

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE

PERSIST-ISE **SCHLUSSBERICHT**

Förderkennzeichen: 0324037A

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0324037A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Danksagung

Das Forschungsprojekt «PersiST-ISE» wurde in der Zeit vom 01.05.2016 bis zum 31.12.2019 durch den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 0324037A betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, wofür wir uns herzlich bedanken.

Hinweis:

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg und den Partnern Albert-Ludwigs Universität Freiburg, Helmholtz-Zentrum Berlin, Heraeus und Merck KGaA durchgeführt. Dieser Bericht beinhaltet eine Beschreibung der Arbeiten und Ergebnisse des Verbundpartners Fraunhofer ISE im Teilprojekt 0324037A. Für die Arbeiten in den angeschlossenen Teilprojekten werden separate Abschlussberichte von Seiten der Verbundpartner eingereicht.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

PERSIST-ISE

Perowskit-Silizium Tandemsolarzellen

Teilvorhaben ISE: Integration, Siliziumsolarzellen, Effizienzsteigerung

Dr. Jan Christoph Goldschmidt

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
in Freiburg

Förderkennzeichen: 0324037A

Berichtszeitraum: 01.05.2016 – 31.12.2019

Inhalt

1	Ausgangssituation des Vorhabens	5
1.1	Aufgabenstellung	5
1.2	Voraussetzungen	5
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	6
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
2	Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens	8
2.1	Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse	8
2.1.1	AP 0 Projektkoordination	9
2.1.2	AP 1 Anpassung der Perovskitsolarzelle	9
2.1.3	AP 2 Anpassung der Siliziumsolarzelle.....	10
2.1.4	AP 3 Realisierung von Perovskit-Silizium-Tandemsolarzellen.....	12
2.1.5	AP 4 Ökologische Bewertung und Ökobilanzierung	17
2.1.6	Zusammenfassung der wichtigsten Projektergebnisse	22
2.2	Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	23
2.3	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	25
3	Referenzen	27

1 Ausgangssituation des Vorhabens

1.1 Aufgabenstellung

Das Hauptziel von PersiST war, hocheffiziente **monolithische Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen** mit zwei Anschlüssen zu realisieren. In dem Teilvorhaben PersiST-ISE waren die Aufgabenstellung des Fraunhofer ISE im Wesentlichen die

- Herstellung von Si-Solarzellen mit selektiven passivierten Kontakten, die zur Verwendung in Tandemsolarzelle optimiert sind und eine Leerlaufspannung über 720 mV erreichen.
- Optimierung der Optik der Tandemsolarzellen durch Strukturen zur Lichteinkopplung auf der Vorderseite und Lichtfallenstrukturen auf der Rückseite, welche den Strom um 1,5 mA/cm² erhöhen.
- Optimierung der Verbindung zwischen Perowskit- und Si-Solarzelle, durch angepasste selektive Kontaktschichten und Ladungsträgertransportschichten, welche einen Füllfaktor von 80% der gesamten Tandemsolarzelle ermöglichen.
- Herstellung semitransparenter Perowskitsolarzellen aus Lösungen mit Verfahren, die auf Tandemsolarzellen übertragen werden können.
- Realisierung von Tandemsolarzelle, auch auf großer Fläche >100 cm².
- Simulationsgestützte Optimierung der einzelnen Komponenten und des Gesamtsystems mit einem Schwerpunkt auf den optischen Aspekten.
- Charakterisierung einzelner Schichten und Teilsolarzellen (Schwerpunkt orts aufgelöste Methoden und μ -PL), sowie der kompletten Tandemsolarzellen.
- Ökobilanzierung der entwickelten Technologie.
- Die ökonomische Bewertung der Tandemtechnologie, die von dem ausgeschiedenen Projektpartner Merck übernommen wurde.

1.2 Voraussetzungen

Mit dem Projekt PersiST-ISE hat am Fraunhofer ISE die Entwicklung der Perowskit-Silizium Tandemtechnologie begonnen. Zum Zeitpunkt der Antragstellung gab es kein entsprechendes Labor für die Herstellung der Perowskit Topzellen, und es war noch keine Tandemsolarzelle realisiert worden. Ausgangspunkt waren die Kompetenzen im Bereich der organischen und Farbstoffsolarzellen mit denen bereits erste Perowskit Single-Junction Solarzellen realisiert werden konnten (siehe auch Abschnitt 1.4), sowie die Erfahrungen im Bereich der Silizium-Photovoltaik. Kompetenzen, entsprechend geschultes Personal und Laborinfrastruktur wurden dann im Rahmen von PersiST aufgebaut.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Aufteilung der Arbeitspakete und die ursprünglich geplante zeitliche Abfolge ist aus der folgenden Grafik ersichtlich:

		1-3	4-6	7-9	10-12	13-15	16-18	19-21	22-24	25-27	28-30	31-33	34-36		
	Projektmonat														
AP0	Projektsteuerung				MS3										
AP0.1	Projektkoordination														
AP0.2	Vermarktung und Patentstrategie														
AP1	Anpassung Perovskitsolarzelle														
AP1.1	Transparente selektive Elektroden-systeme														
AP1.2	Anpassung Bandlücke und Material-zusammensetzung														
AP1.3	Vorderseiten-entspiegelung														
AP1.4	Prozessierung und Prozesssequenz														
AP1.5	Charakterisierung														
AP1.6	Langzeitstabilität														
AP2	Anpassung der Siliziumsolarzelle				MS1, ISE.3			MS4							
AP2.1	Vorderseitenkontakt														
AP2.2	Rückseitenkontakt und Lichtfallenstruktur														
AP2.3	Charakterisierung														
AP3	Realisierung von Perovskit-Silizium Tandemsolarzellen		ISE.1, ISE.2		MS2			ISE.4, MS5		MS6			MS9 - MS12		
AP3.1	Elektrooptische Modellierung														
AP3.2	Verbindungsschicht														
AP3.3	Prozessierung														
AP3.4	Verkapselung														
AP3.5	Charakterisierung														
AP4	Ökologischen Bewertung und Ökobilanzierung													MS14	
AP4.1	Ökobilanzierung														
AP4.2	Ökologische Bewertung														

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Zum Zeitpunkt der Antragstellung lag der Weltrekord für den Wirkungsgrad von Siliziumsolarzellen bei 25,6 % [1]. Er wurde mit einer Solarzelle erreicht, die Hetero-Übergänge von amorphen zu kristallinem Silizium aufweist und bei der alle Kontakte auf der Rückseite angeordnet waren. Für Siliziumsolarzellen mit Kontakten auf der Vorder- und der Rückseite hielt zu diesem Zeitpunkt das Fraunhofer ISE den Rekord mit einem Wirkungsgrad von 25,1% [2]. Es waren mehrere Perovskitsolarzellen realisiert worden, die Wirkungsgrade über 20% erreichten [3–6]. Als Perovskitabsorber wurde dabei häufig Methyl-Ammonium-Blei-Triiodid ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) eingesetzt. Am Fraunhofer ISE wurden Perovskit-Solarzellen auf TCO-Glas mit einem Wirkungsgrad von bis zu 15% realisiert. Außerdem waren erst wenige Perovskit-Si-Tandemsolarzellen experimentell realisiert worden [7–10]. Die Tandemsolarzellen mit zwei Kontakten (2-Terminal) hatten zu diesem Zeitpunkt überwiegend die n-i-p-Konfiguration und

erreichten Wirkungsgrade bis zu 21,2% [11]. Problematisch waren vor allen die nicht angepasste Bandlücke des $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Absorbers, sowie optische Verluste durch parasitäre Absorption und Reflexion aufgrund ungünstiger Eigenschaften des eingesetzten Lochleiters Spiro-OMeTAD, sowie die begrenzte Stabilität der Solarzellen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeitsteilung im Projekt war wie folgt: Die auf die Herstellung funktionaler Materialien spezialisierten Industriepartner entwickelten verbesserte Materialien für den Ladungstransport. Dies waren zum einen Lochleiter (Heraeus) und zum anderen Elektronenleiter (Merck). Bereits während der Entwicklung sollten die Materialien zur frühen Charakterisierung in Perowskit-Einzelzellen getestet werden (Merck). Diese verbesserten Materialien wurden anschließend in den Forschungsinstituten zur Herstellung von Perowskit-Si-Tandemsolarzellen genutzt. Die Arbeiten an den Forschungsinstituten sollten sich darin unterscheiden welche Siliziumsolarzellentechnologie für die Unterzelle genutzt würde. Am HZB sollten Siliziumsolarzellen auf Basis der a-Si:H/c-Si Heteroübergang-Technologie verwendet werden, am Fraunhofer ISE sowohl konventionelle PERC Solarzellen, als auch Solarzellen mit hochtemperaturstabilen selektiven passivierten Kontakten. Tatsächlich stellte es sich für die Arbeit am vielversprechendsten heraus an beiden Instituten Hetero-Si Solarzellen zu nutzen. Die Differenzierung zwischen den Arbeiten der Institute erfolgte dann im Bereich der Perowskitsolarzellentechnologie. Die von Merck durchgeführten Arbeiten sollten sich insbesondere auf die Entwicklung eines Formulierungssystems und nasschemischen Beschichtungsverfahrens zur reproduzierbaren und skalierbaren Herstellung der Perowskit-Topzelle unter industriell relevanten Bedingungen konzentrieren. Im Gegensatz dazu wurden an der Albert-Ludwigs Universität Freiburg in enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE spezielle vakuumbasierte Abscheidetechnologien zur Herstellung der oberen Perowskitsolarzelle entwickelt. Die Projektpartner tauschten sich dabei selbstverständlich über Rezepturen, Vorgehensweisen etc. aus. Der Austausch von teilweise prozessierten Proben wurde im Verlauf des Projekts durchgeführt. Das Fraunhofer ISE übernahm zusätzlich noch die Arbeiten zur Ökobilanzierung und zur ökonomischen Bewertung.

2 Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

Insgesamt verlief das Projekt sehr erfolgreich und es wurde ein erheblicher Fortschritt in der Perowskit-Silizium-Tandemtechnologie erzielt, der jetzt Grundlage für zahlreiche weitere Projekte ist. Der Fortschritt ist auch noch einmal in der folgenden Grafik dokumentiert.

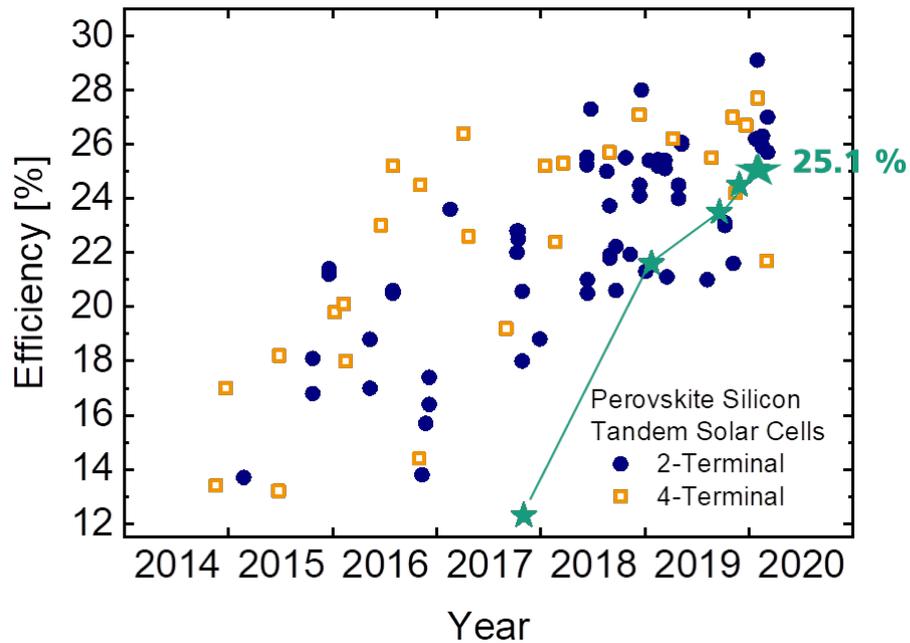


Abbildung 1: Entwicklung des Wirkungsgrades von Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen. Das Fraunhofer ISE ist erst 2016 mit PersiST in die Entwicklung dieser Zelltechnologie eingestiegen (Sterne). Innerhalb von PersiST konnte der Wirkungsgrad dann deutlich gesteigert werden.

Darüber hinaus konnten im Bereich der ökonomischen und ökologischen Bewertung alle Ziele erreicht werden und der potenzielle Nutzen der Perowskit-Silizium-Tandemtechnologie und die dafür notwendigen weiteren Entwicklungsschritte herausgearbeitet werden.

Entsprechend sind zahlreiche Veröffentlichungen (15 Paper in peer-reviewed Journals) entstanden. Aus diesem Grund wird der Bericht hier kurz gehalten und auf die Veröffentlichungen verwiesen. Wo noch keine Veröffentlichungen vorhanden sind, sind die Darstellungen dagegen ausführlicher.

2.1.1 AP 0 Projektkoordination

Die Entwicklungsaktivitäten in den APs 1 bis 4 erforderten eine enge Abstimmung der beteiligten Partner. Das AP 0 diente der regelmäßigen Abstimmung der konkret geplanten Arbeiten. Dazu wurden turnusmäßig Arbeitstreffen durchgeführt, bei denen die Zwischenergebnisse besprochen, und die Arbeiten der nächsten Periode detailliert festgelegt wurden. Zusätzlich wurden Telefonkonferenzen durchgeführt, um die Arbeiten zeitnah abstimmen zu können. Auch die Berichterstattung und das Projektcontrolling waren in diesem AP angesiedelt. Diese Arbeiten wurden vom Fraunhofer ISE koordiniert. Für die Berichte wurden Vorlagen erstellt, um ein konsistentes und einheitliches Reporting zu gewährleisten. Außerdem koordinierte das Fraunhofer ISE die Erarbeitung von Strategien zur Vermarktung der Ergebnisse.

Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

2.1.2 AP 1 Anpassung der Perowskitsolarzelle

Um die Perowskitsolarzelle auf den am ISE realisierten Silizium Unterzellen abzuschneiden, musste die Herstellung der Perowskitsolarzelle angepasst werden. Konkret war dazu die Entwicklung von transparenten, selektiven Elektrodensystemen, die Anpassung der Bandlücke des Perowskitabsorbers, die Vorderseitenentspiegelung und die Entwicklung einer angepassten Prozesssequenz und entsprechende Charakterisierung sowie die Evaluierung der Langzeitstabilität geplant. Da zu Beginn des Projektes Perowskitsolarzellen mit der n-i-p Konfiguration den höchsten Wirkungsgrad aufwiesen, wurde zunächst für diese eine angepasste Prozesssequenz entwickelt. Die optimierte Struktur ist in Abbildung 2 gezeigt.

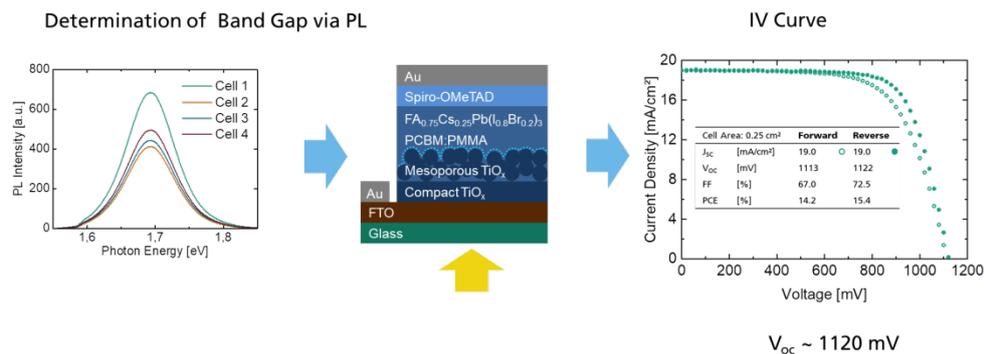


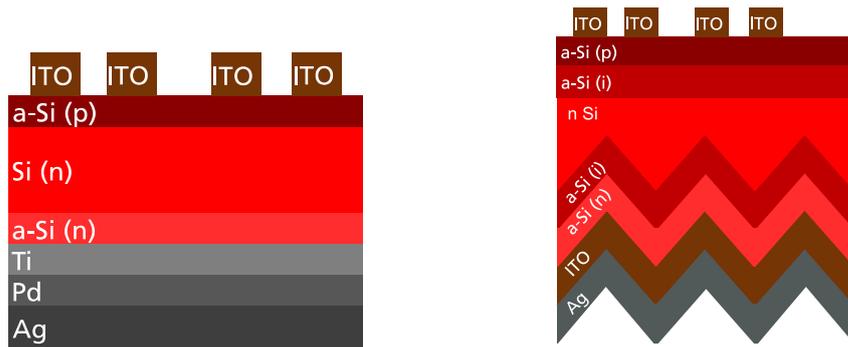
Abbildung 2: Angepasste Perowskitsolarzelle für die Anwendung in einer Tandemsolarzelle mit n-i-p Konfiguration. Aus dem Peak der Photolumineszenzmessung (PL) ist die optimierte Bandlücke von 1.69 eV zu erkennen (links). In der Mitte ist die Struktur ersichtlich, die sich besonders durch den bei niedrigen Temperaturen abgeschiedenen Elektronenkontakt aus einer kompakten und einer mesoporösen TiO₂ Schicht auszeichnet, und zusätzlich eine Passivierungsschicht aufweist. Damit konnten effiziente Solarzellen hergestellt werden, die insbesondere hohe Leerlauf-Spannungen über 1,1 V erreichten (rechts).

Typischerweise wird der Elektronenkontakt von Single-Junction Perowskitsolarzellen unter Verwendung von Hochtemperaturprozessen hergestellt. Um die darunter liegende Siliziumsolarzelle und die Verbindungsschicht aus Indium dotierten Zinnoxid (ITO) nicht zu schädigen ist dies aber für Tandemsolarzellen nicht möglich. Deshalb wurde ein Niedertemperaturprozess entwickelt, bei dem zuerst eine kompakte TiO₂-Schicht aufgedampft wird. Anschließend werden TiO₂-Nanopartikel in einer Suspension mittels Spincoating aufgetragen und die Schicht anschließend unter intensivem UV-Licht nachbehandelt. Details finden sich in den Veröffentlichungen J1 und J4. Im Vergleich zu einer Single-Junction Solarzelle muss die Bandlücke des Perowskitabsorbers in einer Tandemsolarzelle höher sein. Die optimale Bandlücke liegt dabei im Bereich von 1,65 – 1,69 eV [12, 13]. Eine gängige Strategie zu Erhöhung der

Bandlücke ist der Austausch von Iod durch Brom. Allerdings werden die Perowskite ab einem bestimmten Bromanteil instabil und zerfallen unter Beleuchtung in eine Brom- und eine Iod-reiche Phase. Deshalb wurde am Fraunhofer ISE zusätzlich zur Bandlückeneinstellung Cs auf der A-Position in der ABX_3 Perowskitstruktur verwendet. Mit der Komposition $FA_{0.75}CS_{0.25}Pb(I_{0.8}Br_{0.2})_3$ wurde schließlich ein stabiler Absorber mit hoher Bandlücke gefunden. Details finden sich in den Veröffentlichungen J11 und J13. Eine entscheidende Anpassung für den Einsatz in Tandemsolarzellen ist die Verwendung eines transparenten Kontaktes statt einer vollflächigen Metallisierung als Rückseitenkontakt. Typischerweise wird dafür gesputtertes ITO oder ein anderes transparentes, leitfähiges Oxid (TCO) genutzt. Um eine Schädigung des darunter liegenden Lochkontaktes zu verhindern, wurde in n-i-p Solarzellen häufig eine Pufferschicht wie MoOx eingesetzt. In unseren Untersuchungen erhöhte eine solche Pufferschicht allerdings die parasitäre Absorption und verschlechterte die Stabilität. Deshalb wurde ein besonders schonender Sputterprozess entwickelt, der die direkte Abscheidung von ITO auf dem Lochleiter erlaubt. Entscheidend war hier insbesondere die Verwendung einer niedrigen Temperatur. Details sind in J9 beschrieben. Ein weiterer wichtiger Schritt für die Erzielung hoher Wirkungsgrade war der Einsatz einer Oberflächenpassivierung aus PCBM und PMMA an dem Elektronenkontakt. Dadurch konnte die Leerlaufspannung deutlich gesteigert werden. Außerdem konnten durch eine Antireflexschicht die Reflexionsverluste deutlich reduziert werden (siehe auch J9). Parallel zu der Entwicklung der Perowskittechnologie wurden auch die Fähigkeiten aufgebaut, den Wirkungsgrad von Perowskitsolarzellen zuverlässig messen zu können (J3).

2.1.3 AP 2 Anpassung der Siliziumsolarzelle

Auch die Siliziumsolarzelle muss für die Verwendung in der Tandemsolarzelle angepasst werden. Hier wurden im Antrag die Arbeitsfelder Vorderseitenkontakt, Rückseitenkontakt, Lichtfallenstruktur, und Charakterisierung identifiziert. Während die Siliziumtechnologie schon sehr weit entwickelt ist, bestand im Bereich der Perowskite erheblicher Entwicklungsbedarf. Gerade zu Beginn des Projektes war deshalb der Wirkungsgrad der hergestellten Tandemsolarzellen nicht durch die Siliziumsolarzellen begrenzt. Aus diesem Grund lag der Fokus zunächst auf der Herstellung einfacher, schnell herstellbarer Bottomsolarzellen auf denen die Prozesse für die Perowskitsolarzellen optimiert werden konnten. Eine solche einfache Struktur ist in Abbildung 3 links gezeigt. Auf der rechten Seite ist dann eine weiterentwickelte Struktur gezeigt. Die zusätzlichen intrinsischen a-Si Schichten verbessern die Oberflächenpassivierung, die Rückseitentextur erhöht den Strom. Mit einer solchen Struktur konnten zum einen 720 mV Leerlaufspannung gezeigt werden. (Abbildung 4). Zum anderen wurde bereits mit dieser Struktur eine Situation erreicht, in der die Perowskitsolarzelle den Strom der Tandemsolarzelle begrenzt. D.h. es war nicht nötig die aufwendigere Lichtfallenstruktur (siehe nächster Abschnitt) einzusetzen. Außerdem war durch Arbeiten an der ANU [14] bekannt geworden, dass eine Verwendung diffundierter Emitter nur mit großem Aufwand möglich ist und keinen Vorteil bietet. Aus diesem Grunde wurde die in Abbildung 3 rechts gezeigte Struktur als Standard für die weitere Entwicklung verwendet.



Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Abbildung 3. Links: Einfache Solarzellenstruktur, die in ersten Tests von Tandemsolarzellen eingesetzt werden kann. Bei dieser Struktur liegt der Schwerpunkt nicht auf höchsten Wirkungsgraden, sondern einer schnellen Realisierbarkeit. Rechts: Mit einer Rückseitenstruktur lässt sich der Strom erhöhen, durch die intrinsischen Siliziumsschichten wird eine höhere Spannung erzielt.

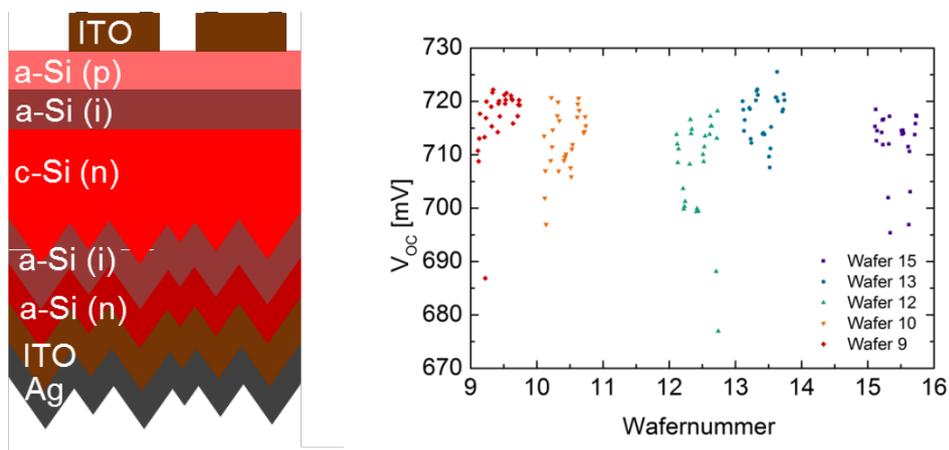


Abbildung 4. Links: Bottom-Solarzellenstruktur mit texturierter Rückseite. Rechts: An dieser Solarzellenstruktur durch die Suns-VOC Methode bestimmtes Spannungspotential (da sich keine Metallkontakte auf der Vorderseite kann nicht direkt die IV-Kennlinie gemessen werden). Man erkennt, dass Leerlaufspannungen bis über 720 mV möglich sind.

Wie in Abbildung 5 gezeigt, wurden die Möglichkeiten zur weiteren Verbesserung der Kurzschlussstromdichte mittels einer photonischen Lichtfallenstruktur auf der Rückseite einer vollständigen Siliziumsolarzelle demonstriert.

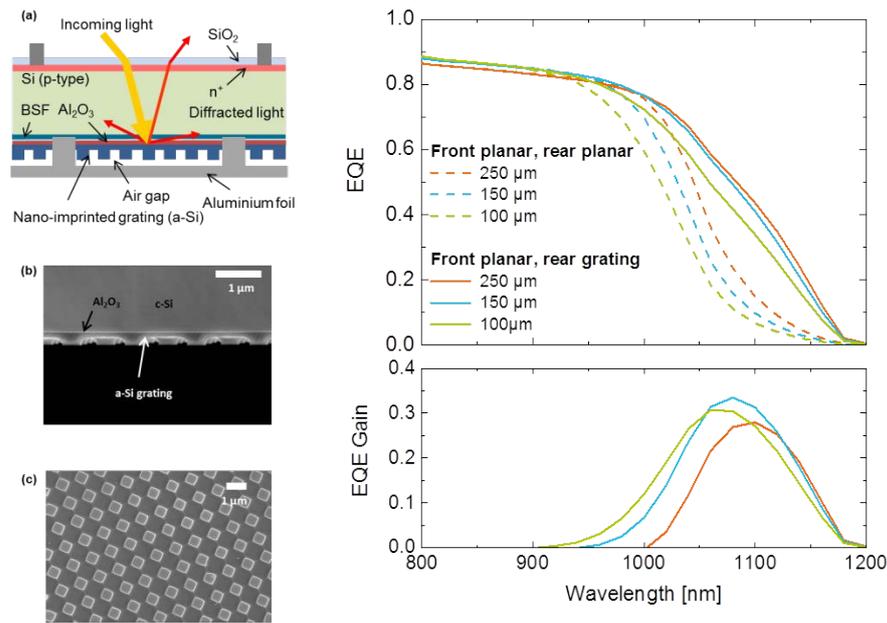


Abbildung 5. Links: (a) Skizze der realisierten Solarzelle. Auf der Rückseite befindet sich ein Kreuzgitter, das durch eine Kombination von Nanoimprint-Lithographie und Plasmaätzen in amorphem Silizium hergestellt wurde. Für eine lokale Kontaktierung wurde Aluminiumfolie mit einem Laserprozess mit der Rückseite verbunden. (b) REM Aufnahme des Querschnitts der Lichtfallenstruktur noch ohne Metallisierung. (c) REM Aufnahme der Rückseite ohne Metallisierung. Das Kreuzgitter ist sehr gut zu erkennen. Rechts: Gemessene EQE (oben) und Zunahme der EQE (unten). Für dünnere Solarzellen ist der Gewinn größer. Gewichtet mit dem AM1.5g Spektrum entspricht die EQE-Steigerung einer Erhöhung der Kurzschlussstromdichte von 1.2 mA/cm² (250 µm), 1.6 mA/cm² (150 µm) bzw. 1.8 mA/cm² (100 µm).

2.1.4 AP 3 Realisierung von Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen

Die für die jeweils angepassten Teilzellen entwickelten Prozesse wurden dann zur Herstellung kompletter Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen eingesetzt. Hierfür waren zum einen die Entwicklung einer angepassten Verbindungsschicht, sowie die Entwicklung von entsprechenden Prozesssequenzen notwendig. Weiteres Verbesserungspotenzial sollte dann auf Basis von eingehender Charakterisierung und elektro-optischer Modellierung erschlossen werden und schließlich die Verkapselung untersucht werden um die Langzeitstabilität zu erhöhen.

Als Verbindungsschicht bewährte sich relativ früh im Projektverlauf die ITO-Schicht, wie sie auch in reinen Si Hetero-Junction Solarzellen zum Einsatz kommt. Hier war also keine große Entwicklungsarbeit notwendig. Insgesamt war auch die Übertragbarkeit der für die angepassten Perowskit-Single Junction entwickelten Prozesse (AP1) in die Tandemzellen relativ gut. Ein erster wichtiger Schritt war die Realisierung von Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen in der n-i-p Konfiguration, wie sie in Abbildung 6 gezeigt ist. In dieser Struktur konnte eine besonders hohe Leerlaufspannung von über 1,8 V gezeigt werden (siehe J11). Leider war der Kurzschlussstrom relativ gering. Der Grund liegt insbesondere an der dicken Schicht Spiro-OMeTAD, die als Lochleiter fungiert. Hierdurch treten zum einen parasitäre Absorptionsverluste auf, zum anderen Reflexionsverluste aufgrund des ungünstigen Brechungsindexverlaufs. Zwei mögliche Lösungen für diesen Problem wurden in PersiST am Fraunhofer ISE untersucht: Zum einen ein Wechsel zu einer p-i-n Konfiguration bei der sich die problematische Lochleiterschicht auf der Licht abgewandten Seite der Perowskitsolarzelle befindet

(siehe nächster Abschnitt). Zum anderen gelang es am Ende des Projektes nach der Evaluierung einer Vielzahl von alternativen Lochleitern, eine dünne Schicht Spiro-TTB aufzudampfen, wodurch der Strom im Vergleich deutlich erhöht war (siehe Abbildung 7). Da es sich hier noch nicht um einen optimierten Prozess handelt konnte das hohe Spannungsniveau nicht ganz erreicht werden.

Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

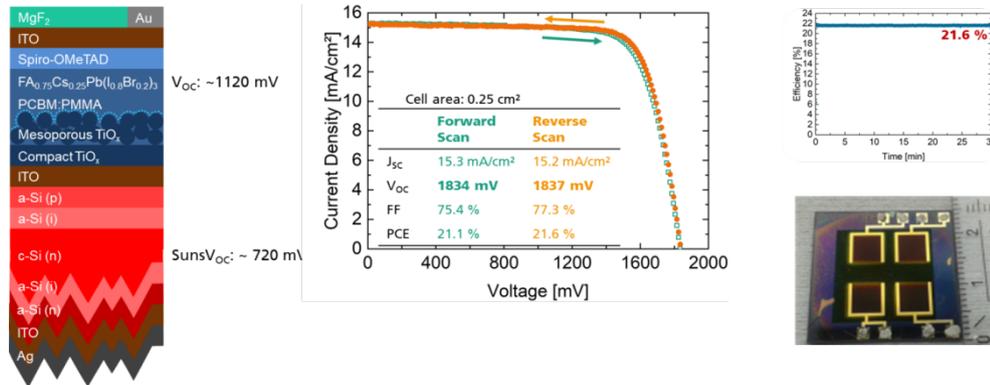


Abbildung 6: Der angepasste Prozess für die Herstellung von n-i-p Perovskitsolarzellen konnte erfolgreich in Tandemsolarzellen eingesetzt werden. Es wurden besonders hohe Spannungen erzielt. Der Strom war allerdings aufgrund von parasitären optischen Verlusten eher gering.

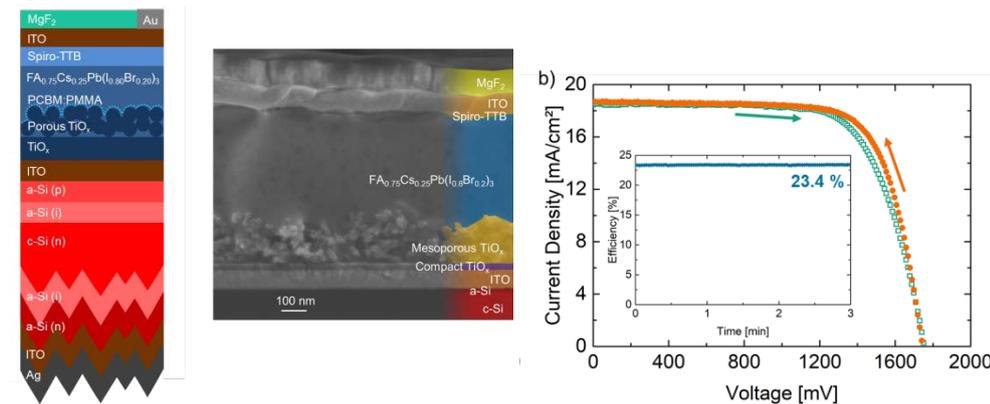


Abbildung 7: Durch die Verwendung eines dünnen aufgedampften Lochleiters (Spiro-TTB) konnte der Strom für die n-i-p Konfiguration deutlich gesteigert werden.

Um die Probleme mit dem Lochkontakt in der n-i-p Konfiguration zu umgehen wurden auch Tandemsolarzellen in p-i-n Konfiguration untersucht (Abbildung 8). Ausschlaggebend hierfür war auch, dass für diese Konfiguration eine besonders hohe Stabilität gegen Umwelteinflüssen gefunden wurde [15]. Während der entwickelte Absorber von der n-i-p Konfiguration übernommen werden konnte, mussten die übrigen Kontakt- und Pufferschichten neu entwickelt werden. Insgesamt konnten so aber sehr effiziente Perovskit-Silizium-Solarzellen mit >25% Wirkungsgrad realisiert werden (Abbildung 9), die darüber hinaus überaus langzeitstabil waren (siehe Abbildung 10). Details finden sich in J14.

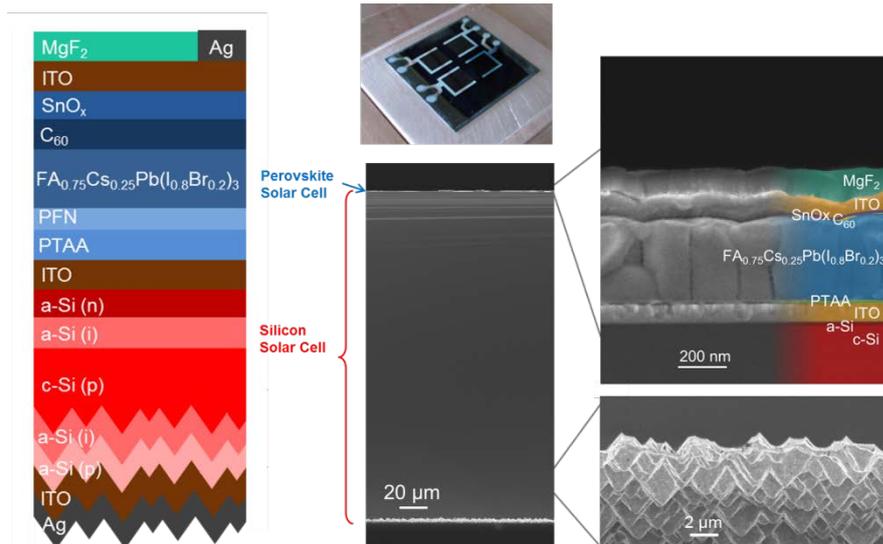


Abbildung 8: Links: Struktur der realisierten p-i-n Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle. Mitte oben: Photographie von vier Solarzellen, die gemeinsam auf einem Substrat hergestellt wurden. Mitte unten und rechts: Elektronenmikroskopaufnahme in Kantenansicht. Die Perowskitsolarzelle ist deutlich dünner als die Siliziumsolarzelle. In den Zoomaufnahmen ist die gute Kristallstruktur des Perowskits und die dünnen Kontaktschichten zu erkennen, bzw. die Textur auf der Rückseite.

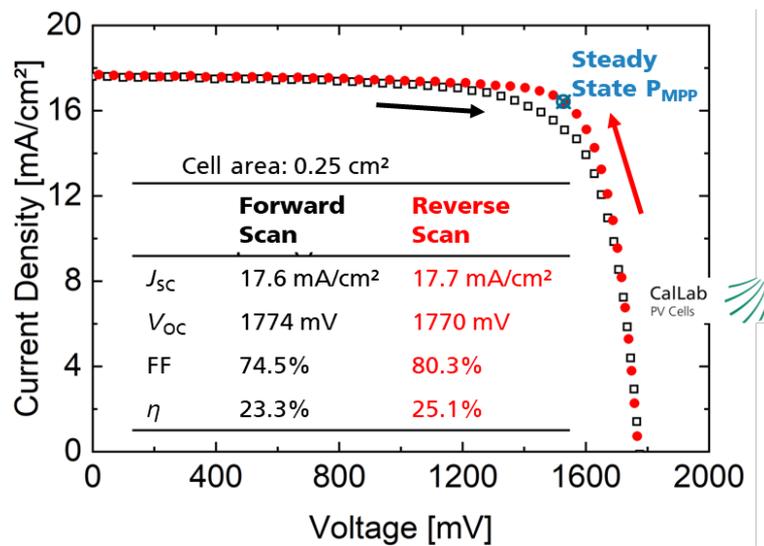
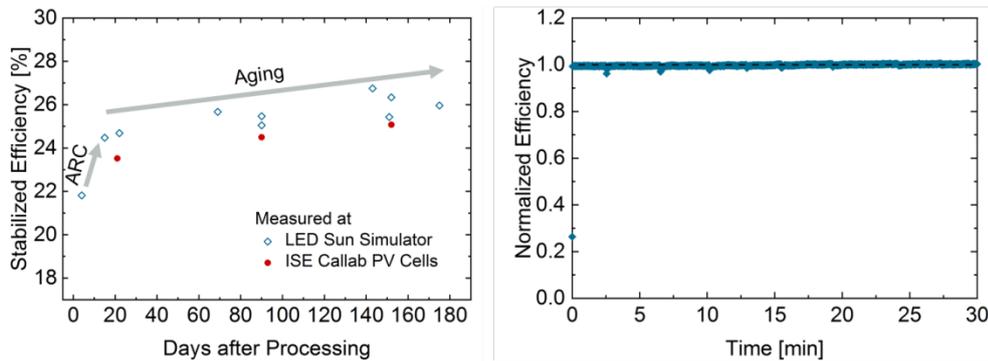


Abbildung 9: In zertifizierten Messungen der ISE CalLabs konnte ein hoher Wirkungsgrad von 25,1% bestätigt werden. Dabei wurden auch 80% Füllfaktor erreicht.



Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

Abbildung 10: Die in den vorherigen Abbildungen dargestellte Solarzelle wurde über einen Zeitraum von 5 Monaten immer wieder vermessen. Dabei wurde festgestellt, dass der Wirkungsgrad kontinuierlich anstieg. Auch während den einzelnen Messungen war der Wirkungsgrad stabil. Die Solarzelle war nicht eingekapselt, zwischen den Messungen wurde sie aber in Inertatmosphäre gelagert.

Wie aus den in Abbildung 11 gezeigten Messungen der externen Quanteneffizienz erkennbar ist, begrenzt die Perovskitsolarzelle den Strom der Tandemsolarzelle. Zudem treten beträchtliche Reflexionsverluste auf. Optische Simulationsrechnungen (siehe auch J7 und J8) zeigten, dass die Verwendung texturierter Substrate diese Verluste deutlich reduziert (siehe Abbildung 12). Auch der Jahresenergieertrag profitiert von einer Texturierung. Aus diesem Grund wurde in Zusammenarbeit mit der Universität Freiburg ein Hybridprozess entwickelt, der Aufdampfen und nasschemische Abscheidung kombiniert und die Abscheidung auf texturierten Substraten ermöglicht (siehe Abbildung 13). Details finden sich in J5, J10, 12 und J13. Leider konnte vor Projektende keine Tandemsolarzelle unter Verwendung dieses Prozesses realisiert werden.

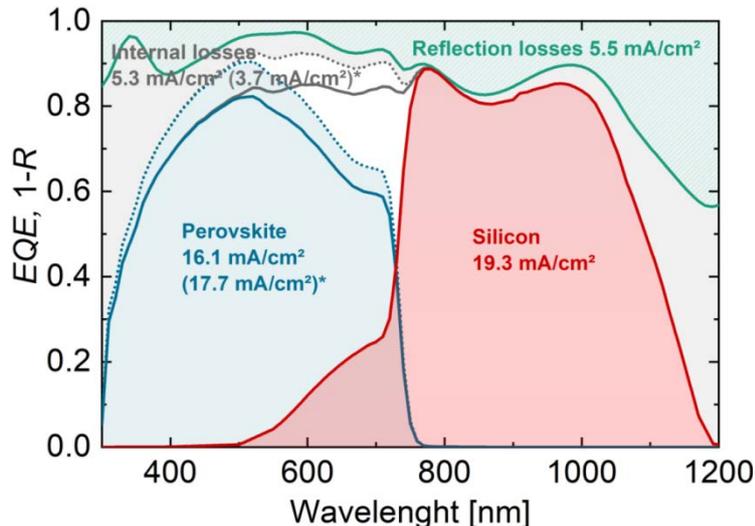
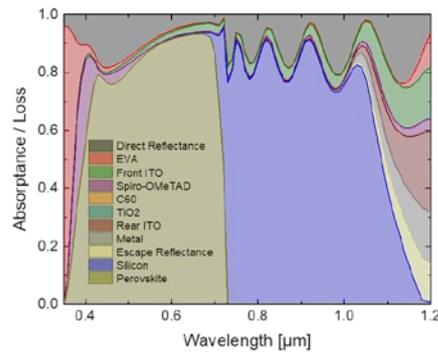


Abbildung 11: Externe Quanteneffizienz (EQE) der p-i-n Perovskit-Silizium-Tandemsolarzelle. Durch Integration über das AM1.5g Spektrum kann der Strom der Einzelzellen berechnet werden. Während die Silizium-Solarzelle 19,3 mA/cm² liefert, kommt die Perovskitsolarzelle nur auf 17,7 mA/cm².

In Kooperation mit der Uni Freiburg und dem HZB wurden im Rahmen von PersiST darüber hinaus erste große Perovskit-Silizium Tandemsolarzellen realisiert, bei denen der Absorber an der Uni Freiburg aufgedampft wurde, auf zuvor durch Blade-Coating am ISE appliziertes PEDOT:PSS (siehe Abbildung 14).

Front Side Planar



Front Side Textured

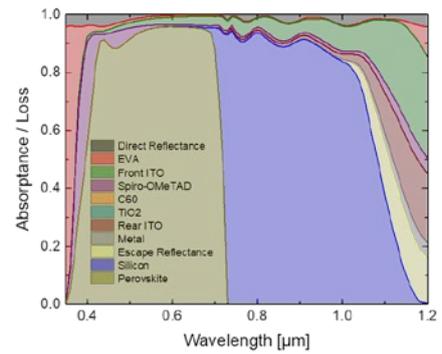


Abbildung 12: Verlustanalyse für ein Modul mit Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen auf Basis von optischen Simulationsrechnungen. Durch Verwendung von texturierten Substraten lassen sich die Reflexionsverluste deutlich reduzieren. Außerdem wird die für eine Stromanpassung notwendige Dicke der Perowskitsolarzelle auf ein erreichbares Maß reduziert.

Hybrid Route

- 1st step: co-evaporation of PbI_2/CsI
- 2nd step: spin coating of FABr/FAI solution

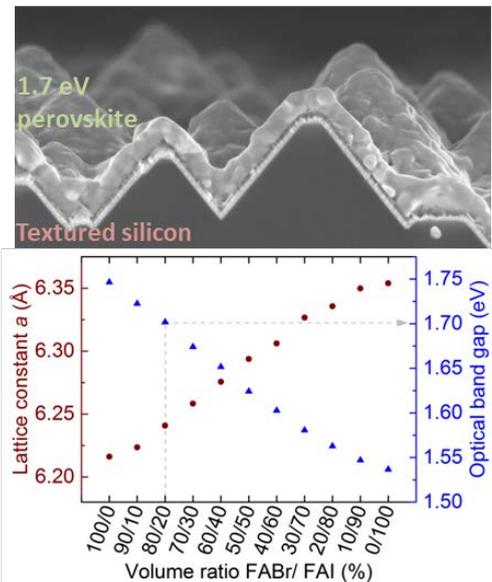
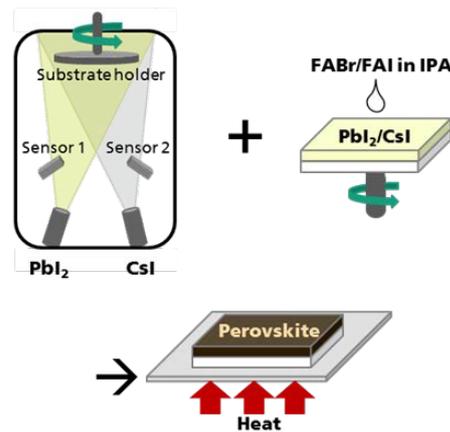


Abbildung 13: Links: Schema des Hybridabscheidung. Zunächst werden die anorganischen Bestandteile PbI_2 und CsI ko-verdampft. Anschließend werden FaBr und FAI aus der Lösung aufgebracht. Rechts oben: Mit der Hybridabscheidung können texturierte Substrate beschichtet werden. Rechts unten: Durch eine Variation der nasschemischen Komponenten kann die Bandlücke auch im Hybridverfahren flexibel eingestellt werden.

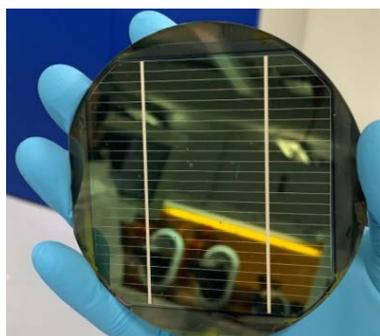


Abbildung 14. Große Perowskit-Silizium Tandemsolarzelle, die in einer Kollaboration von Heraeus, HZB, Uni Freiburg und Fraunhofer ISE unter Verwendung skalierbarer Prozesse, wie Blade-Coating und Aufdampfen hergestellt wurde.

Darüber hinaus wurden Charakterisierungsmethoden entwickelt, welche die Homogenität wichtiger Eigenschaften über die Fläche (Bandlücke, Stromgeneration) bestimmen können. Diese können nun die weiteren Entwicklungsschritte für großflächige Tandemsolarzellen weiter unterstützen. Details finden sich in J2, J6, und J14.

2.1.5 AP 4 Ökonomischen Bewertung und Ökobilanzierung

In diesem Arbeitspaket sollte die Perowskit-Silizium-Tandemtechnologie aus ökonomischer und aus ökologischer Sicht bewertet werden. Dazu wurde zum einen eine Lebensdauerzyklusanalyse durchgeführt, zum anderen die Stromgestehungskosten berechnet und mit der Siliziumtechnologie verglichen.

AP4.1 Ökobilanzierung

In diesem Arbeitspaket werden die Ergebnisse der ökologischen Bewertung für eine Perowskit-Silizium-Tandemzellen vorgestellt. Da hier keine Veröffentlichung vorliegt erfolgt die Vorstellung etwas ausführlicher. Zunächst werden für das *System Solarzelle* die Umweltwirkungen bestimmt und die Beiträge der einzelnen Komponenten detailliert aufgeschlüsselt. Anschließend werden die Treibhausgasemissionen für ein *Photovoltaiksystem* auf Basis der Tandemzelle mit einem Photovoltaiksystem auf Basis einer a-Si/Si Hetero-Junction (HIT) mit einander verglichen. Für die ökologische Bewertung wird die standardisierte Methodik des Life Cycle Assessments (LCA) genutzt (ISO 14040/14044). Die betrachteten Umweltwirkungen werden mit der Methode „ReCiPe Midpoint Hierarchist“ berechnet. Für die Hintergrundprozesse wird die LCA-Datenbank ecoinvent 3.5 genutzt.

Systemgrenzen und Datengrundlage

Der Aufbau der untersuchten Tandemzelle ist in Abbildung 15 dargestellt. Die Material- und Energiebedarfe für die Herstellung der Perowskit Topzelle sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Der Materialbedarf für die Herstellung der Perowskitschicht wurden im Rahmen des Projekts ermittelt. Die Daten wiederum für die Herstellung dieser Materialien stammen aus [16, 17]. Die Materialdaten für die anderen Schichten und alle Strombedarfe für die Auftragsprozesse stammen aus [18].

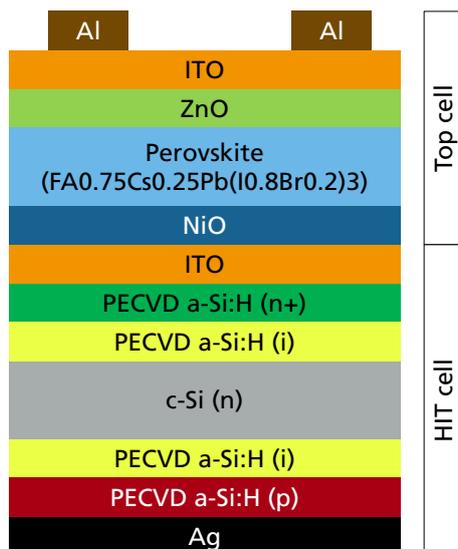


Abbildung 15: Aufbau der in der LCA analysierten Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle.

Tabelle 1: Material- und Strombedarf für die Herstellung der Perowskit Topzelle

Schicht	Materialien	Menge in g/m ²	Auftragsprozess	Strombedarf in kWh/m ²
Al	Aluminium	0,338	Sputtering	3,47
ITO	ITO powder	1,79	Sputtering	5,79
ZnO	ZnO Monochlorobenzene	0,491 30,68	Screen printing	0,85
Perowskit	DMSO Dimethyl formamide Formamidinium iodide Cesium iodide Lead bromide Lead iodide	0,088 0,304 0,052 0,026 0,044 0,129	Screen printing	0,91
NiO	Ethylene glycol Ethylene diamine Nickel nitrate hexahydrate	12,43 0,671 2,597	Screen printing	0,97

Die Energie- und Materialbedarf für die Herstellung der Silizium-Bottomsolarzelle basieren auf einer HIT-Solarzelle und stammen aus [19]. Zusätzlich wurden noch folgende Anpassungen für die Herstellung berücksichtigt: Es wurde eine Wafer-Dicke von 150 µm und ein Kerf-Loss von 80 µm angesetzt. Für den Strombedarf wurde angenommen, dass dieser durch den europäischen Strommix gedeckt wird. Die funktionelle Einheit für die ökologische Bewertung der Tandemzelle ist 1 m² Zellfläche. Für die Bewertung eines Photovoltaiksystems auf Basis der Tandemzelle wurde als Grundlage der ecoinvent Datensatz „photovoltaic plant construction, 570kWp, multi-Si, on open ground [GLO]“ verwendet. Dabei wurde anstatt des Datensatzes „photovoltaic cell production, single-Si wafer [RER]“ die oben beschriebene Tandemzelle genutzt. Für das Referenz Photovoltaiksystem wurde ebenfalls der Datensatz „photovoltaic cell production, single-Si wafer [RER]“ ausgetauscht. Stattdessen wird eine HIT-Solarzelle verwendet [19]. Die funktionelle Einheit für den Vergleich der beiden Photovoltaiksysteme ist 1 kWp. Für das Photovoltaiksystem mit der Tandemzelle wird ein Wirkungsgrad von 28% und für das Photovoltaiksystem mit der HIT-Solarzelle ein Wirkungsgrad von 21% angesetzt.

LCA-Ergebnisse für Tandemzelle

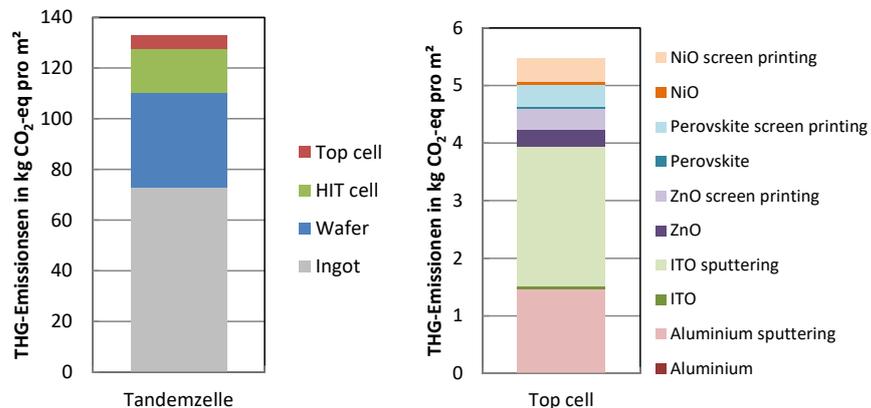


Abbildung 16: Treibhausgasemissionen für die Tandemzelle (links) und die Perowskit-Topzelle (rechts).

Abbildung 16 zeigt die Treibhausgas-(THG)-emissionen für die Tandemzelle (links) und detailliert aufgeschlüsselt für die Topzelle (rechts). Die gesamten THG-Emissionen der Tandemzelle betragen 133 kg CO₂-eq pro m². Dabei entfallen 96% der THG-Emissionen der Tandemzelle auf die Herstellung der Bottomzelle (inklusive Wafer und Ingot). Die Topzelle ist nur für 4% der THG-Emissionen verantwortlich. Die Aufschlüsselung der THG-Emissionen innerhalb der Topzelle zeigt, dass die THG-Emissionen hauptsächlich durch den Strombedarf für die Auftragsprozesse verursacht werden (ca. 92%).

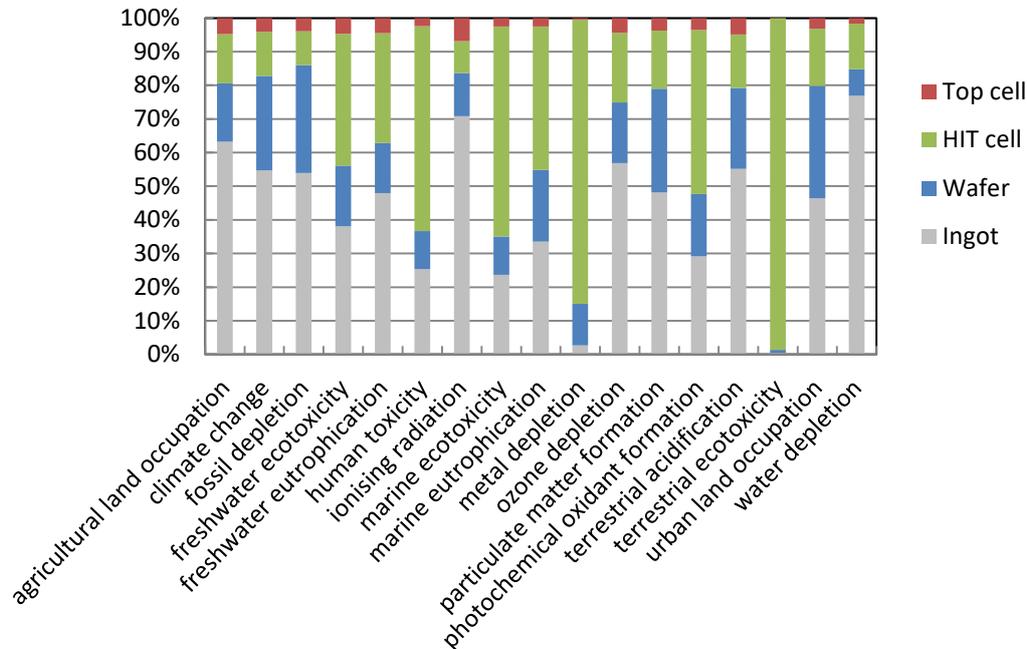


Abbildung 17: Aufteilung der Umweltwirkungen in der Tandemzelle

Abbildung 17 zeigt die Aufteilung von weiteren Umweltwirkungen. Von allen betrachteten Umweltwirkungen hat die Topzelle den größten Anteil in der Kategorie Ionisierende Strahlung (ca. 7%). Diese Kategorie wird maßgeblich durch den Strombedarf geprägt. Bei den meisten Umweltwirkungen liegt der Anteil der Topzelle wie schon bei den Treibhausgasemissionen um die 4%. Noch unter 4% liegt der Anteil der Topzelle bei den Umweltwirkungen Humantoxizität und Ökotoxizität. Dieses Ergebnis wurde erzielt, obwohl Bleiemissionen von 1% der für den Perowskiten benötigten Bleimenge angesetzt wurden. Damit sollte eine mögliche Freisetzung von Blei durch beschädigte Module abgebildet werden. Hieraus lässt sich schließen, dass aufgrund der insgesamt geringen Bleimengen in den sehr dünnen Perowskitschichten Blei kein wesentliches ökologisches Problem, zumindest aus der Perspektive einer LCA, für die Perowskittechnologie zu sein scheint.

THG-Emissionen für PV System

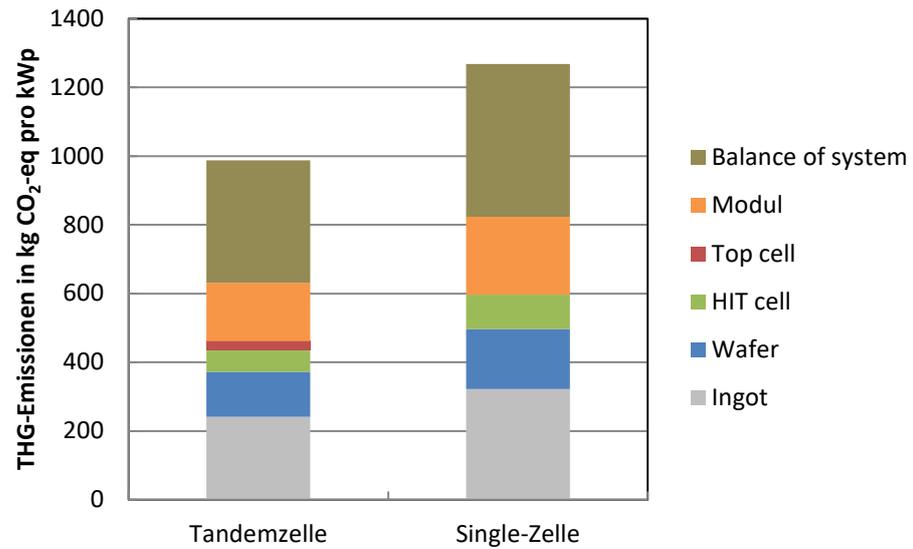


Abbildung 18: THG-Emissionen für ein Photovoltaiksystem mit Tandemzelle und Single-Zelle

Abbildung 18 vergleicht die THG-Emissionen für ein Photovoltaiksystem einmal mit Tandemzelle und einmal mit Single-Junction HIT-Zelle. Bezogen auf die installierte Leistung reduziert die Tandemzelle die THG-Emissionen um etwa 22%. Dies wird durch eine Reduzierung des spezifischen Materialbedarfes bei allen Komponenten infolge des höheren Wirkungsgrades erreicht. Eine große Unsicherheit bildet bislang noch die Lebensdauer der Tandemzelle. Bei einer Lebensdauer von 30 Jahren für die Single-Junction HIT-Zelle müsste die Tandemzelle mindestens 23 Jahre funktionsfähig sein, damit insgesamt geringere Treibhausgasemissionen verursacht werden.

Dieses Ergebnis lässt sich insgesamt auf die ökologische Bewertung übertragen: Aufgrund der geringen Material- und Energieverbräuche für die Herstellung der Perowskit-Topzelle steigen die ökologischen Auswirkungen weniger stark an als die Stromausbeute aufgrund des höheren Wirkungsgrades. Deshalb ist die Perowskit-Silizium-Tandemtechnologie insgesamt ökologisch vorteilhaft. Voraussetzung ist allerdings das Erreichen ausreichend langer Lebensdauern.

AP4.1 Ökonomische Bewertung

Wir haben eine umfassende Analyse der Wirtschaftlichkeit der Perowskit-Silizium-Tandemtechnologien auf der Grundlage von Bottom-up-Schätzungen für Perowskit-Prozesse durchgeführt. Diese wurde als J15 zur Veröffentlichung akzeptiert und befindet sich gerade im Veröffentlichungsprozess. Außerdem haben wir die Wirtschaftlichkeit der Tandemtechnologie mit der von Perowskit bzw. Silizium Singlejunction Solarzellen verglichen. Dieser Vergleich wurde auf Basis der Stromgestehungskosten durchgeführt. Weil die Perowskittechnologie jetzt noch nicht industriell verfügbar ist, haben wir für diesen Vergleich die unterschiedlichen technologischen Entwicklungen bis zum Jahr 2025 extrapoliert. Im Ergebnis versprechen Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen für Anwendungen im Wohnbereich einen klaren Kostenvorteil gegenüber Perowskit-Single-Junction-Solarzellen. Bei Anwendungen in Großanlagen sind Tandemsolarzellen tendenziell dann vorteilhaft, wenn die Perowskittechnologie am oberen Ende der vorhergesagten Kostenspanne liegt. Bei niedrigeren Kosten für die Perowskite liegen die Technologien auf dem gleichem Niveau. Sowohl bei Großanlagen- als auch bei Haushaltsanwendungen liegt der Kostenvorteil gegenüber Silizium in der Größenordnung von 10-20%, je nachdem,

ob sich die Perowskitherstellung am oberen oder unteren Ende des vorhergesagten Bereichs befindet. Damit dieser Vorteil realisiert werden kann, muss die Perowskittechnologie bis zum Jahr 2025 herum zu einem Niveau reifen, bei dem Single-Junction-Wirkungsgrade von über 22% möglich sind - was Tandem-Wirkungsgraden von weit über 30% entspricht - und die Systemlebensdauer mit der von Silizium vergleichbar sein, und zwar alles unter Verwendung einer kostengünstigen Produktion im industriellen Maßstab. Ein früherer Markteintritt würde die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Silizium verbessern und die Anforderungen an hohe Wirkungsgrade verringern. Umgekehrt bedeutet dies auch, dass Zeit ein kritischer Faktor ist und jegliche Verzögerungen beim Erreichen der Kosten- und Effizienzprognosen die Chance auf einen erfolgreichen Markteintritt verringern würden. Darüber hinaus würden bereits geringe Erhöhungen der Kapitalkosten in der Größenordnung von 2%abs, die durch eine Risikoprämie für neue Technologien verursacht werden, jeden Kostenvorteil ausgleichen. Daher ist es von größter Bedeutung, den langfristig stabilen Einsatz im Feld nachzuweisen, um schnell das Vertrauen potenzieller Geldgeber zu gewinnen. Da die Kostenschätzungen nahe beieinander liegen und eine erhebliche Unsicherheit über die tatsächliche Perowskit-Technologie im industriellen Maßstab besteht, ist es daher noch ein offener Wettlauf zwischen der etablierten Siliziumtechnologie und den auf Perowskit basierenden Neueinsteigern, was die wirtschaftlich attraktivste Option sein wird.

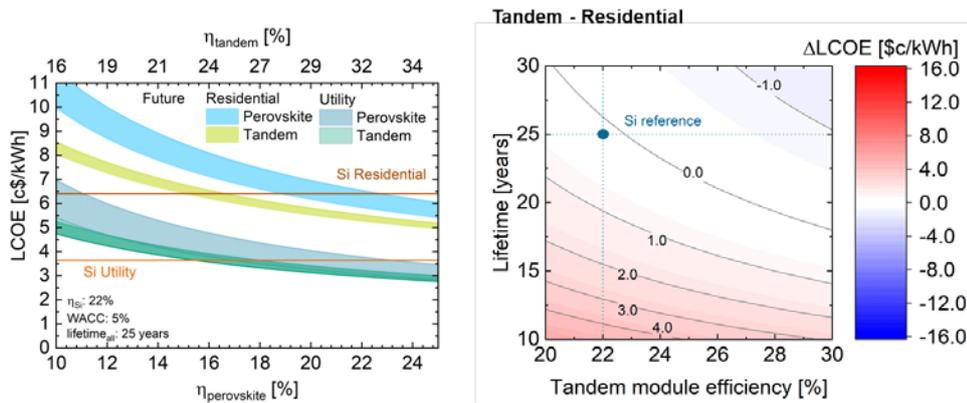


Abbildung 19. Zukünftige Stromgestehungskosten für Siliziumsolarzellen, Perowskitsolarzellen und Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen in Abhängigkeit des Modulwirkungsgrades unter der Annahme von insgesamt weltweit 1TWp installierter Photovoltaik Leistung (links). Da die Markteinführung der Perowskittechnologie erst in der Zukunft stattfinden wird, müssen entsprechende Kostenvergleiche die weiter fortschreitende Entwicklung der Siliziumtechnologie berücksichtigen. Rechts ist die Kostendifferenz im Vergleich zur reinen Siliziumtechnologie mit einem Modulwirkungsgrad von 22% gezeigt. Mit einer deutlichen Wirkungsgradsteigerung lassen sich signifikante Kosteneinsparungen durch eine Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle erreichen, vorausgesetzt die Lebensdauern sind ausreichend hoch.

2.1.6 Zusammenfassung der wichtigsten Projektergebnisse

Zusammenfassend waren die wichtigsten Ergebnisse des Teilprojektes des Fraunhofer ISE

1. Entwicklung eines **Niedertemperaturprozesses** zur Abscheidung eines **TiOx**-Elektronenkontaktes für n-i-p Perowskitsolarzellen, welcher in Kombination mit Passivierungsschichten hohe Leerlaufspannungen von >1,8 V ermöglicht. (J1, J4, J11)
2. Entwicklung eines **stabilen $\text{FA}_{0,75}\text{CS}_{0,25}\text{Pb}(\text{I}_{0,8}\text{Br}_{0,2})_3$ Perowskitabsorbers** mit optimierter hoher Bandlücke von 1.69 eV, welcher sowohl in n-i-p als auch in p-i-n Solarzellen eingesetzt werden kann. (J9, J11, J13, J14)
3. Entwicklung eines Prozesses zum **schädigungsarmen direkten Sputtern von ITO**-Schichten auf organische Lochleiter, der parasitär absorbierende Pufferschichten überflüssig macht. (J9)
4. Entwicklung von **Charakterisierungsroutinen** für Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen, die eine verlässliche Bestimmung des Wirkungsgrades, sowie die Aufklärung lateraler Inhomogenitäten ermöglichen. (J2, J3, J6)
5. Aufbau von **Simulationsroutinen**, welche die Optimierung der optischen Eigenschaften der Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen ermöglichen, sowie die Berechnung des Jahresenergieertrages. (J7, J8)
6. Realisierung einer p-i-n Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle mit exzellenter Stabilität und **25,1% zertifiziertem Wirkungsgrad**. (J14)
7. Entwicklung eines **Hybridprozesses**, der Verdampfen und nasschemische Abscheidung kombiniert und die Abscheidung von komplexen Perowskitzusammensetzungen auf **texturierten Substraten** ermöglicht. (J5, J10, J12, J13)
8. Realisierung einer **großformatigen Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle** in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern.
9. Bestimmung eines **ökologischen Vorteils** durch Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen im Vergleich zu reinen Siliziumsolarzellen, aufgrund des höheren Wirkungsgrades bei gleichzeitig nur geringen zusätzlichen Belastungen, auch unter der Annahme von Verwendung bleihaltiger Perowskite im Rahmen einer Lebensdauerzyklusanalyse.
10. Identifikation des Potenzials zur Kostensenkung durch Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen im Vergleich zur Siliziumtechnologie und Perowskit Einzelzellen und der dafür notwendigen Bedingungen im Rahmen der Berechnung von **Stromgestehungskosten**. (J15)

2.2 Verwertbarkeit der Ergebnisse

 Ablauf und Ergebnisse des
 Vorhabens

Wissenschaftlich und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	Geplant	Erfolgt
1. Aufbau von Charakterisierungstechnologien für Perowskit und Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen und Anwendung dieser mit Industriepartnern in beiden Teilfeldern und wissenschaftliche Expertise in diesem wachsenden Feld der PV	2017ff	Know-How zur kalibrierten Messung von Perowskit-Si-Tandemsolarzellen wurde aufgebaut und seitdem im ISE Callab erfolgreich für zahlreiche Industrienaufträge eingesetzt. Auf Basis der weitergehenden orts aufgelösten Charakterisierungsmethoden konnten bereits Industrienaufträge generiert werden und gemeinsam mit der Industrie BMWI-Anträge vorbereitet werden.
2. Identifizierung geeigneter Materialien für die Anwendung in Perowskit und Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen. Umsetzung der Technologie mit einem industriellen Partner.	2018ff	FACS wurde als vielversprechendes Absorbermaterial identifiziert, außerdem geeignete Kontakmaterialien, sowohl für die pin als auch die nip Konfiguration. Diese werden jetzt mit unterschiedlichen Partnern weiterentwickelt (siehe wirtschaftliche Verwertung)
3. Ergebnisse zur ökonomischen Bewertung und Ökobilanzierung wichtiges Know How für Endanwender und Materialhersteller zur Bewertung ihrer Produkte	2019ff	Verfahren zur Bewertung wurden aufgebaut und können nun schnell für die jeweiligen Fragestellungen eingesetzt werden. Z.T. konnten hier auch schon direkte Industrienaufträge generiert werden. Darüber hinaus haben die Ergebnisse direkt die Prioritäten weiterer Forschungsprojekte bestimmt.

Wirtschaftliche Verwertung		Geplant	Erfolgt
1.	Umsetzung der entwickelten Technologien mit Industriepartnern in bilateralen oder geförderten Projekten	2019ff	BMWi Projekte mit Industriepartnern
2.	Lizenzvergaben	2019 ff	Noch keine Lizenz vergeben
Wissenschaftlich / technische Verwertung		Geplant	Erfolgt
1.	Schaffung und Sicherung des Kompetenzvorsprungs	Während der Laufzeit	Die Kompetenzen im Bereich Perowskit-Silizium Tandemsolarzellen wurden stark ausgebaut. Insgesamt ist das Konsortium weltweit führend. Das HZB insbesondere durch den erzielten Wirkungsgradrekord, das Fraunhofer ISE im Bereich der Charakterisierung.
2.	Standort Deutschland als Technologieführer stärken	Während der Laufzeit	Aufbauend auf den in PersiST erarbeiteten Technologien können jetzt sowohl Solarzellenherstellern als auch dem deutschen Maschinenbau und Materialherstellern konkrete Angebote für Entwicklungsprojekte gemacht werden.
3.	Etablierung von produktionsrelevanten Technologien für Perovskite/Silizium Tandem Solarzellen	Während der Laufzeit	Am Fraunhofer ISE konnte die Produktion von Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen aufgebaut werden, die in nächsten Schritte auf große Flächen hochskaliert werden soll.
4.	Ausbildung von Wissenschaftlern	Während der Laufzeit	2 Promotionen (Laura Mundt, Patricia Schulze) und zahlreiche Masterarbeiten, Praktika
5.	Veröffentlichungen	Während der Laufzeit	Veröffentlichung von 15 Journal Papern, zahlreiche Konferenzbeiträge

2.3 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Ablauf und Ergebnisse des
Vorhabens

- J1. P. S. C. Schulze, A. J. Bett, K. Winkler, A. Hinsch, S. Lee, S. Mastroianni, L. E. Mundt, M. Mundus, U. Würfel, S. W. Glunz, M. Hermle, and J. C. Goldschmidt, "Novel Low-Temperature Process for Perovskite Solar Cells with a Mesoporous TiO₂ Scaffold," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 9, no. 36, pp. 30567–30574, 2017, doi: 10.1021/acsami.7b05718.
- J2. L. E. Mundt, F. D. Heinz, S. Albrecht, M. Mundus, M. Saliba, J. P. Correa-Baena, E. H. Anaraki, L. Korte, M. Gratzel, A. Hagfeldt, B. Rech, M. C. Schubert, and S. W. Glunz, "Nondestructive Probing of Perovskite Silicon Tandem Solar Cells Using Multiwavelength Photoluminescence Mapping," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 7, no. 4, pp. 1081–1086, 2017, doi: 10.1109/JPHOTOV.2017.2688022.
- J3. M. Mundus, B. Venkataramanachar, R. Gehlhaar, M. Kohlstädt, B. Niesen, W. Qiu, J. P. Herterich, F. Sahli, M. Bräuning, J. Werner, J. Hohl-Ebinger, G. Uytterhoeven, U. Würfel, C. Ballif, M. C. Schubert, W. Warta, and S. W. Glunz, "Spectrally resolved nonlinearity and temperature dependence of perovskite solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 172, pp. 66–73, 2017, doi: 10.1016/j.solmat.2017.07.013.
- J4. A. J. Bett, P. S. C. Schulze, K. Winkler, J. Gasparetto, P. F. Ndione, M. Bivour, A. Hinsch, M. Kohlstädt, S. Lee, S. Mastroianni, L. E. Mundt, M. Mundus, C. Reichel, A. Richter, C. Veit, K. Wienands, U. Würfel, W. Veurman, S. W. Glunz, M. Hermle, and J. C. Goldschmidt, "Low temperature perovskite solar cells with an evaporated TiO₂ compact layer for perovskite silicon tandem solar cells," *Energy Procedia*, vol. 124, pp. 567–576, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.293.
- J5. S. Rafizadeh, K. Wienands, P. S. C. Schulze, A. J. Bett, L. C. Andreani, M. Hermle, S. W. Glunz, and J. C. Goldschmidt, "Efficiency Enhancement and Hysteresis Mitigation by Manipulation of Grain Growth Conditions in Hybrid Evaporated-Spincoated Perovskite Solar Cells," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 11, no. 1, pp. 722–729, 2018, doi: 10.1021/acsami.8b16963.
- J6. L. E. Mundt, W. Kwapil, M. A. Yakoob, J. P. Herterich, M. Kohlstadt, U. Würfel, M. C. Schubert, and S. W. Glunz, "Quantitative Local Loss Analysis of Blade-Coated Perovskite Solar Cells," *IEEE Journal of Photovoltaics*, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2018.2888835.
- J7. N. Tucher, O. Höhn, J. C. Goldschmidt, and B. Bläsi, "Optical modeling of structured silicon-based tandem solar cells and module stacks," *Optics Express*, vol. 26, no. 18, A761, 2018, doi: 10.1364/OE.26.00A761.
- J8. N. Tucher, O. Höhn, J. N. Murthy, Martinez, J. C. Steiner, M., A. Armbruster, E. Lorenz, B. Bläsi, J. C. Goldschmidt, N. Tucher, O. Höhn, J. C. Martinez, M. Steiner, B. Bläsi, and J. C. Goldschmidt, "Energy yield analysis of textured perovskite silicon tandem solar cells and modules," *Optics Express*, vol. 27, no. 20, A1419, 2019, doi: 10.1364/OE.27.0A1419.
- J9. A. J. Bett, K. M. Winkler, M. Bivour, L. Cojocar, Ö. S. Kabakli, P. S. C. Schulze, G. Siefer, L. Tutsch, M. Hermle, S. W. Glunz, and J. C. Goldschmidt, "Semi-Transparent Perovskite Solar Cells with ITO Directly Sputtered on Spiro-OMeTAD for Tandem Applications," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 11, no. 49, pp. 45796–45804, 2019, doi: 10.1021/acsami.9b17241.
- J10. S. Rafizadeh, K. Wienands, L. E. Mundt, A. J. Bett, P. S. C. Schulze, L. C. Andreani, M. Hermle, S. W. Glunz, and J. C. Goldschmidt, "The Role of Surface Passivation Layer Preparation on Crystallization and Optoelectronic Performance of Hybrid Evaporated-Spincoated Perovskite Solar Cells," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, no. 5, pp. 1428–1435, 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2922388.
- J11. A. J. Bett, P. S. C. Schulze, K. M. Winkler, Ö. S. Kabakli, I. Ketterer, L. E. Mundt, S. K. Reichmuth, G. Siefer, L. Cojocar, L. Tutsch, M. Bivour, M.

- Hermle, S. W. Glunz, and J. C. Goldschmidt, "Two-Terminal Perovskite Silicon Tandem Solar Cells with a High-Bandgap Perovskite Absorber Enabling Voltages over 1.8 V," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 28, no. 2, pp. 99–110, 2019, doi: 10.1002/pip.3208.
- J12. L. Cojocaru, K. Wienands, U. Erdil, P. S. C. Schulze, L. E. Mundt, A. J. Bett, M. Breitwieser, F. Lombeck, M. Prescher, L. Kirste, S. Vierrath, J. C. Goldschmidt, and S. W. Glunz, "Hybrid Evaporation/Spray-Coating Process for a Simplified and Controllable Production of Perovskite Solar Cells," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 10, no. 1, pp. 276–286, 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2949763.
- J13. P. S. C. Schulze, K. Wienands, A. J. Bett, S. Rafizadeh, L. E. Mundt, L. Cojocaru, M. Hermle, S. W. Glunz, H. Hillebrecht, and J. C. Goldschmidt, "Perovskite Hybrid Evaporation/ Spin Coating Method: From Band Gap Tuning to Thin Film Deposition on Textures," *Thin Solid Films*, vol. 704, p. 137970, 2020, doi: 10.1016/j.tsf.2020.137970.
- J14. P. S. C. Schulze, A. J. Bett, M. Bivour, P. Caprioglio, F. M. Gerspacher, Ö. Ş. Kabaklı, A. Richter, M. Stolterfoht, Q. Zhang, D. Neher, M. Hermle, H. Hillebrecht, S. W. Glunz, and J. C. Goldschmidt, "25.1% High-Efficient Monolithic Perovskite Silicon Tandem Solar Cell with a High Band Gap Perovskite Absorber," *Sol. RRL*, vol. 4, no. 7, p. 2000152, 2020, doi: 10.1002/solr.202000152.
- J15. A. L. Zafoschnig, S. Nold, J. C. Goldschmidt, „The race for lowest costs of electricity production: techno-economic analysis of silicon, perovskite and tandem solar cells“ accepted for publication *IEEE Journal of Photovoltaics* DOI: 10.1109/JPHOTOV.2020.3024739 (2020).

3 Referenzen

- [1] K. Masuko, M. Shigematsu, T. Hashiguchi, D. Fujishima, M. Kai, N. Yoshimura, T. Yamaguchi, Y. Ichihashi, T. Mishima, N. Matsubara, T. Yamanishi, T. Takahama, M. Taguchi, E. Maruyama, and S. Okamoto, "Achievement of More Than 25% Conversion Efficiency With Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cell," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, no. 6, pp. 1433–1435, 2014, doi: 10.1109/jphotov.2014.2352151.
- [2] S. W. Glunz, F. Feldmann, A. Richter, M. Bivour, C. Reichel, H. Steinkemper, J. Benick, and M. Hermle, "The Irresistible Charm of a Simple Current Flow Pattern – 25% with a Solar Cell Featuring a Full-Area Back Contact," in *Proceedings of the 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC)*, Hamburg, Germany, 2015, pp. 259–263.
- [3] A. Kojima, K. Teshima, Tsutomu Miyasaka, and Y. Shirai, "Novel Photoelectrochemical Cell with Mesoscopic Electrodes Sensitized by Lead-Halide Compounds," in *210TH ECS MEETING*, 2006, p. 397.
- [4] NREL, *Best research-cell efficiencies*.
- [5] M. Liu, M. B. Johnston, and H. J. Snaith, "Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition," *Nature*, vol. 501, no. 7467, pp. 395–398, 2013, doi: 10.1038/nature12509.
- [6] H. J. Snaith, "Perovskites. The Emergence of a New Era for Low-Cost, High-Efficiency Solar Cells," *The Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 4, no. 21, pp. 3623–3630, 2013, doi: 10.1021/jz4020162.
- [7] C. D. Bailie, M. G. Christoforo, J. P. Mailoa, A. R. Bowring, E. L. Unger, W. H. Nguyen, J. Burschka, N. Pellet, J. Z. Lee, M. Grätzel, R. Noufi, T. Buonassisi, A. Salleo, and M. D. McGehee, "Semi-transparent perovskite solar cells for tandems with silicon and CIGS," *Energy & Environmental Science*, vol. 8, no. 3, pp. 956–963, 2015, doi: 10.1039/C4EE03322A.
- [8] 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*, vol. 106, no. 12, p. 121105, 2015, doi: 10.1063/1.4914179.
- [9] S. Albrecht, M. Saliba, J. P. Correa Baena, F. Lang, L. Kegelmann, M. Mews, L. Steier, A. Abate, J. Rappich, L. Korte, R. Schlatmann, N. Mohammad K., A. Hagfeldt, M. Grätzel, and B. Rech, "Monolithic Perovskite/Silicon-Heterojunction Tandem Solar Cells Processed at Low Temperature," *Energy & Environmental Science*, vol. 9, no. 1, pp. 81–88, 2016, doi: 10.1039/C5EE02965A.
- [10] P. Löper, S.-J. Moon, Martin de Nicolas, Silvia, B. Niesen, M. Ledinsky, S. Nicolay, J. Bailat, J.-H. Yum, S. de Wolf, and C. Ballif, "Organic-inorganic halide perovskite/crystalline silicon four-terminal tandem solar cells," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 17, no. 3, pp. 1619–1629, 2015, doi: 10.1039/c4cp03788j.
- [11] J. Werner, C.-H. Weng, A. Walter, L. Fesquet, J. P. Seif, S. de Wolf, B. Niesen, and C. Ballif, "Efficient Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cell With Cell Area >1 cm²," *The Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 7, no. 1, pp. 161–166, 2016, doi: 10.1021/acs.jpcclett.5b02686.
- [12] M. Jošt, E. Köhnen, A. Morales Vilches, B. Lipovšek, K. Jäger, B. Macco, A. Al-Ashouri, J. Krc, L. Korte, B. Rech, R. Schlatmann, M. Topic, B. Stannowski, and S. Albrecht, "Textured interfaces in monolithic perovskite/silicon tandem solar cells: Advanced light management for improved efficiency and energy yield," *Energy & Environmental Science*, vol. 11, no. 12, pp. 3511–3523, 2019, doi: 10.1039/C8EE02469C.
- [13] M. T. Hörantner and H. J. Snaith, "Predicting and optimising the energy yield of perovskite-on-silicon tandem solar cells under real world conditions," *Energy &*

- Environmental Science*, vol. 10, no. 9, pp. 1983–1993, 2017, doi: 10.1039/C7EE01232B.
- [14] Y. Wu, Di Yan, J. Peng, T. Duong, Y. Wan, S. P. Phang, H. Shen, N. Wu, C. Barugkin, X. Fu, S. Surve, D. Grant, D. Walter, T. P. White, K. R. Catchpole, and K. J. Weber, "Monolithic perovskite/silicon-homojunction tandem solar cell with over 22% efficiency," *Energy Environ. Sci.*, vol. 10, no. 11, pp. 2472–2479, 2017, doi: 10.1039/C7EE02288C.
- [15] K. A. Bush, A. F. Palmstrom, Z. J. Yu, M. Boccard, R. Cheacharoen, J. P. Mailoa, D. P. McMeekin, R. L. Z. Hoyer, C. D. Bailie, T. Leijtens, I. M. Peters, M. C. Minichetti, N. Rolston, R. Prasanna, S. Sofia, D. Harwood, W. Ma, F. Moghadam, H. J. Snaith, T. Buonassisi, Z. C. Holman, S. F. Bent, and M. D. McGehee, "23.6%-efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with improved stability," *Nature Energy*, vol. 2, no. 4, p. 17009, 2017, doi: 10.1038/nenergy.2017.9.
- [16] J.-A. Alberola-Borràs, J. A. Baker, F. de Rossi, R. Vidal, D. Beynon, K. E. A. Hooper, T. M. Watson, and I. Mora-Seró, "Perovskite Photovoltaic Modules: Life Cycle Assessment of Pre-industrial Production Process," *iScience*, vol. 9, pp. 542–551, 2018, doi: 10.1016/j.isci.2018.10.020.
- [17] J. A. Alberola-Borràs, R. Vidal, and I. Mora Seró, "Evaluation of multiple cation/anion perovskite solar cells through life cycle assessment," *Sustainable Energy Fuels*, 2018, doi: 10.1039/C8SE00053K.
- [18] Z. Song, C. L. McElvany, A. B. Phillips, I. Celik, P. W. Krantz, S. C. Watthage, G. K. Liyanage, D. Apul, and M. J. Heben, "A techno-economic analysis of perovskite solar module manufacturing with low-cost materials and techniques," *Energy Environ. Sci.*, vol. 10, no. 6, pp. 1297–1305, 2017, doi: 10.1039/C7EE00757D.
- [19] A. Louwen, van Sark, Wilfried G. J. H. M., A. P. C. Faaij, and Schropp, Ruud E. I., "Re-assessment of net energy production and greenhouse gas emissions avoidance after 40 years of photovoltaics development," *Nat. Commun. (Nature Communications)*, vol. 7, p. 13728, 2016, doi: 10.1038/ncomms13728.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel <h1 style="margin: 0;">PERSIST-ISE</h1> Perowskit-Silizium Tandemsolarzellen Teilvorhaben ISE: Integration, Siliziumsolarzellen, Effizienzsteigerung	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Jan Christoph Goldschmidt, André Sternberg	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2019
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Fraunhofer-Institute für solare Energiesysteme Heidenhofstr. 2 79110 Freiburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 0324037A
	11. Seitenzahl 28
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 19
	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 19
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Ziel des Verbundvorhabens PersiST war die Entwicklung hocheffizienter monolithischen Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen. Das Fraunhofer ISE hat dazu mit der Entwicklung angepasster Siliziumsolarzellen, der Optimierung der Lichteinkopplung, der Optimierung der Verbindung der Teilzellen, der Entwicklung semi-transparenter Perowskitsolarzellen und der Realisierung kompletter Tandemsolarzellen beigetragen. Diese Aktivitäten wurden ergänzt durch die simulationsgestützte Optimierung und eingehende Charakterisierung der Solarzellen. Darüber hinaus wurden die entwickelten Technologien im Rahmen einer Ökobilanz und in Bezug auf die Stromgestehungskosten bewertet. Die wesentlichen Ergebnisse sind <ul style="list-style-type: none"> • Niedertemperaturprozess zur Abscheidung eines TiOx-Elektronenkontaktes für n-i-p Perowskitsolarzellen. • Stabiler $\text{FA}_{0,75}\text{CS}_{0,25}\text{Pb}(\text{I}_{0,8}\text{Br}_{0,2})_3$ Perowskitabsorber mit optimierter hoher Bandlücke von 1.69 eV. • Prozess zum schädigungsarmen direkten Sputtern von ITO auf organischen Lochleitern. • Entwicklung von Charakterisierungsroutinen für Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen. • Simulationsroutinen zur Optimierung und zur Berechnung des Jahresenergieertrages. • Realisierung einer p-i-n Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle in exzellenter Stabilität und 25,1% zertifiziertem Wirkungsgrad. • Hybridprozess zur Abscheidung von komplexen Perowskitzusammensetzungen auf texturierten Substraten. • Realisierung großformatiger Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen zusammen mit Projektpartnern. • Ökologischer Vorteil aufgrund des hohen Wirkungsgrades bei geringen zusätzlichen Belastungen durch Perowskit in LCA gezeigt. • Potenzial zur Senkung der Stromgestehungskosten durch hohen Wirkungsgrad. 	
19. Schlagwörter Photovoltaik, Tandemsolarzellen, Perowskit, Silizium	
20. Verlag	21. Preis