleinformatigen Modulen/ Einzelzelllaminaten. Die Arbeiten in diesem Bereich wurden bedingt durch die verzögerte Umstellung auf hochdurchsatzfähige Anlagen und gleichzeitige Einsparungen im Arbeitspaket 2 erheblich ausgeweitet. Dadurch war es über die gesamte Projektlaufzeit hin möglich relevante

Stückzahlen an Modulen für die Degradationstests bereitzustellen und erhebliche Fortschritte in dem Degradationsverhalten von PWSK-HJT-Tandemzellen im Laminat/Modul zu erreichen. So konnte auch der Meilenstein MS8-18 „Demonstration einer Leistungsminderung <5 % bei 1000 h im Damp Heat, 200 h im LeTID und 200 Temperaturzyklen“ innerhalb der Projektlaufzeit erreicht werden.

Insgesamt konnten die Arbeiten in den Arbeitspaketen 2 und 3 erheblich dazu beitragen, dass der Wirkungsgrad der großformatigen PWSK-HJT-Tandemzellen innerhalb der Projektlaufzeit auf über 27 % angehoben werden konnte. Damit wurde auch der Meilenstein MS3-20 (bzw. MS3-18) „M4 Tandemzelle mit mindestens 27 % Wirkungsgrad“ innerhalb der erweiterten Projektlaufzeit abgeschlossen.

In einem Unterarbeitspaket des AP4 wurde die Metallisierung der Tandemzellen in Bezug auf das Zusammenspiel von Sieb, Metallisierungsdesign, Pasteneigenschaften, Druckeinstellungen und das Grid-Curing optimiert, um trotz niedriger Curing-Temperaturen eine ausreichende Qualität der Metallisierung bei hohen Durchsätzen zu erreichen. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse konnten erfolgreich an HJT-Zellen bei >1000 Wafer pro Stunde eingesetzt werden. [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] Im Rahmen dieser Arbeiten konnte auch der Meilenstein MS4-15 „Herstellung einer Tandemzelle mit einer Fingerbreite <40 µm“ zeitgerecht erreicht werden.

In dem Unterarbeitspaket AP7.2 wurde ein Modell zur Bestimmung der Cost of Ownership der Tandemzellherstellung erstellt. Dieses Modell beruht für die Bottomzellen-Produktion weitestgehend auf den Erfahrungen des Anlagenlieferanten [REDACTED]

[REDACTED]. Der Meilenstein MS7-15 „Fertigstellung eines bottom up Kostenmodells für die Tandemzelle“ konnte innerhalb der regulären Projektlaufzeit erreicht werden und das Modell wurde bis zum Projektabschluss laufend aktualisiert. Mit Hilfe des Modells konnten unter anderem die ökonomischen Auswirkungen der angepassten n-Schicht für die Bottomzellenherstellung bewertet werden. Es wurde deutlich, dass eine Durchsatzoptimierung dieser Schicht notwendig ist, um die Mehrkosten für die Tandemzellherstellung zu verringern.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn

Der Beginn des Projekts fiel in eine sehr dynamische Phase in der Entwicklung der Tandemtechnologie: Nach der ersten Zertifizierung einer PVSK/Si Tandemzelle im Jahr 2017 durch die Stanford Universität konnte der Wirkungsgrad dieses Typs von Solarzellen stetig angehoben werden, wobei Oxford PV sich regelmäßig als Technologieführer mit verschiedenen Forschungseinrichtungen abwechselte. Im Jahre 2018 wurde der Wirkungsgrad durch Oxford PV auf 28,0 % (<https://www.oxfordpv.com/de/node/91>) angehoben. Im Jahre 2019 publizierten dann Al-Ashogi et al. zunächst 29,2 % mit einer flachen Bottomzelle und einem einem neuartigen p-Typ Material (<https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.abd4016>). Dieser Wirkungsgradrekord war auch aktueller Stand zu Projektbeginn. Während der Projektlaufzeit konnte Oxford PV Ende 2020 einen Wirkungsgrad von 29,5 % demonstrieren, wonach im Jahr 2021 dann wiederum HZB durch eine verbesserte Licht-Einkopplung den Rekordwirkungsgrad auf 29,8 % steigerte. Alle diese Wirkungsgrade wurden allerdings auf kleinen Zellflächen (ca. 1 cm²) demonstriert.

In Bezug auf die verwendeten Informations- und Dokumentationsdienste können z.B. Dienste wie Google Scholar Alerts und Fachzeitschriften wie z.B. Science, Nature oder Advanced Materials genannt werden.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

Im Großteil der Projektlaufzeit gab es intensiven Austausch innerhalb des Konsortiums, also vor allem mit der Meyer Burger Germany GmbH und dem Fraunhofer ISE, aber auch den assoziierten Partnern ASYS Automatisierungssysteme GmbH und Pasan SA, auch wenn der Austausch durch die Reisebeschränkungen der COVID-19-Pandemie teilweise nur eingeschränkt möglich war.

Ab Juli 2021 wurde der Austausch zu Teilen des Konsortiums aufgrund von geänderten strategischen Rahmenbedingungen beschränkt. Es wurden dementsprechend Anpassungen in der Planung vorgenommen, die sich auch in der verlängerten Projektlaufzeit widerspiegeln.

Darüber hinaus hatte das Team von Oxford PV Brandenburg eine intensive Zusammenarbeit mit dem F&E Standort in Oxford U.K. bzgl. der Weiterentwicklung der Technologie sowie mit weiteren Firmen zur Schaffung der nötigen Randbedingungen für den Aufbau der angestrebten Fertigungskapazitäten. Im letzten Drittel der Projektlaufzeit und in der Laufzeiterweiterung fand außerdem ein Austausch mit einigen neuen Lieferanten statt, der auch die erfolgreiche Weiterführung des SWiTch Projektes sicherte.

6. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse in Gegenüberstellung mit der Planung

Die Aufgabe des Verbundvorhabens Switch bestand zunächst in der Demonstration von effizienten Solar-Modulen mit Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen und Smart-Wire Connection Technology (SWCT). Da sich während der Projektlaufzeit die strategischen Ziele der beteiligten Firmen änderten, wurde die vorrangige Verschaltungstechnologie von SWCT zur Schindel-Technologie geändert.

Das Projekt war in die folgenden Arbeitspaketen (APs) unterteilt:

- AP1: Projektmanagement
- AP2: Entwicklung der HJT-Bottom-Zelle
- AP3: Erste Industrialisierung der Herstellung von Perowskit-Top-Zellen
- AP4: Fine-Line-Metallisierung und IV-Messung
- AP5: Verschaltungstechnologie
- AP6: Moduldesign und -produktion
- AP7: Analyse Zelle-zu-System Verlustmechanismen/ techno-ökonom. Bewertung
- AP8: Zuverlässigkeit in Klimakammer Tests
- AP9: Normung und Patentrecherche

In der folgenden Tabelle sind die mit den verwendeten Mitteln durchgeführten Arbeiten umrissen und als nächstes die erzielten Ergebnisse im Vergleich zur Planung aufgelistet.

Durchgeführte Arbeiten	
AP1	Die Koordination erfolgte zunächst wie geplant primär durch Meyer Burger als Projektkoordinator, unterstützt durch die Projektpartner Fraunhofer ISE und Oxford PV. Während der Verlängerungsphase hat Oxford PV die Federführung übernommen, da das Teilvorhaben von Meyer Burger innerhalb der regulären Projektlaufzeit abgeschlossen wurde. Es gab halbjährliche-Treffen sowie -Zwischenberichte, welche durch regelmäßigen Austausch innerhalb der Arbeitsgruppen ergänzt wurden.
AP2	Das AP2 beinhaltete den Transfer und die Optimierung der Standard PECVD- und PVD-Prozesse zur Optimierung der Heterojunction Technology (HJT)-Zelle als Bottomzelle sowie die Anpassung der PECVD und PVD-Prozesse an die Top Zelle für die Pilotfertigung von Tandem Solarzellen. Abbildung 1 zeigt beispielhaft einige Ergebnisse einer auf großer Fläche skalierten und für die Bottomzellen-Anwendung optimierten n-Schicht.

	<p>Weiterhin wurde die PVD-Zwischenschicht so optimiert, dass stabilere Prozessbedingungen erreicht werden konnten. Gleichzeitig konnten mit den neu entwickelten Schichten sehr gute Eigenschaften in Tandemzellen erreicht werden.</p> <p>Weiterhin Teil des APs war die Analyse und Optimierung der Bottomzelle mit dem Fokus auf der Vermeidung von Randeffekten bei der Umstellung von M2 auf M4 und später auf das M6 Format. Dabei wurden sowohl Effekte identifiziert, die unmittelbar aus der Herstellung der Bottomzelle resultieren als auch Effekte der Topzellenprozesse, die zum Teil durch Anpassungen der Bottomzellenfertigung mitigiert werden konnten. Auch wenn hier bereits einige innovative Lösungen identifiziert werden konnten, sind weitere Arbeiten nötig, um die Randeffekte weiter zu reduzieren. Abbildung 2 zeigt hierzu die wichtigsten Parameter der Solarzellen, nämlich Wirkungsgrad (ETA), Füllfaktor (FF), offene Klemmspannung (V_{oc}) und Kurzschlussstromdichte (J_{sc}) im Vergleich vor und nach einem Laser-Cut jeweils normiert auf den Median-Wert der initialen Messung und für verschiedene Zell-Varianten. Zu erkennen ist, dass der Wirkungsgrad bei gewissen Typen mehr als 5 % relativ steigt, wenn ungünstige Randeffekte weggescchnitten werden. Im Rahmen des Projekts wurde auch ein Konzept entwickelt, welche durch eine Anpassung der Wafer-Auflagefläche einen wichtigen Randeffekt verringern soll. Dies wurde im Nachgang umgesetzt und befindet sich aktuell in der Testphase.</p> <p>Im SWiTch Projekt konnte die ursprünglich konzipierte Oberflächentopographie für die HJT-Bottomzellen erfolgreich auf die Hochdurchsatzanlagen bei Oxford PV übertragen und sowohl vergleichbare optische Eigenschaften als auch eine gute Passivierqualität erreicht werden. Mit Unterstützung externer Partner wurde anschließend die Oberflächentopographie der Bottomzellen variiert. So konnten verschiedene Oberflächentopographien erfolgreich mit hohen offenen Klemmspannungen (V_{oc}) in HJT-Einzelzellen eingesetzt werden, die teilweise jedoch deutlich andere Effekte in Tandemzellen zeigten (s. Abbildung 3). So führte eine hohe Zahl an besonders kleinen Siliziumpyramiden auf der Oberfläche zu reduzierten V_{oc} in der Tandemzelle, die sich auf ein verändertes Abscheidungsverhalten der Topzelle zurückführen lassen. Dagegen konnten mit den Oberflächenvarianten 2 und 5 die hohen V_{oc} der HJT-Bottomzelle auch erfolgreich mit den hohen V_{oc} der Topzelle kombiniert werden.</p>
AP3	<p>In Bezug auf die erste Industrialisierung der Herstellung der Perowskit(PWSK)-Topzellen und Tandemzellen wurde in AP3 zunächst Teile der Topzelle zusammen mit der Bottomzelle in quasi industriellem Probefeld demonstriert. Zunächst wurden Konzepte zur Durchsatzerhöhung der Tandemzellproduktion erarbeitet und im Projektverlauf soweit möglich auf der Laborlinie adaptiert. Diese Arbeiten ermöglichen eine deutliche Erhöhung des maximalen [REDACTED] Durchsatzes in mehreren Teilschritten von [REDACTED] auf bis zu [REDACTED] Tandemzellen. Der angepasste Meilenstein von [REDACTED] wurde in KW25 in 2022 erzielt. Es wurden [REDACTED] PWSK-Topzellen hergestellt. Abbildung 4 zeigt Durchsätze von 5 wichtigen Prozessschritten der Topzelle während der Meilensteinwoche KW25-2022 in [REDACTED]. Ein Großteil der in diesem AP produzierten Tandemzellen ging an die Projektpartner zur Herstellung von Test-Modulen (AP5 – AP8).</p> <p>Außerdem wurden die Tandemzellen im Hinblick auf die Eigenschaften des TCO und der Metallisierung für einen Einsatz in Smart Wire Modulen optimiert und diese Ergebnisse teilweise auch auf Schindelmodule übertragen. Insgesamt konnten mit busbarlosen Metallisierungen deutlich reduzierte Silberpastenverbräuche und damit Kostenvorteile bei vielversprechenden Leistungskennwerten erreicht werden.</p> <p>Mit Hilfe der Laborlinie als Rückfalloption konnten zahlreiche Tandemzellen für die Degradationsanalysen an Einzelzellaminaten und für Module hergestellt werden. Die Versandbedingungen für die Tandemzellen wurden ebenfalls untersucht und optimiert. Weiterhin wurde die Messung der Strom-Spannungskennlinie der Tandemzellen bei höheren Durchsätzen ermöglicht, inklusive einer ausreichenden und gleichzeitig hochdurchsatztauglichen Light Soaking Vorbehandlung der Tandemzellen. Es wurden</p>

	<p>außerdem insgesamt [REDACTED] Einzelzelllaminate kontinuierlich während der gesamten Projektlaufzeit für Degradationsanalysen hergestellt.</p>
AP4	<p>Im Rahmen von AP4 „Fine-Line Metallisierung und IV-Test“ konnte die Hochdurchsatzfähigkeit einer für Tandem Solarzellen geeigneten Metallisierungspaste [REDACTED] in der HJT Linie auf HJT Zellen nachgewiesen werden. Der Test der Hochdurchsatzfähigkeit an Tandem-Solarzellen konnte nicht an der gleichen Anlage durchgeführt werden, da das entsprechende Prozesstool durch veränderte rechtliche Rahmenbedingungen mit dem Tool-Lieferanten in dieser Zeit nicht nutzbar war. Alternativ konnten auf dem Siebdrucker der Laborlinie sehr gute Ergebnisse mit einer Rakelgeschwindigkeit [REDACTED] mit der ausgewählten Metallisierungspaste auf Tandemzellen erreicht werden. Hierbei wurden Siebe verwendet, wie sie auch im Siebdrucker der Demonstrationslinie zum Einsatz kämen, so dass die Anforderungen für die Metallisierung von Tandemzellen bei Durchsätzen >1000 Wafer pro Stunde weitestgehend nachgebildet werden konnten.</p> <p>Außerdem wurden in diesem Arbeitspaket zum ersten Mal erfolgreich Metallisierungsdesigns mit einer Fingerbreite von <40 µm für Tandemzellen verwendet, die gleichzeitig mit den oben genannten Bedingungen einer Hochdurchsatzproduktion kompatibel sind. In Abbildung 5 sind dazu die IV-Kenndaten von Tandemzellen mit vier unterschiedlichen Typen von Bottomzellen dargestellt, die mit einer busbarlosen Metallisierung mit 40 oder <40 µm Fingerbreite versehen wurden. Während in der Kurzschlussstromdichte (J_{sc}) ähnliche Ergebnisse für beide Metallisierungsarten erreicht wurden, konnten höhere Füllfaktoren (FF) mit der <40 µm Metallisierung erreicht werden, was in einer Steigerung des Wirkungsgrades (eta) für alle Tandemzellvarianten bei gleichzeitig verminderter Silberpastenverbrauch resultierte.</p>
AP5, AP6	<p>Im AP5 „Verschaltungstechnologie“ und AP6 „Modul-Design und -produktion“ gab es keine eigenen Arbeiten bei Oxford PV. Es wurden aber eine Vielzahl von Tandemzellen zur Verfügung gestellt.</p>
AP7	<p>In diesem AP wurde im Rahmen der TVB von Oxford PV planmäßig eine Cost of Ownership Analyse zur Tandemzellproduktion erstellt. [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] Außerdem wurden die in diesem Projekt entwickelten Prozessanpassungen berücksichtigt. [REDACTED] Das Modell wurde laufend bis zum Ende der erweiterten Projektlaufzeit aktualisiert.</p> <p>Bei der Kostenanalyse zur Tandemzelle fiel die angepasste n-typ Schicht der Bottomzelle besonders ins Gewicht und wurde daher gesondert analysiert. Die Dicke dieser Schicht führt zu einem verringerten Durchsatz bei der Herstellung von Bottomzellen, der eine deutliche Kostenerhöhung für die Tandemzelle bedingt, falls man diese Schicht auf der für die Standard n-Schicht ausgelegten Anlage abscheidet. Dann ist eine Erhöhung der Kosten pro Watt generierter Leistung der Tandem-Solarzelle von [REDACTED] zu erwarten (s. Abbildung 6). Bereits eine Verdopplung der Abscheiderate, welche durchaus im Bereich des Möglichen liegt (Szenario C), führt zu einer erheblichen Reduzierung dieser Mehrkosten auf [REDACTED]. Das zeigt, dass eine Weiterentwicklung des Abscheideprozesses der angepassten n-Schicht zu höheren Abscheideraten die Mehrkosten aufwiegen könnte. Weiterhin könnte eine gezielte Anpassung der bei diesem Prozessschritt genutzten Anlage weitere Kostenreduktionen bewirken.</p> <p>Weiterhin werden die Kosten der Topzellprozesse laut aktueller Abschätzung durch Materialkosten dominiert, die dem frühen Entwicklungsstadium dieser Prozesse geschuldet sind. Eine ausreichende Verfügbarkeit der benötigten Rohstoffe ergeben ein hohes Potential für Kostensenkungen durch eine Hochskalierung der Produktion und eine Weiterentwicklung der Prozessanlagen.</p>

AP8	<p>In dem AP 8.1 (Degradation kleiformatiger Module) wurden LeTID (light and elevated temperature induced degradation) Tests an kleiformatigen Modulen durchgeführt. Mit Hilfe dieser Messungen konnten bereits einige Prozessvarianten für die [REDACTED] Schicht verworfen werden, da sie eine stärkere Degradation während LeTID zeigten. Dahingegen konnten durch eine Anpassung des PWSK Absorbers deutliche Verbesserungen im Degradationsverhalten der PWSK-HJT-Tandemmodule erreicht werden.</p> <p>Weiterhin wurden auch Damp Heat und Temperatur-Zyklen-Tests durchgeführt. Bei den Damp Heat Tests konnten [REDACTED] nach 1000 Stunden für kleiformative Tandem-Module durch modifizierte Zwischenschichten und Anpassungen des PWSK-Absorbers erreicht werden. Bei den LeTID Tests konnten durch eine Optimierung der Zusammensetzung des PWSK-Absorbers ebenfalls sehr gute Stabilitäten erreicht werden.</p> <p>Durch nochmals erweiterte Testanstrengungen zum Projektende und durch eine parallele Weiterentwicklung der Topzelle konnten sehr gute Ergebnisse in Damp Heat (DpH), Temperaturzyklen (TC) und LeTID (light and elevated temperature induced degradation) Tests erreicht werden (s. Abbildung 7).</p> <p>Bei den Degradationstests wurde die Stabilisierung der kleiformatigen Module vor den IV-Messungen als besonders kritisch für die korrekte Erfassung des Degradationsverhaltens identifiziert. Deshalb sollten detaillierte Analysen und eventuelle Anpassungen des Stabilisierungsprozesses der Tandemzellen durchgeführt werden, um möglichst realitätsnah den tatsächlichen Arbeitspunkt der Tandem-Solarzellen im Laminat zu charakterisieren.</p> <p>Insgesamt konnte das Degradationsverhalten der Tandemzellen innerhalb der Projektlaufzeit signifikant verbessert werden.</p>
-----	---

Die Zuwendung wurde hauptsächlich für Personal und Material-/ Einsatzstoffe verwendet. Ein kleiner Anteil für die Position Reisen. Siehe Abschnitt 2 für weitere Details.

Erzielte Ergebnisse in Gegenüberstellung zur Planung		
MS-(mit Monat)	Planung (inklusive Änderungsanträge)	Erzielt
MS2-6	HJT-Bottomzelle mit angepasster n-Schicht [REDACTED] zeigt eine Leerlaufspannung > 730 mV und einen FF > 75 %.	Im Januar 2021 konnten erfolgreich HJT-Bottomzellen mit angepassten n-Schichten hergestellt werden, die sich durch Leerlaufspannungen von mindestens 730 mV und Füllfaktoren von mindestens 75 % auszeichneten.
MS3-15/ MS3-23	Durchsatz von [REDACTED] für alle Prozessschritte der Topzell-Produktion, Änderungsantrag: [REDACTED] bis zum Ende der erweiterten Projektlaufzeit	Nach Anpassung des Durchsatzziels [REDACTED] im Rahmen der verlängerten Projektlaufzeit konnten schließlich im Juni 2022 erfolgreich [REDACTED] Tandemzellen mit der Laborlinie in Brandenburg in einer Woche produziert werden. Das ursprüngliche Durchsatzziel [REDACTED] konnte für ca. 60 % der Teilschritte der gesamten Tandemzellproduktion demonstriert werden.
MS3-18/ MS3-23	Mindestens [REDACTED] Tandemzellen hergestellt für Modulproduktion	Zum Ende der verlängerten Projektlaufzeit wurden über die gesamte Projektlaufzeit [REDACTED] Tandemzellen für die Modulproduktion hergestellt und versandt. Hierbei wurden auch Zellen berücksichtigt, die für alternative

		Modultechnologien zur Smart Wire Technologie bereitgestellt wurden.
MS3-18/ MS3-20	M4 Tandemzelle mit mindestens 27 % Wirkungsgrad	Im Februar 2022 konnten mehrere PWSK-HJT-Tandemzellen mit Wirkungsgraden der Solarenergiewandlung von über 27 % im industrierelevanten [REDACTED] Format hergestellt werden (s. Abbildung 8 für M4).
MS4-15	Herstellung einer Tandemzelle mit Fingerbreite <40 µm	Im Oktober 2021 wurden PWSK-HJT-Tandemzellen erfolgreich mit Metallisierungen mit einer Fingerbreite von <40 µm versehen (s. Abbildung 5). Hierbei wurden industrielle Pasten unter hochdurchsatzfähigen Prozessbedingungen genutzt.
MS7-15	Fertigstellung eines „Bottom-up“ Kostenmodells	Zum September 2021 wurde ein Cost of Ownership Modell zur PWSK-HJT-Tandemzellenproduktion erstellt.
MS8-18	Degradationstests (Damp-Heat, LeTID, Temperaturzyklen) mit weniger als 5 % Degradation bestanden	Zum Ende der regulären Projektlaufzeit konnten relative Wirkungsgradverluste kleiner 5 %- für Degradationstests wie Damp-Heat, LeTID und Temperaturzyklen-Tests mit Einzelzellaminaten demonstriert werden (s. Abbildung 7).

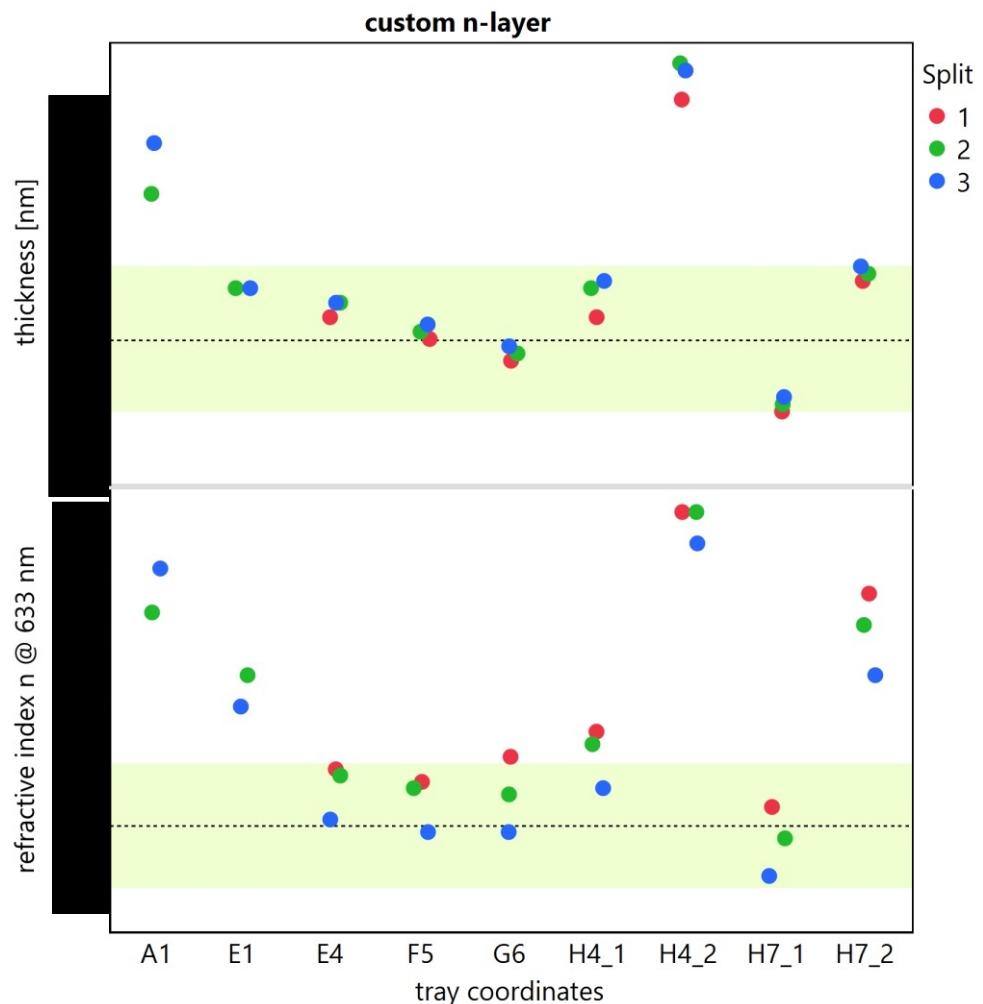


Abbildung 1: Dicke und Brechungsindex von angepassten n-typ Materialien der Bottomzellen für verschiedene Tray-Positionen und drei unterschiedliche Materialrezepte

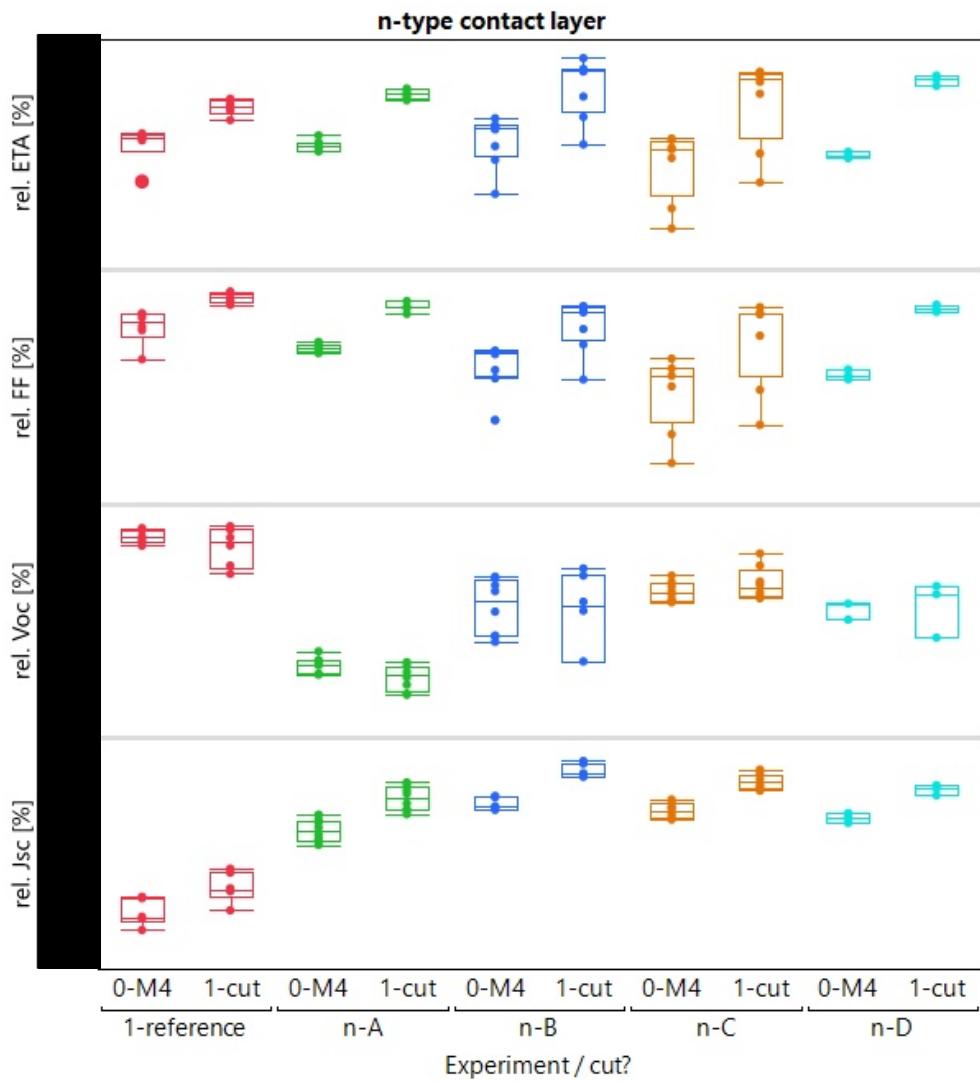


Abbildung 2: Relative IV-Kenndaten von Tandem-Solarzellen mit vier unterschiedlich angepassten n-typ Kontaktschichten im Vergleich zu Referenzzellen (rot). Die Kenndaten sind sowohl für M4-Zellen als auch für 142x142 mm² Zellen dargestellt.

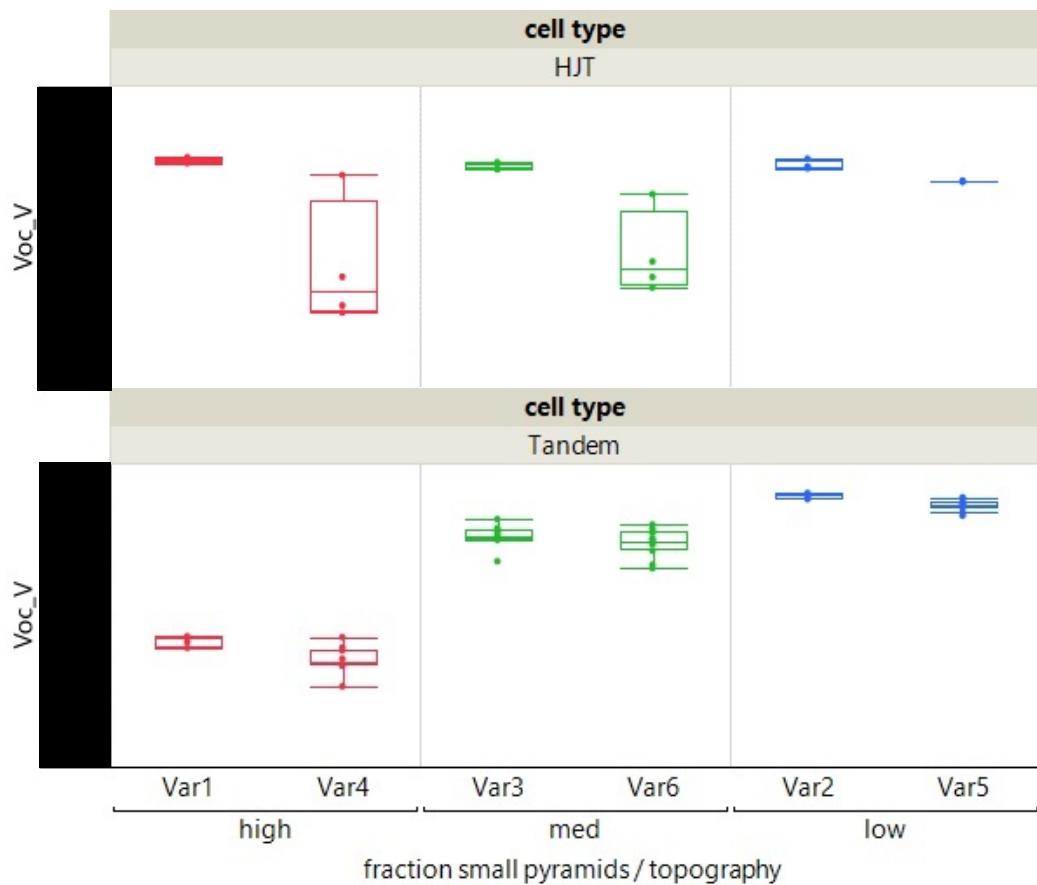


Abbildung 3: Erreichte offene Klemmspannungen (V_{oc}) für sechs unterschiedliche Oberflächenvarianten der lichtzugewandten Waferseite in HJT-Einzelzellen und PWSK-HJT-Tandemzellen. Je zwei der Varianten haben einen hohen, mittleren oder geringen Anteil an kleinen Siliziumpyramiden auf der Oberfläche.

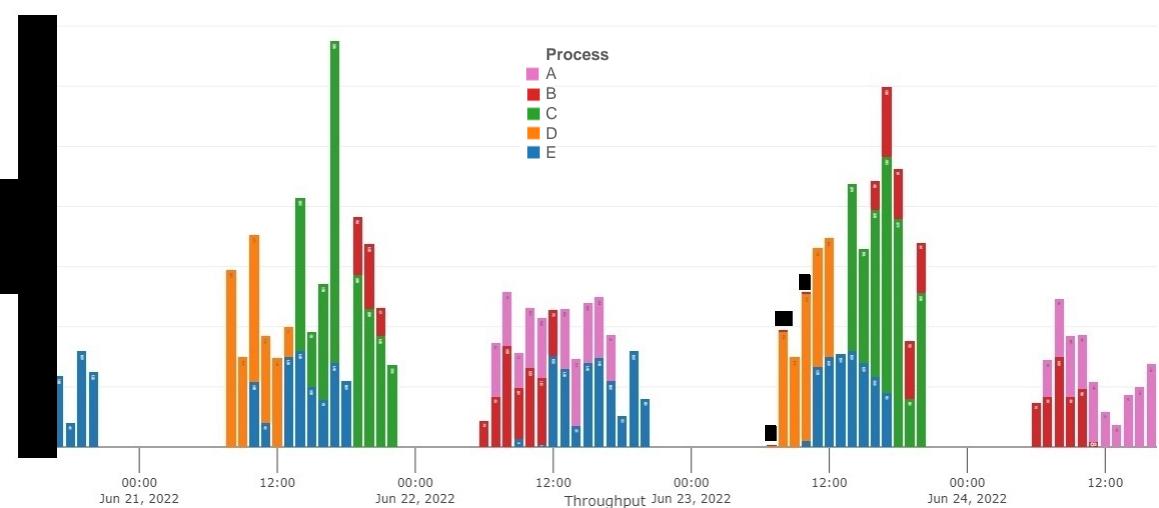


Abbildung 4: Durchsätze von 5 wichtigen Prozessschritten der Topzelle während der Meilensteinwoche KW25-2022 [REDACTED].

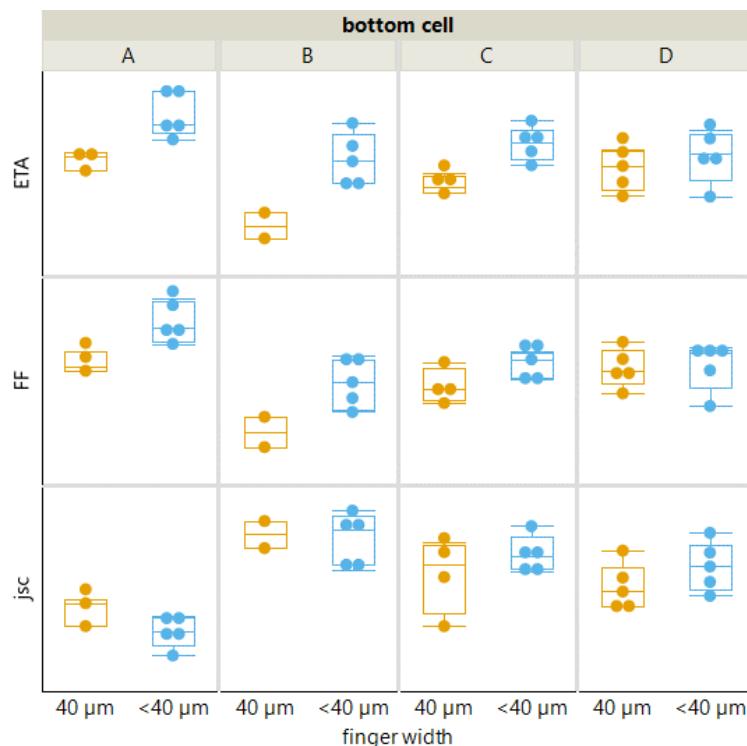


Abbildung 5: IV-Kenndaten von PWSK-HJT-Tandemzellen mit vier unterschiedlichen Bottomzellvarianten und je einer busbarlosen Metallisierung mit einer nominellen Fingerbreite von 40 bzw. <40 μm . Dargestellt sind der Wirkungsgrad der Solarenergiewandlung (ETA), der Füllfaktor (FF) und die Kurzschlussstromdichte (jsc).

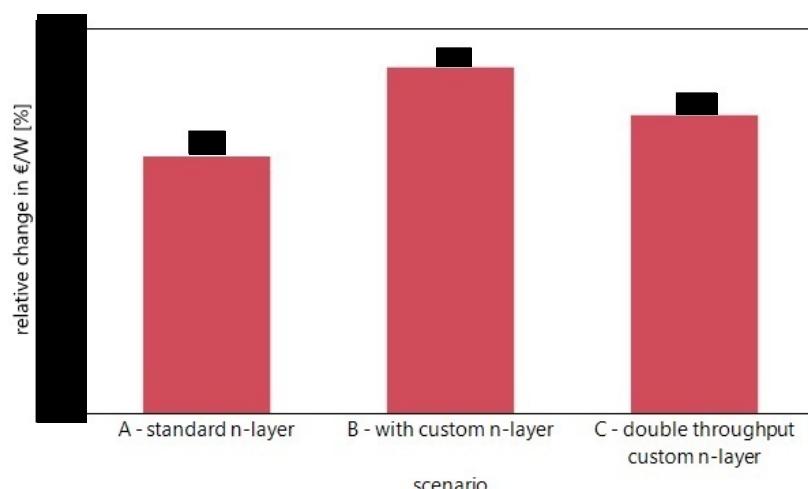


Abbildung 6: Relative Änderung der auf die maximal generierte elektrische Leistung bezogenen Kosten der Tandemzellenherstellung bei Einführung der angepassten n-Schicht in die Bottomzellenherstellung.

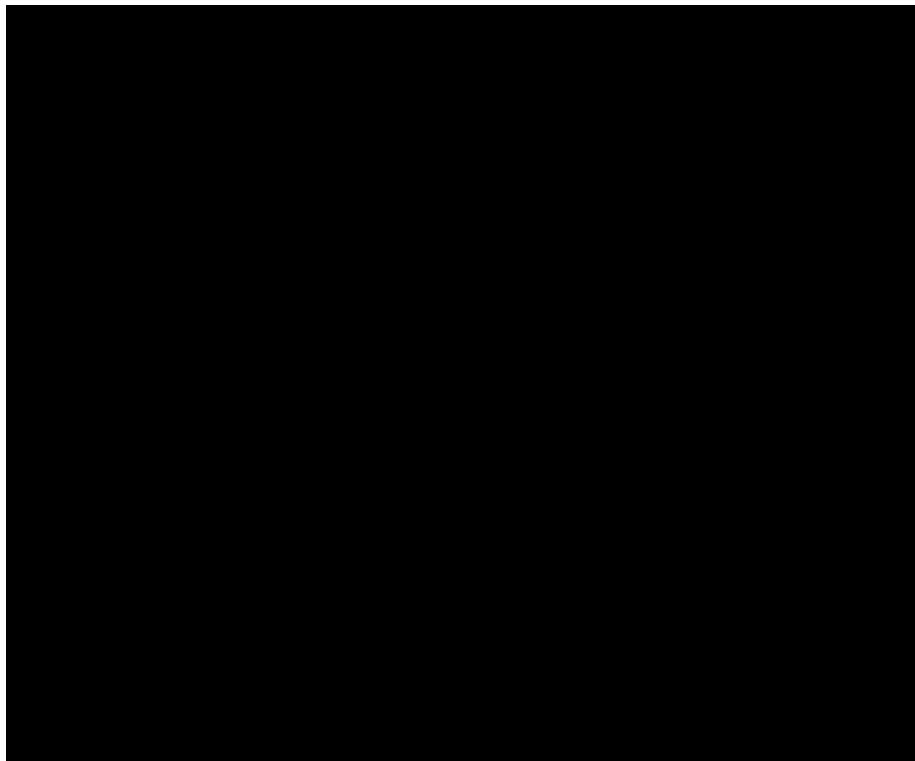


Abbildung 7: a) Relativer Wirkungsgrad von verschiedenen PWSK-HJT-Tandemzellen aufgetragen gegenüber [REDACTED] Feuchte-Wärme (DpH) Test, b) vor- und nach dem LeT (light and elevated temperature) Test [REDACTED] und c) gegenüber der Anzahl an Temperatur-Zyklen bei variabler Bestromung im Verhältnis zum Strom im Arbeitspunkt der Zelle (I_{mpp}).

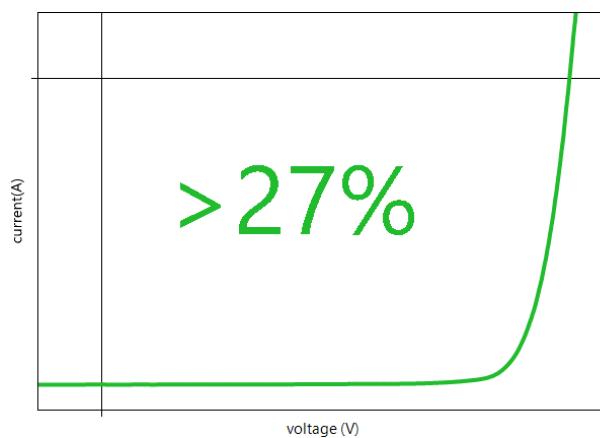


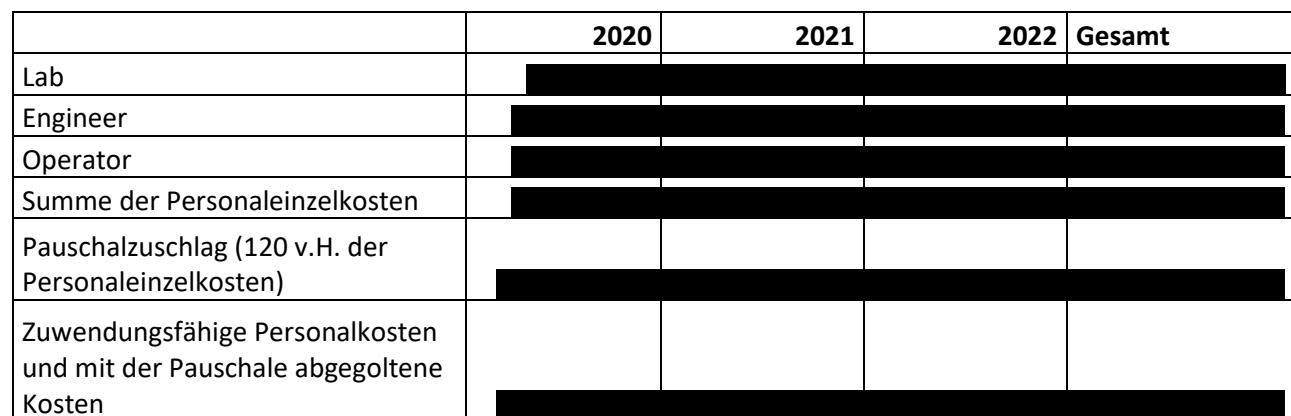
Abbildung 8: Interne Messung einer Strom-Spannungskennlinie einer Oxford PV Tandemzelle (volles M4 Format) mit >27% Wirkungsgrad.

7. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

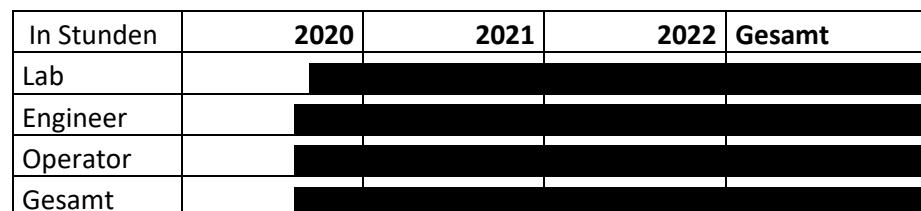
Im Folgenden ist ein Auszug aus dem Budgetstatus zum 2.2.2023 gezeigt, der eine Übersicht über die einzelnen Positionen gibt:

FKZ: 03EE1067B	Statusinformationen (Alle Beträge in EUR)				PROFI	Stand: 02.02.2023
Finanzierungsplan	Gesamt	vorkalkulation	nachgew. lt. ZN	abger. und angef.	noch verfügbar	Rest(%)
0813 Material						
0823 FE-Fremdleistungen						
0837 Personalkosten						
0838 Reisekosten						
0847 vorhabenspezifische Abschreibungen						
0848 AfA sonstige						
0850 sonstige unmittelbare Vorhabenkosten						
0856 Kosten innerbetrieblicher Leistungen						
0860 Verwaltungskosten						
0899 summarisch						
0881 Selbstkosten des Vorhabens (Summe A-I)						
0882 Eigenmittel des Antragstellers						
0883 Mittel Dritter/Einnahmen						
0884 Zuwendung						

Wie zu erkennen ist die größte Position die Personalkosten. Diese Position basiert auf den abgerechneten vorhabenbezogenen produktiven Jahresarbeitsstunden, welche sich zeitlich und in Bezug auf die Funktion der Arbeitnehmer wie folgt aufteilt:



Insgesamt lagen die Personalkosten etwas unter dem Plan. Dies ist dadurch zu begründet, dass manche Teilespekte des Projekts auf Grund der beschriebenen Situation mit dem Anlagenlieferanten nicht wie geplant durchgeführt werden konnten.



Die zweite große Position besteht in den Materialkosten. Diese lassen sich wie folgt weiter zeitlich und nach Typ unterteilen:

	2020	2021	2022	Gesamt
Hilfstoffe (Sonstiges)				
Chemikalien				
Spezialgas				
Target				
Glass				
Wafer (Bottom Zelle /Si Wafer)				
Gesamt				

Insgesamt wurden weniger Proben im Rahmen des Projekts hergestellt als ursprünglich geplant und somit auch weniger Material eingesetzt. Dies kann ebenfalls durch die oben beschriebenen Probleme mit dem Anlagenhersteller begründet werden.

Die dritte und letzte Position im Verwendungsnachweis sind die Reisekosten, welche deutlich unter den Vorhersagen lag, was zum großen Teil auf die Corona-Pandemie zurückzuführen ist.

8. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit hat dazu beigetragen, die Perowskit-Technologie in etwa vom Technology Readiness Level (TRL) 5 auf das TRL7 zu bringen. Das Durchlaufen der TR-Levels ist eine Notwendigkeit, um eine ausgereifte Technologie zu entwickeln die marktreif ist und einen Nutzen für die Gesellschaft stiftet. Die Entwicklung wurde im Verlauf des Projekts dahingehend angepasst, dass alternative Modultechnologien zur SWCT in den Fokus der Entwicklungen gerückt sind. Alle durchgeführten Arbeiten wurden stets rechtzeitig so angepasst, dass die Erreichung der ursprünglich angestrebten Ziele weitestgehend ermöglicht wurde. So konnten nahezu alle Meilensteine des Teilprojektes ohne Anpassungen erreicht werden. Abseits davon verlief die Entwicklung geradlinig ohne größere Abwege, die nicht weiterverfolgt werden konnten. Zudem wurde an jedem Punkt auch auf Grund des signifikanten Eigenanteils der Finanzierung auf ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis geachtet. Somit kann davon ausgegangen werden, dass alle Arbeiten angemessen durchgeführt wurden.

9. Voraussichtlicher Nutzen mit Blick auf den Verwertungsplan

Wie oben angesprochen ist das Durchlaufen der TRLs eine Notwendigkeit für die Entwicklung einer marktreifen Technologie, welche einen Mehrwert für die Gesellschaft und im Sinne des Verwertungsplans darstellt. Der Nutzen ist somit als sehr hoch für den Verwertungsplan einzuschätzen.

10. Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Zu Beginn der Projektlaufzeit von Switch war der Stand der Technik so, dass viele Labore an der Tandem-mit-PWSK Technologie arbeiteten, es jedoch (außer bei Oxford PV) keine Publikationen zur Industrialisierung der Technologie gab. Im Labormaßstab hatte 2020 zunächst Oxford PV einen Wert von 29.5% publiziert, der dann während der Projektlaufzeit vom HZB mit einer nano-texturierten Bottomzelle auf 29,8% in 2021 gesteigert wurde (https://www.helmholtz-berlin.de/pubbin/news_seite?nid=23248;sprache=en). Abbildung 8 gibt einen Überblick über die Entwicklung auf dem Gebiet des Vorhabens anhand eines Auszugs von einer in der PV-Community bekannten Darstellung vom NREL, welche die publizierten Rekord-Wirkungsgrade der unterschiedlichen PV-Technologien darstellt (<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>). Zu erkennen ist, dass neben Oxford PV selbst, das Helmholtz-Zentrum Berlin und das CSEM aus Neuchatel

entscheidende Treiber in der Technologie-Entwicklung sind. Weiterhin werden aber auch vermehrt Fortschritte aus dem asiatischen Raum publiziert.

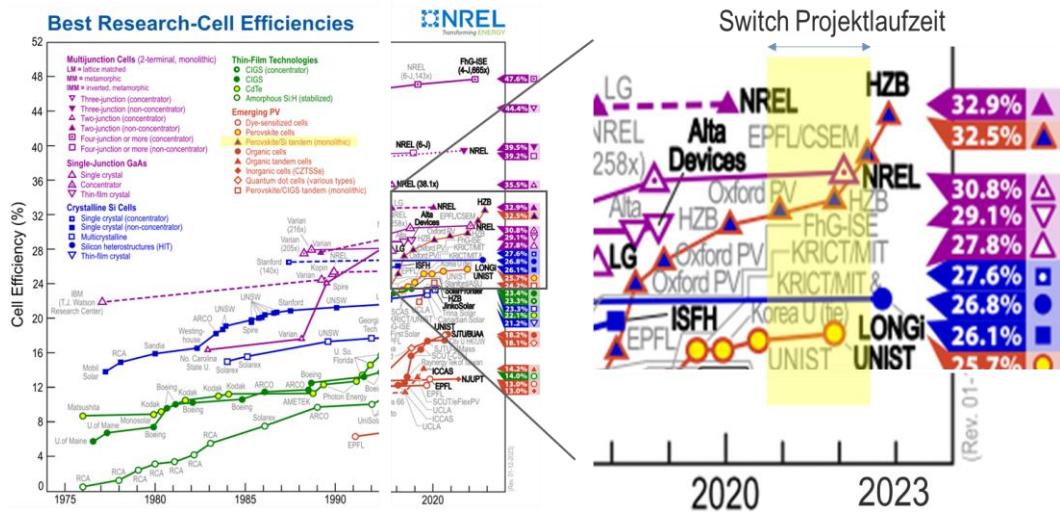


Abbildung 9: Auszug aus dem in der PV-Community berühmten NREL-Chart (<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>), der den Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens im internationalen Vergleich einordnet. Der gelb hinterlegte Bereich markiert die Laufzeit des SWiTch Projektes (inkl. Verlängerung).

11. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Mit dem Projektpartner Fraunhofer ISE zusammen sind aktuell einige Publikationen auf Konferenzen geplant bzw. bereits eingereicht:

Name der Konferenz	Jahr / Ort	Vortragender
Metallization & Interconnection Workshop	2023, Neuchâtel, Schweiz	Dr. Angela De Rose
Metallization & Interconnection Workshop	2023, Neuchâtel, Schweiz	Veronika Nikitina
Tandem PV Workshop	2022, Freiburg	Dr. Torsten Rößler
Tandem PV Workshop	2022, Freiburg	Dr. Daniel Kirk
Tandem PV Workshop	2021, Berlin	Dr. Daniel Kirk

Es ist zu erwarten, dass diese zum Teil auch von wissenschaftlichen Publikationen begleitet werden.

In einem populärwissenschaftlichen Beitrag auf der Plattform YouTube wird das Projekt kurz beschrieben (<https://www.youtube.com/watch?v=fJ4ARsrXfo>).

Dr. Daniel Kirk von Oxford PV hat auf dem Tandem PV Workshop 2021 in Berlin Ergebnisse zur Modulintegration aus diesem Projekt präsentiert.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Abschlussbericht Verbundvorhaben: SWiTch – Smart Wire Connection Technology für Perowskit-Tandem-Solarzellen Teilvorhaben: Entwicklung der Top-Zelle		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Richter, Alexei		5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2022
		6. Veröffentlichungsdatum
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Oxford PV Germany GmbH		
		9. Ber.-Nr. Durchführende Institution
		10. Förderkennzeichen 03EE1067B
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) BMWK		11. Seitenzahl 19
		13. Literaturangaben 5
		14. Tabellen 7
		15. Abbildungen 9
16. DOI (Digital Object Identifier)		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Technische Informationsbibliothek (TIB) Hannover		
18. Kurzfassung <p>Im Labormaßstab wurden und werden laufend neue Rekorde für Perowskit-Silizium Tandemsolarzellen erreicht. Die industrielle Umsetzung dieser Technologie ist bisher allerdings noch keiner Firma gelungen. Im Rahmen des SWiTch Teilvorhabens beabsichtigte die Oxford PV Germany GmbH, die PWSK-HJT-Technologie mit den Projektpartnern in Bezug auf Durchsätze, Formate und anwendungsnahe Stabilität weiter in die Produktionsreife zu überführen und den Einsatz in Modulen zu demonstrieren. Zur Erreichung dieser Ziele wurden die HJT-Bottomzelle und die PWSK-Topzelle zu höheren Wirkungsgraden der Solarenergiewandlung weiterentwickelt. Für die Tandemzelle lag der Fokus insbesondere auf der Durchsatzerhöhung in der Vorproduktion, auf Untersuchungen zur Stabilität im Modul und auf Kostenaspekten der Produktion. Durch Anpassungen der beiden Teilzellen konnten Wirkungsgrade von über 27 % für PWSK-HJT-Tandemzellen im industriellen Format auf ganzen Wafers demonstriert werden. Es konnten zudem signifikante Steigerungen der Produktionsdurchsätze und sehr gute Stabilitäten in kleinformativen Modulen bei Damp-Heat, LeTID oder Thermal Cycling gezeigt werden. Insgesamt ist die PWSK-HJT Tandemtechnologie weiterhin höchst vielversprechend, um gleichzeitig die physikalische Limitierung der herkömmlichen Siliziumsolarzellen zu überwinden und Kostenvorteile in der Produktion von Hocheffizienzmodulen zu ermöglichen.</p>		
19. Schlagwörter Perowskit, Tandem, Solarzellen		
20. Verlag		21. Preis

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 1935973-9

Document control sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Veröffentlichung (Publikation)		
3. title Final report Joint project: SWiTch - Smart Wire Connection Technology for perovskite tandem solar cells Sub-project: top cell development			
4. author(s) (family name, first name(s)) Richter, Alexei		5. end of project 30.06.2022	6. publication date
			7. form of publication Document Control Sheet
8. performing organization(s) name, address Oxford PV Germany GmbH		9. originators report no.	10. reference no. 03EE1067B
			11. no. of pages 19
12. sponsoring agency (name, address) BMW K		13. no. of references 5	14. no. of tables 7
			15. no. of figures 9
16. DOI (Digital Object Identifier)			
17. presented at (title, place, date) Technische Informationsbibliothek (TIB) Hannover			
18. abstract New records for perovskite silicon tandem solar cells have been and continue to be reached on a laboratory scale. However, no company has yet succeeded in implementing this technology on an industrial scale. As part of the SWiTch sub-project, Oxford PV Germany GmbH aimed at advancing the PVSK-HJT technology to production maturity jointly with the project partners with respect to throughput, formats and application-oriented stability and to demonstrate its use in modules. To achieve these goals, the HJT bottom cell and the PVSK top cell were refined to achieve higher solar energy conversion efficiencies. For the tandem cell, the focus was particularly on increasing throughput in pre-production, on investigations into stability in the module and on cost aspects of production. By adapting the two sub-cells, efficiencies of more than 27 % could be demonstrated for PVSK-HJT tandem cells in industrial format on whole wafers. Significant increases in production throughputs and very good stabilities in small-format modules with damp heat, LeTID or thermal cycling were also demonstrated. Overall, the PVSK-HJT tandem technology remains highly promising to overcome the physical limitation of conventional silicon solar cells and at the same time enable cost advantages in the production of high-efficiency modules.			
19. keywords perovskite, tandem, solar cells			
20. publisher	21. price		

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 1938532-7