

Schlussbericht zum Verbundprojekt

**Kalibrierung großflächiger Tandem-
Solarzellen und -module für den industriellen Perowskit-Silizium-
Markteintritt**

Förderkennzeichen:

KATANA

**Teilprojekt
„Absicherung der Kalibrierverfahren“**

Förderkennzeichen:

03EE1087B

Projektlaufzeit:

01.02.2021 – 31.01.2024

Danksagung

Das Forschungsprojekt KATANA wurde in der Zeit vom 01.02.2021 – 31.01.2024 durch den Projektträger Jülich (PtJ) unter dem Förderkennzeichen 03EE1087B betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, wofür wir uns herzlich bedanken.

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, der WVELABS Solar Metrology Systems GmbH und der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg gemeinsam durchgeführt. Dieser Bericht beinhaltet eine Beschreibung der Arbeiten und Ergebnisse des Verbundpartners Universität Freiburg im Teilprojekt 03EE1087B. Für die Arbeiten in den angeschlossenen Teilprojekten werden separate Abschlussberichte eingereicht.

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

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

I	Kurze Darstellung	4
I.1	Ergebniszusammenfassung	4
I.2	Aufgabenstellung	4
II	Eingehende Darstellung	5
II.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse.....	5
AP 2.1:	Unterstützende Zellprozessierung zur Herstellung von Referenzproben	5
AP 3.1	Entwicklung eines Konzepts für multispektrale Photolumineszenzanalysen für Tandemzellen	5
	Qualitative PL-Imaging gestützte Charakterisierung zur Zellinhomogenitätsanalyse ...	5
	Suns- V_{oc} Messungen an Tandemsolarzellen	7
	Schnelle Spektralmetrik	9
	iV_{oc} Imaging	10
AP 3.2	Entwicklung eines thermographiebasierten Imaging-Verfahrens zur lokalen Zellanalyse	12
AP 3.3	Quantifizierung von lateralen Inhomogenitäten in Perowskit-Silizium-Tandemzellen	14
AP 3.4	Modellierung	17
	Experimentell validiertes optisches Simulationsmodell für Perowskit-Silizium-Tandemzellen	17
	Erweiterung des opto-elektrischen Modells zur detaillierten transienten Simulation von Vorkonditionierungs- und Messprozeduren.....	18
	Untersuchung des Einflusses der Vorkonditionierungszeit und -spannung auf die Zellmessung	20
	Experimenteller Abgleich an industriellen Minimodulen.....	21
	Arbeitspaketübergreifende Ergebnisse.....	30
	Inhomogenitäten von Kontakteigenschaften an Zwischenschichten von Perowskit-Silizium Tandem Solarzellen mithilfe von Lumineszenz Imaging, Lock-In Thermographie und 2D/3D Simulationen	30
II.2	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen.....	33

I Kurze Darstellung

I.1 Ergebniszusammenfassung

Im Rahmen des KATANA Projektes wurde an der Universität Freiburg das Verständnis der physikalischen Effekte, die während einer Messung von Perowskit-Silizium-Solarzellen auftreten mithilfe von Simulationen und Messungen erweitert, Auswirkungen von Inhomogenitäten quantifiziert und so der Grundstein für ein stabiles Kalibriermessverfahren für neuartige Tandemzellen und -module gelegt.

Um Inhomogenitäten in Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen zu detektieren und zu quantifizieren, wurden **bildgebende Messverfahren** entwickelt. Auf Basis der Photo- und Elektrolumineszenz (PL/EL) können nun sowohl qualitativ **Inhomogenitäten in der Tandemsolarzelle analysiert werden** als auch quantitativ die **implizierte Leerlaufspannung (iV_{oc}) an beiden Teilzellen** gemessen werden. Die Messmethoden wurden mit speziell hergestellten Proben verfeinert und dann an verschiedenen Solarzellen getestet. Mithilfe von Hell- und Dunkelthermographie (ILIT/DLIT) Messungen können nun teilzellenselektive Defekte wie Kurzschlüsse lokalisiert werden. Kontaktinhomogenitäten in Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen wurden anhand eines Vergleichs von EL- und PL- Messungen analysiert. Mit Unterstützung von Thermographiemessungen und 2D/3D Simulationen konnten die Ergebnisse erfolgreich interpretiert werden und so wichtige **Erkenntnisse über die Wirkung dieser Inhomogenitäten auf die Leistung der Solarzelle gewonnen werden**.

Das **opto-elektrische Simulationsmodell** wurde erweitert, um den Einfluss von Schwankungen der Perowskitschichtdicken abzubilden und den Einfluss auf globale Messungen (z.B. die externe Quanteneffizienz, kurz EQE) zu quantifizieren. Des Weiteren wurde das Verständnis der bei Perowskit-Silizium-Zellen auftretenden **Hysteresis-Effekte** durch die Simulationsarbeiten an der Universität Freiburg wesentlich verbessert. Dies erfolgte durch Implementierung zweier unterschiedlicher mobiler Ionensorten. Mithilfe der elektrischen Solarzellmodellierung konnte der Einfluss von Vorkonditionierung und Messgeschwindigkeit auf die Tandemeffizienz nachgebildet werden.

Mithilfe des Simulationsmodells wurde demonstriert, dass die JV-Messung wesentlich davon abhängt, welche der Teilzellen limitiert, da dies zu einer vorwärts- bzw. rückwärtsgerichteten Teilzellspannung führt, die die **Ionenmigration im Perowskit** entscheidend beeinflusst. Dieser simulativ vorausgesagte Effekt konnte anschließend an verschiedenen Industrie- und Laborzellen nachgemessen werden. Eine geeignete Messroutine wurde entwickelt, in der Strom-Spannungs-Kennlinien mit ‚ion quenching‘ nach geeigneter Vorkonditionierung gemessen wurden. Durch die Messroutine konnte eine Vergleichbarkeit und gute Übereinstimmung von Simulation und Experiment erzielt werden.

I.2 Aufgabenstellung

Gesamtziel des Verbundprojekts

Eine große Herausforderung für die industrielle Umsetzung aller zukünftigen Tandem PV-Technologien ist eine präzise Effizienzbestimmung auf großen Flächen. Dies ist sowohl in der Entwicklung als auch in der späteren industriellen Produktion unabdingbar, um Veränderungen in der Zell- und Modultechnologie zu erfassen und korrekt zu bewerten. Darüber hinaus ist die Ermittlung der Messunsicherheiten für die Messung großer PSC/Tandemsolarzellen und -module dabei unerlässlich.

Im Projekt „KATANA“ sollten Kalibrierverfahren für großformatige Perowskit-Silizium Tandemsolarzellen und -module entwickelt werden. Hierzu gehörten die Entwicklung der Messmethoden, insbesondere die Sicherstellung von spektral homogener Beleuchtungsintensität und einstellbaren Spektren für die IV-Messung. Hierfür wurde ein neuer LED-basierter IV-Messplatz installiert, der auch für große Module geeignet ist. Außerdem sollte eine

großflächige EQE-Messung inklusive Bias-Beleuchtung entwickelt werden. Auf Basis dieser Methoden mussten geeignete Messprozeduren entwickelt werden, um Perowskit-Silizium-Tandemzellen und -module in industrieller Größe zu kalibrieren. Für eine genaue Fehlerbetrachtung wurde außerdem ein Fokus auf die Analyse von inhomogenen Zelleigenschaften gelegt, die mit Hilfe von Photolumineszenz-Imaging (PLI) mit mehreren Anregungswellenlängen realisiert werden sollte. Hierfür wurde ein neuer PLI-Messaufbau installiert. Schließlich sollten Simulationen der Zellen unter Messbedingungen die Bestimmung der Unsicherheiten unterstützen.

Gesamtziel des Teilprojekts

Im Projekt KATANA ist es Ziel der Universität Freiburg, die Entwicklung von Kalibrierverfahren für die neuartigen Zellen und Module, die am Fraunhofer ISE stattfindet, durch Detailcharakterisierung und Simulationen zu unterstützen. Die Arbeiten an der Universität Freiburg fokussieren sich zudem auf der Entwicklung von Verfahren zur Bestimmung von Inhomogenitäten und deren Auswirkung auf den Kalibrierprozess liegt. Dadurch sollen Messunsicherheiten identifiziert und Lösungsansätze zu deren Minimierung gefunden werden. Die Universität Freiburg greift hierbei auf ihre Expertise im Bereich der Defektcharakterisierung mit bildgebenden Methoden zurück. Ein weiteres Ziel ist die Erweiterung des Verständnisses der bei Perowskit-Silizium-Zellen auftretenden Hysterese-Effekte und Messunsicherheiten, mit dem Ziel einer gezielten Verbesserung der Verfahren.

Für die Zellmodellierung knüpft die Universität Freiburg direkt an ihre langjährige Erfahrung im Simulationsbereich von III-V-Silizium- und Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen an. Darüber hinaus werden zum Test der entwickelten Analyseverfahren in den Laboren der Universität Freiburg Perowskit-Silizium-Tandemzellen prozessiert.

II Eingehende Darstellung

Die im Folgenden beschriebenen Punkte beschränken sich auf das Teilprojekt Instituts für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) der Universität Freiburg, Förderkennzeichen 03EE1087B, innerhalb des Verbundprojektes KATANA. Viele Arbeiten wurden in enger Kooperation mit dem Fraunhofer ISE durchgeführt.

II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

AP 2.1: Unterstützende Zellprozessierung zur Herstellung von Referenzproben

Für die Entwicklung von Charakterisierungs- und Testverfahren wurde eine Variation verschiedener Zellstrukturen prozessiert. So konnten Zellen unterschiedlicher Größe mit Kantenlängen zwischen 5 und 100 mm und unterschiedlicher Prozessfolge untersucht werden. Es standen Zellen mit und ohne Textur sowie Einfach-Solarzellen zur Verfügung. Weitere Solarzellen werden im Fortgang des Projekts bereitgestellt, um die Entwicklung der Messverfahren zu unterstützen.

AP 3.1 Entwicklung eines Konzepts für multispektrale Photolumineszenzanalysen für Tandemzellen

Qualitative PL-Imaging gestützte Charakterisierung zur Zellinhomogenitätsanalyse

Das multispektrale PL-Imaging bietet eine schnelle und präzise Methode, mit der Defekte in Perowskit-Silizium Solarzellen lokalisiert werden können. Ein besonderer Vorteil der Methode ist die Kontaktlosigkeit. Je nach Zelldesign können Defekte durch im relevanten Wellenlängenbereich nicht transparente Schichten (etwa Silberkontakte) im fertig prozessierten Zustand verdeckt sein. Dann können diese Defekte nicht in kamerabasierten Verfahren sichtbar

gemacht werden, welche auf eine Kontaktierung der Zelle angewiesen sind (z.B. DLIT Messungen) und erst nach vollständiger Prozessierung durchgeführt werden können. PLI-Messungen können dagegen bereits nach der Prozessierung der Perowskitschicht bzw. für die Siliziumteilzelle nach der Prozessierung der unteren Teilzelle durchgeführt werden. In Abbildung 1 werden PLI-Messungen vor und nach der Silberbedampfung von einer Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle mit 1 cm^2 großen aktiven Flächen dargestellt. Während sich vor der Bedampfung noch gut ein Viereck erkennen lässt an dessen Kanten das PL-Signal stark verringert ist, ist diese Fläche später durch das aufgedampfte Silber verdeckt.

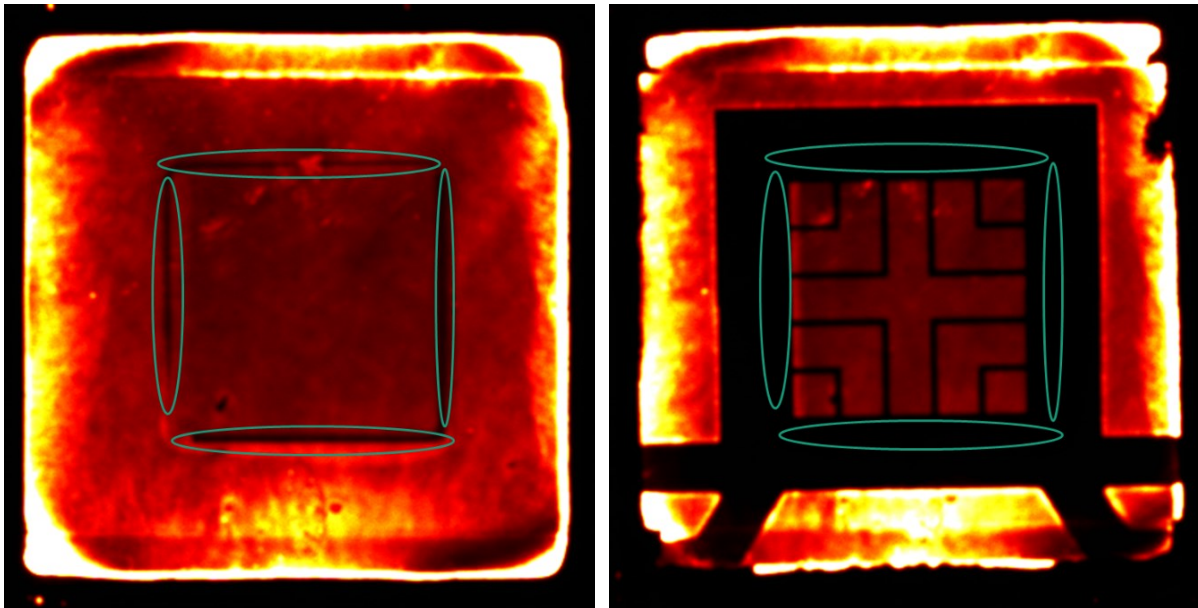


Abbildung 1a Vor Bedampfung.

Abbildung 1b Nach Bedampfung.

Abbildung 1: PLI-Messung an eine Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle ($1 \times 1 \text{ cm}^2$) vor und nach der Silberbedampfung zur Kontaktierung. Die im linken Bild markierten Linien geringerer PL-Intensität sind nach Metallisierung verdeckt.

Doch auch bei fertig hergestellten Tandemsolarzellen ist das PL-Imaging ein sehr wertvolles Messverfahren. Abbildung 2 zeigt PLI-Messungen einer Perowskit-Silizium Tandemsolarzelle. Es lassen sich hier deutlich einige zelleistungsbegrenzende Effekte erkennen. Grün markiert sind beispielsweise besonders helle Stellen in der Perowskit-Teilzelle. Dies weist auf einen Defekt oberhalb der Perowskitschicht hin, da eine hohe Rekombination an der Grenzschicht von Perowskit und der Elektronentransportschicht C60 als Problem bekannt ist. Ist kein Kontakt zur Elektronentransportschicht vorhanden, fällt dieser Rekombinationsmechanismus weg und das Signal ist stärker. Die C60 Schicht ist jedoch notwendig, um Ladungsträger zu extrahieren. Eine flächendeckende Beschichtung mit dem Elektronentransportschicht ist daher gewünscht. Umgekehrt sind exemplarisch hellblau Bereiche markiert, die ein besonders niedriges PL-Signal aufweisen. Hier liegt ein Defekt in der Perowskitschicht (links) bzw. der Siliziumteilzelle (rechts) vor. Auch diese Defekte verringern die Leistung der Tandemsolarzelle.

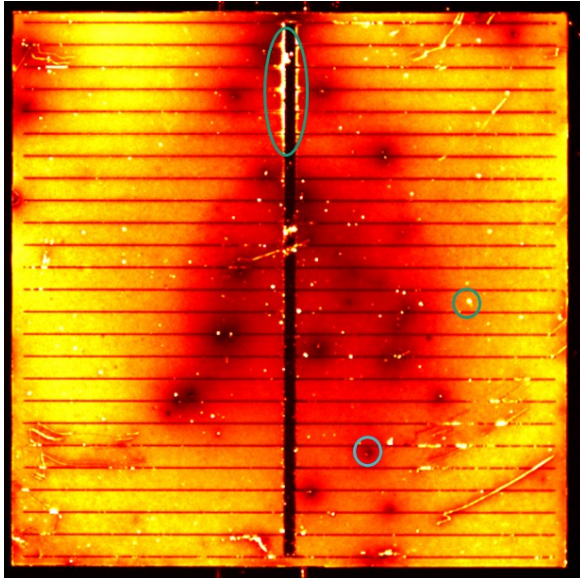


Abbildung 2a Obere Perowskitteilzelle.

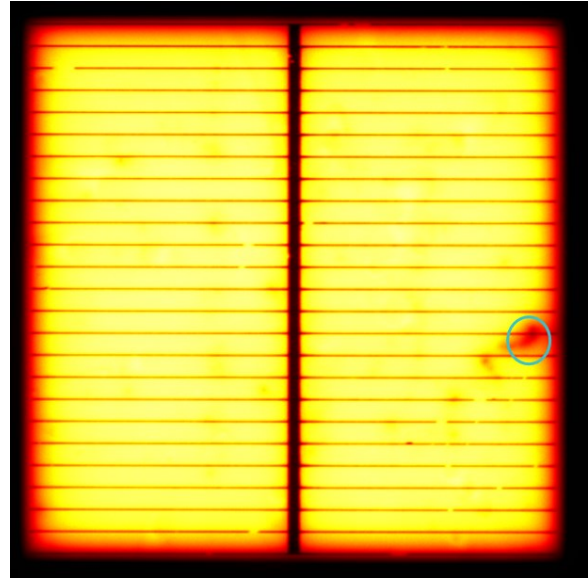


Abbildung 2b Untere Siliziumteilzelle.

Abbildung 2: Eine 25 cm² große Perowskit-Silizium Tandemsolarzelle. Die Zelle wurde im Rahmen des PRESTO Projektes prozessiert und für Charakterisierungen im Rahmen des KATANA Projektes zur Verfügung gestellt. Verschiedene im Text erläuterte Defekte sind farblich hervorgehoben.

Suns-V_{oc} Messungen an Tandemsolarzellen

Es stellte sich erfreulicherweise heraus, dass der Messplatz für die hyperspektrale PL-Bildgebung auch für weitere Messverfahren zur Verlustanalyse dienen konnte. Zur Verlustanalyse hinsichtlich der Serienwiderstände eignet sich das Suns-V_{oc} Messverfahren, bei dem die Spannung an der Solarzelle in Abhängigkeit von der Lichtintensität gemessen wird und zu einer widerstandsfreien pseudo-IV Kurve umgerechnet werden kann. Ein Vergleich dieser Kurve mit gemessenen IV-Kurven erlaubt Rückschlüsse auf den vorliegenden Serienwiderstand. Die Messungen finden am im Rahmen von KATANA vom Fraunhofer ISE neu beschafften Multispektralen Messplatz „Tandem Modul“ unter Verwendung der Laser und der Quelle-Senke statt, wie in Abbildung 3 schematisch dargestellt ist.

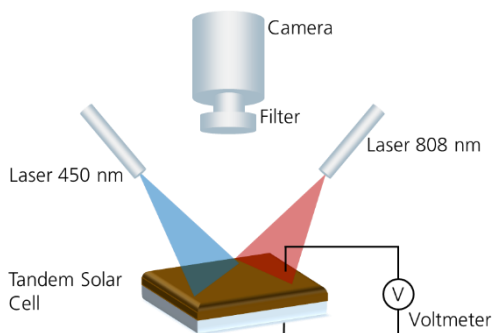


Abbildung 3 Messaufbau im Tandem Modul zur Messung von Suns-V_{oc} Kurven.

In einem ersten Schritt wurde das Messverfahren validiert und auf die Sensitivität hinsichtlich verschiedener Messbedingungen untersucht. Aufgrund eines logarithmischen Zusammenhangs von Laserintensität und Zellspannung können die Laserintensitäten vollkommen ausreichend genau kontrolliert werden, um die Messergebnisse auch bei leicht variierenden Laserintensitäten zu reproduzieren. Abbildung 4a) zeigt die sehr gute Übereinstimmung des V_{oc} extrahiert aus den Suns-V_{oc} und den IV-Messungen in Rückwärtsrichtung. Als wichtig erwies sich die Verwendung einer korrekten Schattenmaske. Das Siliziumsubstrat ist größer als die eigentliche aktive Fläche der Tandemsolarzelle. Wird keine Maske (wie es bei der IV-Messung Standard ist) verwendet, zeigt sich eine deutliche Abweichung der gemessenen Spannung. Dieses Phänomen ist in Abbildung 4b) dargestellt.

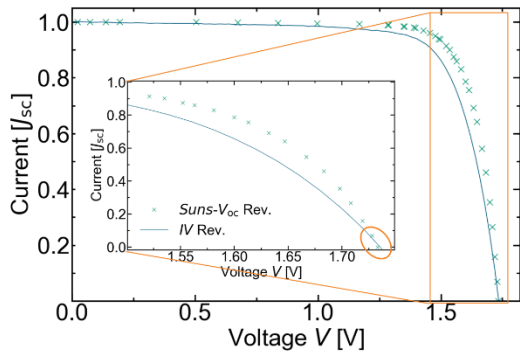


Abbildung 4a) Vergleich des V_{oc} aus der *Suns- V_{oc}* Messung im Vergleich zur *IV*-Messung.

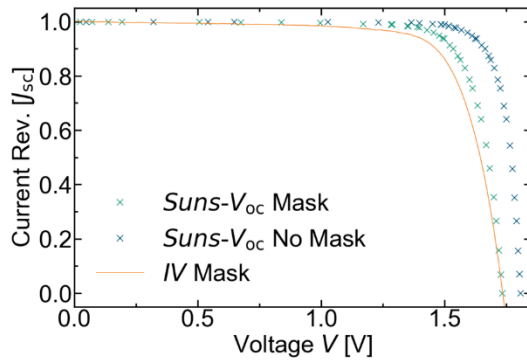


Abbildung 4b) *Suns- V_{oc}* Messung mit und ohne Maske im Vergleich zu einer *IV*-Messung mit Maske.

Abbildung 4 Validierung des Messverfahrens und Untersuchung der Sensitivität auf Messbedingungen.

Sind die Messbedingungen entsprechend gewählt und wird die Zelle vorkonditioniert, um transiente Effekte während der Messung zu vermeiden, ergeben sich reproduzierbare Messungen, wie etwa in Abbildung 5 dargestellt. Bei einer guten Übereinstimmung der *Suns- V_{oc}* Kurven gemessen in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung, sowie des V_{oc} extrahiert aus der *Suns- V_{oc}* Messung verglichen mit dem V_{oc} der *IV*-Kurve, kann ein (spannungsabhängiger) Serienwiderstand gemessen werden. Für gegebenen Strom wird dabei aus der Differenz der Spannungen der *Suns- V_{oc}* Kurve und der *IV*-Kurve nach dem Ohm'schen Gesetz ein effektiver Serienwiderstand bestimmt, wie in Abbildung 5 dargestellt.

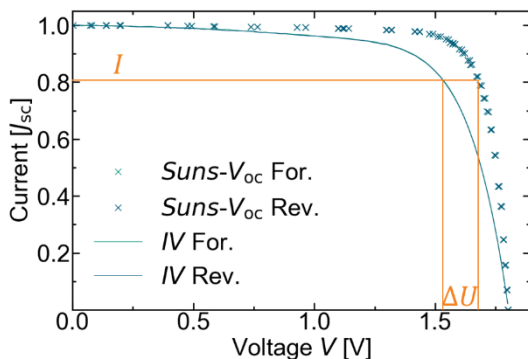


Abbildung 5 Reproduzierbarkeit der *Suns- V_{oc}* Messungen in vorwärts und rückwärts Richtung und schematische Darstellung der Berechnung des Serienwiderstands.

Wichtig ist, dass es sich dabei um einen effektiven Serienwiderstand über alle Schichten der Solarzelle hinweg handelt und damit nicht unbedingt um einen klassischen Ohm'schen Widerstand. Dies zeigt sich im Vergleich von Abbildung 6a) und Abbildung 6b). Während a) den konstanten Serienwiderstand einer klassischen Siliziumsolarzelle zeigt, zeigt b) einen stetig abnehmenden Serienwiderstand einer Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle über den gesamten Messbereich. Für hohe Spannungen nehmen die Messunsicherheiten zu (da ΔU gegen 0 geht). Entsprechend ist der nicht-konstante Verlauf des Serienwiderstandes im markierten Bereich in Abbildung 6a) vermutlich eher der Messtechnik als tatsächlich der Zelle geschuldet. Während die *Suns- V_{oc}* Messung selbst nicht sehr sensitiv auf eine kleine Variation in der Anregungsintensität reagiert, verschiebt in der *IV*-Messung aufgrund der Serienschaltung der Perowskit- und Siliziumteilzellen eine kleine relative Änderung der Laserintensitäten auch den Arbeitspunkt der Teilzellen zueinander. Dies wiederum hat einen Effekt auf den Füllfaktor der *IV*-Kennlinie, welcher nicht durch einen Serienwiderstand begründet ist.

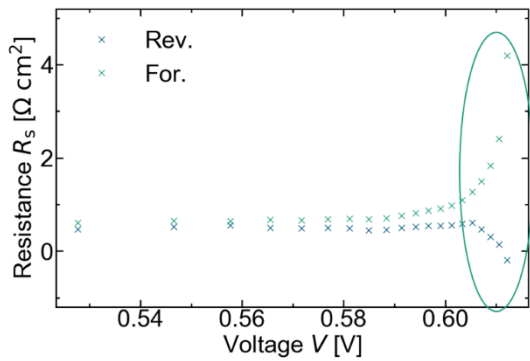


Abbildung 6a) Siliziumsolarzelle.

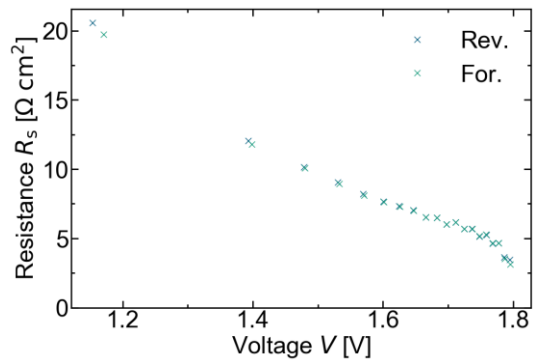


Abbildung 6b) Perowskit-Silizium Tandemsolarzelle.

Abbildung 6 Spannungsabhängiger Serienwiderstand bestimmt aus dem Vergleich von $Suns-V_{oc}$ und IV-Messungen für a) eine Siliziumsolarzelle und b) eine Perowskit-Silizium Tandemsolarzelle.

Gegen Ende des KATANA-Projektes wurden erste Schritte unternommen, um das $Suns-V_{oc}$ Messverfahren auf subzellselektive Messungen zu erweitern. Erste validierende subzellselektive $Suns-V_{oc}$ Kurven konnten gemessen werden. Abbildung 7 zeigt eine IV-Kennlinie gemessen mit einem neu in das Tandem-Modulum integrierten Sourcemeter und die $Suns-V_{oc}$ Kurve am Perowskit mit Bias-Beleuchtung. Dies stellt jedoch lediglich eine erste Validierung des Messverfahrens dar. Auch über das Ende des KATANA-Projektes hinaus müssen weitere Testmessungen durchgeführt werden und verschiedene Effekte weiter untersucht werden.

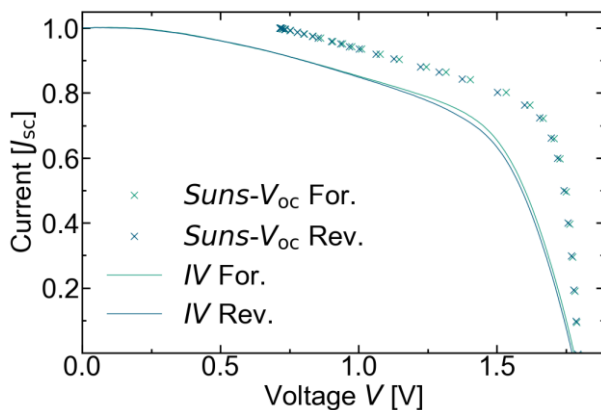


Abbildung 7 $Suns-V_{oc}$ (Kreuze) Messung an einem Perowskit mit 940 nm Biasbeleuchtung für die Siliziumzelle und IV (durchgezogene Linien) Messung an einem Tandem bei einer Beleuchtung beider Teilzellen. Durch die konstante Biasbeleuchtung der Siliziumzelle (V_{oc} ca. 700mV) ist die $Suns-V_{oc}$ Kurve der Perowskitsolarzelle um konstante 700 mV nach rechts verschoben.

Schnelle Spektralmetrik

Auch ein Schnellmetrikverfahren konnte am hyperspektralen PL-Messaufbau realisiert werden. Bei monolithischen Zweiterminal-Perowskit-Silizium-Solarzellen ist es wichtig, dass die generierten Ströme in beiden Teilzellen aufgrund der Reihenverschaltung ausgeglichen sind. Spektrale Metrikmessungen sind eine gute Methode, um festzustellen, in welchem Verhältnis die Teilzellströme zueinanderstehen. Da das Standardmessverfahren zwar sehr genau, jedoch auch zeitintensiv ist und Perowskit-Siliziumsolarzellen dazu tendieren, mit der Zeit zu degradieren, bedurfte es eines schnelleren Verfahrens. Es wurde erfolgreich eine Methode zur schnellen und automatisierten Messung einer Spektralmetrik am Tandem Modulum implementiert. Nachdem auf ISE-Seite die Hardwarevoraussetzungen etabliert werden konnten, konnte die Universität Freiburg das Verfahren selbst erfolgreich an diesem Gerät testen. Durch Verwendung von zwei Monitordiodeneinheiten kann die Messung nachträglich in Strom und Spektrum (Blau/Rotverschiebung) korrigiert werden. Im Vergleich zu einem LED basierten Solarsimulator macht dies lange Einschwingphasen für das System

obsolet. Gleichzeitig wird in dem von uns entwickelten Verfahren lediglich der Kurzschlussstrom der limitierenden Teilzelle gemessen und keine komplette I/V -Kennlinie. Wenn der Parallelwiderstand einer der Teilzellen klein ist, kann durch Anlegen einer äußeren Biasspannung sichergestellt werden, dass die gerade limitierende Teilzelle tatsächlich unter I_{sc} Bedingung ist und der Strom nicht über bzw. unterschätzt wird.

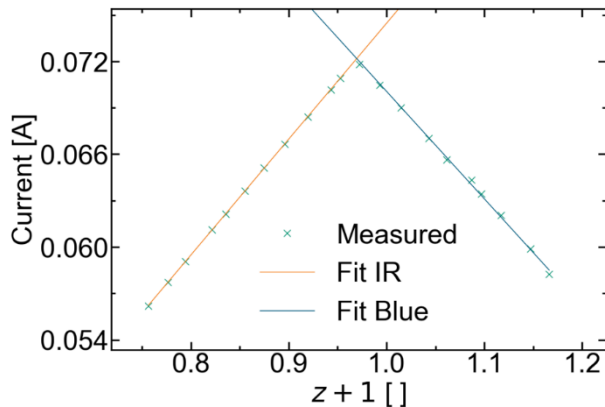


Abbildung 8 Beispielhafte schnelle Spektralmetrik Messung an einer III-V Tandemsolarzelle. Messfehler durch Abweichungen der Laserintensität während der Messung im Vergleich zu den eingestellten Werten wurden mittels der Messwerte von den Monitordioden nachträglich korrigiert.

iV_{oc} Imaging

Um auch in nichtkontaktierten Messungen einen Zugang zur - sogar ortaufgelösten - internen Spannung (iV_{oc}) zu haben, bietet sich das iV_{oc} -Imaging an. Wie in Abbildung 9 schematisch dargestellt, kann unter Verwendung einer Kalibrierlampe, den spektral integrierten PL-Bildern und dem verallgemeinerten Planckgesetz ein kalibriertes und teilzellenaufgelöstes iV_{oc} Bild generiert werden. Der hier präsentierte Ansatz orientiert sich an in der Literatur^{1,2} dargestellten ähnlichen Ansätzen, wurde jedoch weiterentwickelt und erstmalig auf Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen angewendet.

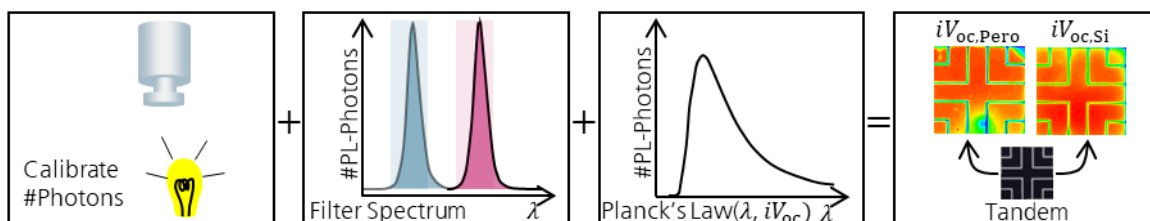


Abbildung 9 Schematische Darstellung der Messmethode.

Für eine solche Messung wird in einem ersten Schritt mithilfe eines kalibrierten Strahlers ein Skalierungsfaktor (SF) bestimmt, welcher berücksichtigt, welcher Anteil der Photonen durch die gegebene Geometrie des Messgerätes in der Kamera detektiert wird. Die Spectral Response (SR) berücksichtigt zusätzlich die spektralen Abhängigkeiten, wie die Transmission der verwendeten Filter. Die verwendeten optischen Filter dienen dazu, das Anregungslicht am Eintreten in die Kamera zu hindern und die Lumineszenzsignale der beiden Teilzellen aufzutrennen. Mithilfe des verallgemeinerten Planckgesetzes kann dann nach (1) die interne Spannung berechnet werden.

$$I_{pixel(x)} = SF \exp\left(\frac{q iV_{oc}}{k_b T}\right) \frac{8\pi}{c^3 h^3} \int_0^\infty SR(E) A(E) E^2 \exp\left(-\frac{E}{k_b T}\right) dE \quad (1)$$

¹ Bui 2020, DOI: 10.1002/solr.202100348

² Soufiani 2022, DOI: 10.1002/adfm.202210592

Dabei ist $I_{\text{pixel}(x)}$ die Anzahl der Counts eines Kamerapixels an Position x , q die Elementarladung, k_b die Boltzmann-Konstante, T die Temperatur, c die Lichtgeschwindigkeit, h das Plank'sche Wirkungsquantum und A die Absorption in Abhängigkeit von der Energie E . Beispielmessungen sind in Abbildung 10a) für die Siliziumteilzelle und in Abbildung 10b) für die Perowskit-Teilzelle gezeigt. Validiert wurden die Messungen durch drei alternative Messungen. Mittels eines spektral aufgelösten PL-Quantum Yield Messgerätes wurden die Messungen für die Perowskitsolarzelle überprüft, wie in Abbildung 13 dargestellt. Weiterhin wurden im Tandem-Modulum selbst durchgeführte PL kalibrierte Lebensdauermessungen für die Validierung von der Siliziumteilzelle verwendet. Dies ist in Abbildung 11 dargestellt. Ebenso kann bei Solarzellen mit vernachlässigbaren Kontaktverlusten ein Vergleich des internen iV_{oc} und der am Kontakt gemessenen Spannung gezogen werden. Dies wurde sowohl an Siliziumeinfachzellen als auch an IIIV-Tandemsolarzellen vorgenommen, wie in Abbildung 12 dargestellt. Die Validierungsmessungen zeigen eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse.

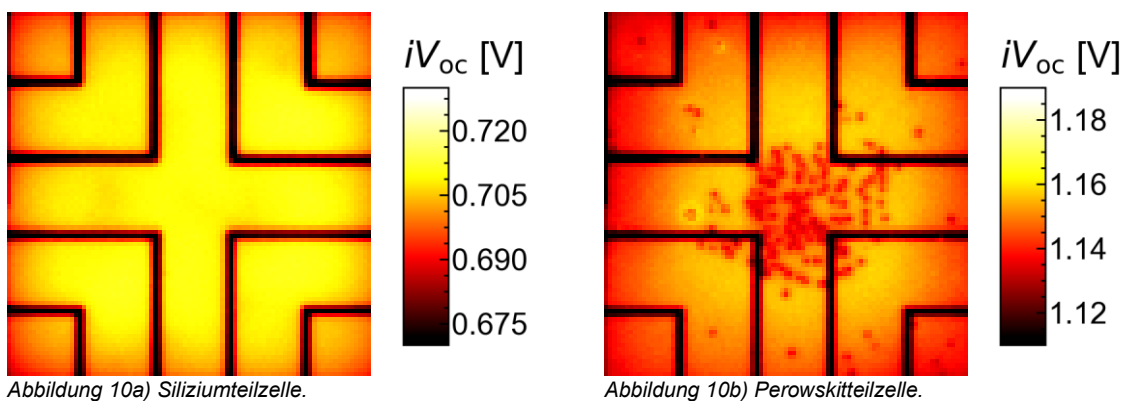


Abbildung 10 Exemplarische teilzellaufgelöste iV_{oc} Bilder einer Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle.

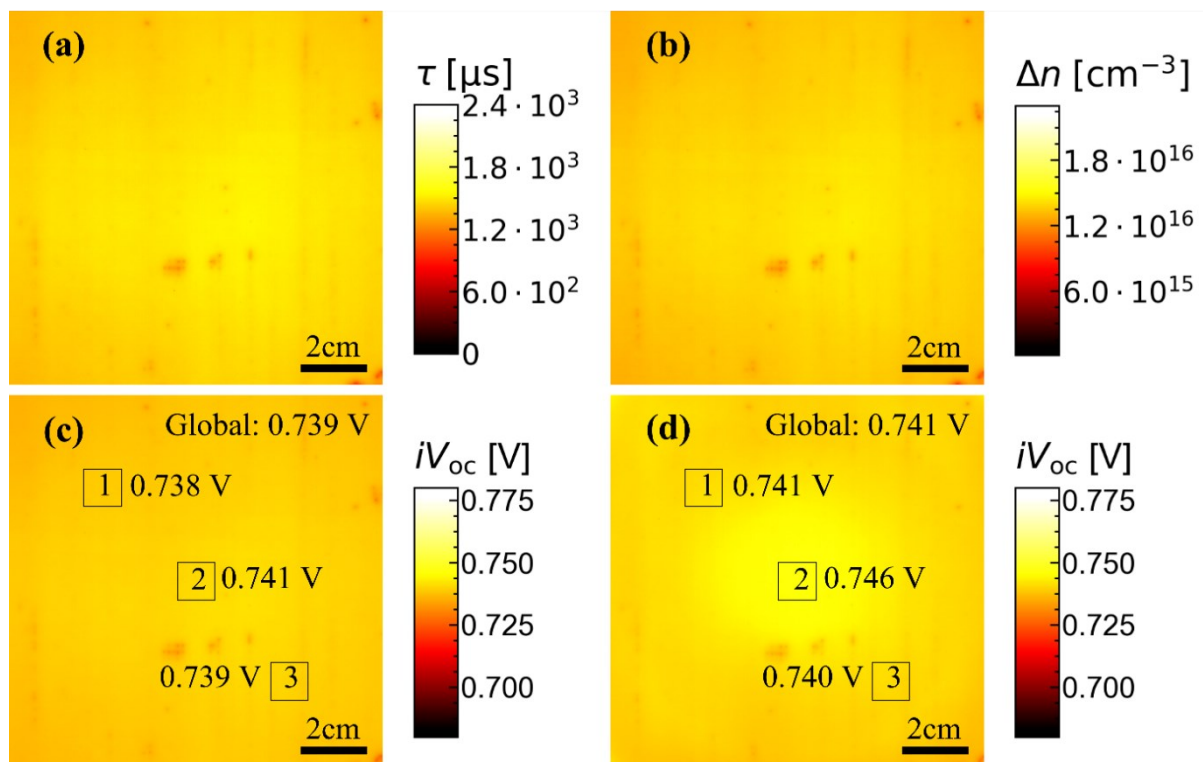


Abbildung 11 Basierend auf PL-kalibrierten Lebensdauermessungen (a) und Überschussladungsträgerverteilung (b) kann ein iV_{oc} Bild berechnet werden (c). Im Vergleich dazu ist in (d) ein iV_{oc} Bild basierend der neu entwickelten iV_{oc} Imaging Methode dargestellt. Die Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung.

Das vermessene Substrat ist ein p-typ FZ-Siliziumwafer mit einer Passivierung aus amorphem Silizium. Der helle Fleck, welcher in (d) stärker ausgeprägt ist als in (c), ist auf eine optische Reflexion in der Messung in (d) zurückzuführen, welche in der Zwischenzeit auch behoben werden konnte.

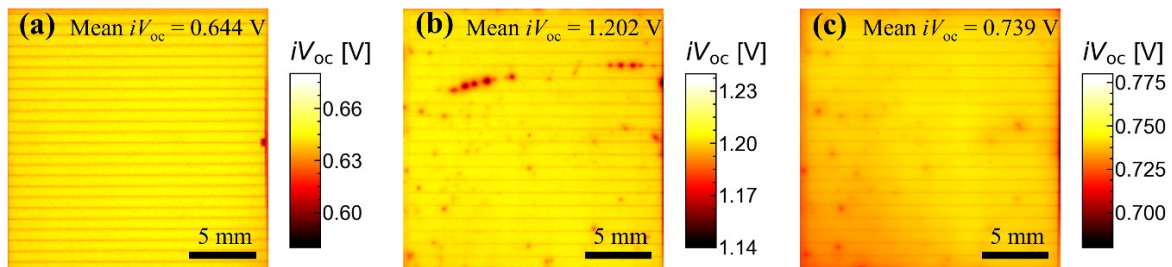


Abbildung 12 iV_{oc} Bilder einer WPVS-Referenzsiliziumsolarzelle (a) und der Top (b) und Bottom (c) Teilzelle einer III-V Tandemsolarzelle, welche unter 1-Sonnen Bedingungen beleuchtet wurden. V_{oc} der WPVS-Zelle ist 0.644 V und damit gleich der mittleren bestimmten iV_{oc} Spannung. V_{oc} der III-V Tandemsolarzelle ist 1.925 V, und damit 16 mV niedriger als die Summe (1.941 V) der iV_{oc} Werte beider Teilzellen, dargestellt in (b) and (c).

Durch den Vergleich von iV_{oc} mit einer IV-Messung ist es möglich, Kontaktverluste zu quantifizieren, wie in Abbildung 13 ersichtlich ist. Diese entwickelte Messmethode wurde erfolgreich publiziert und auf der EUPVSEC 2023 Konferenz vorgestellt.

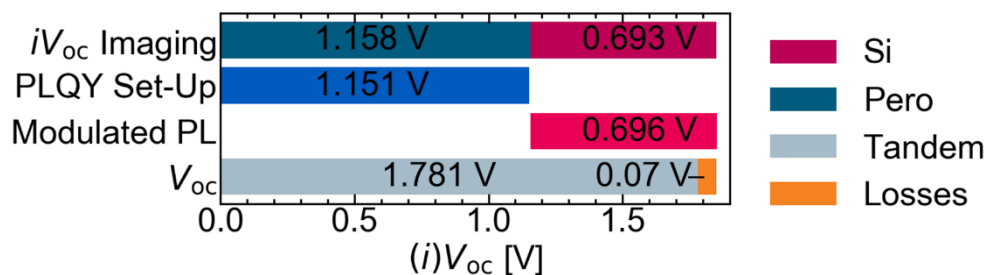


Abbildung 13 Verlustanalyse und Validierung der iV_{oc} Imaging Messung.

AP 3.2 Entwicklung eines thermographiebasierten Imaging-Verfahrens zur lokalen Zellanalyse

An dem vom Fraunhofer ISE zur Verfügung gestellten Messstand konnten sowohl durch Spannung angeregte Thermographiemessungen im Lock-In Verfahren (DLIT, Dark Lock-In Thermography), als auch durch LEDs verschiedener Wellenlängenbereiche (blau, rot, IR) angeregte Thermographiemessungen (ILIT, Illuminated Lock-In Thermography) durchgeführt werden.

In Abbildung 14 ist dargestellt, wie mittels der Lock-In-Thermographie Defekte mit lokal hoher Leistungsdissipation sichtbar gemacht werden können. Für die Defektlokalisierung an Perowskitzellen sind sowohl die DLIT-Messung (Abbildung 14a), als auch die ILIT-Messung unter Verwendung der blauen LED (Abbildung 14b) grundsätzlich geeignet. Kleinere Unterschiede sind hier erkennbar. So zeigen sich am Rand der ILIT-Messung teilweise Bereiche mit erhöhter Signalstärke und es lässt sich im Zentrum ein Muster erkennen, bestehend aus einem erhöhten Hintergrundsignal und vier dunklen Flecken (einer exemplarisch markiert). Dieses Muster ist ein Artefakt, welches vermutlich auf parasitäre Absorption des Lichtes zurückzuführen ist – und nicht auf eine erhöhte Rekombinationsrate durch einen niedrigen Parallelwiderstand. Während einem Bedampfungsprozess für die Perowskitzelle auf der Glasrückseite war die Glasvorderseite des Substrates nur an vier Stellen durch einen Halter verdeckt. Entsprechend scheint sich Material beim Bedampfen auf der falschen Seite niedergeschlagen zu haben.

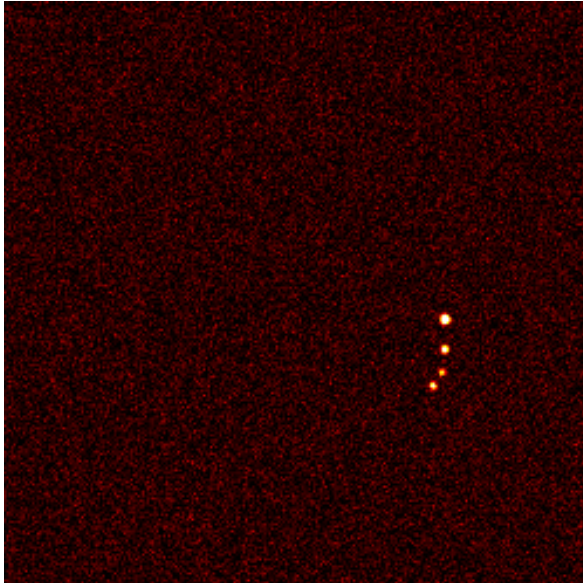


Abbildung 14a DLIT Messung.

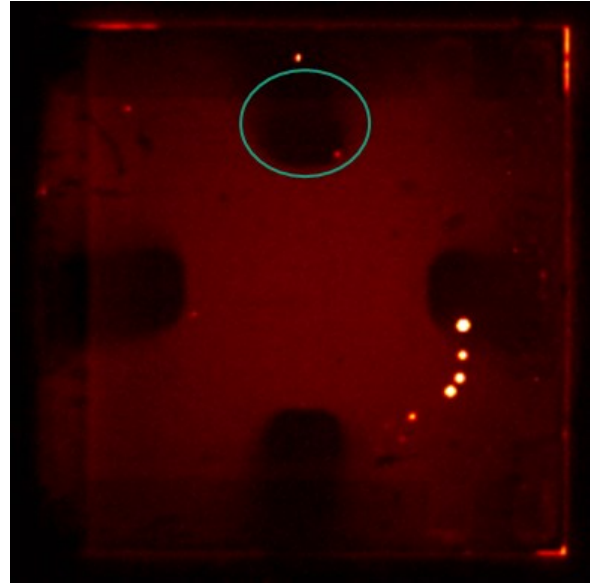


Abbildung 14b ILIT Messung.

Abbildung 14: Eine Perovskitsolarzelle im Thermographiemessplatz. Mehrere Defekte (lokal sehr niedriger Parallelwiderstand) sind deutlich erkennbar in den Lock-In Thermographiemessungen. Die Zelle wurde durch eine angelegte, modulierte Spannung (a) bzw. durch Licht einer blauen LED mit modulierter Intensität (b) angeregt. Der Kreis in Abbildung 14b markiert eine von vier Stellen mit einem reduzierten Hintergrundsignal, welches im Text diskutiert wird.

Erwähnenswert ist, dass die Messungen durch Glas durchgeführt werden können, obwohl Glas zu einem großen Anteil IR Strahlung blockiert. Abbildung 15a zeigt den Effekt eines zusätzlichen, lose auf die Probe gelegten Glases auf das Messsignal. Die lokalen Defekte sind gut zu erkennen. Da das weitere Glas nur lose auf der Probe liegt, ist Wärmeleitung durch das Glas zur Kamera-Seite als signalübertragender Effekt ausgeschlossen. Es muss sich um Transmission von Infrarotstrahlung handeln. Dass dies allerdings zu einer (erwarteten) Verringerung des Signals führt, zeigt Abbildung 15b). Dort ist die Probe nur im markierten Bereich durch eine Glasplatte verdeckt. Entsprechend ist im verdeckten Bereich das Signal der Defekte verglichen mit dem nicht verdeckten Bereich deutlich abgeschwächt.

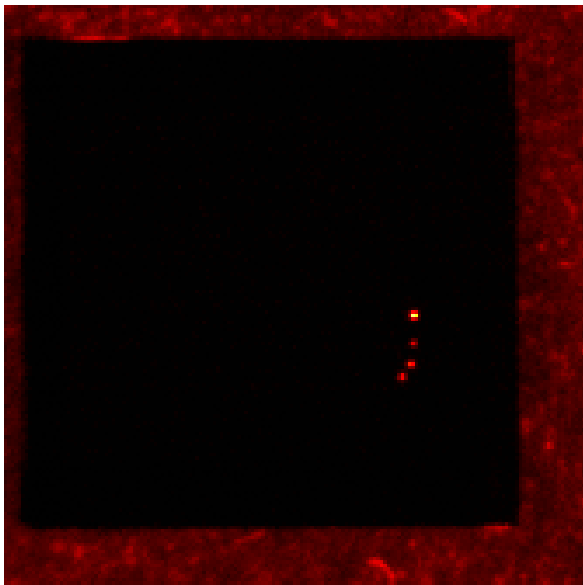


Abbildung 15a Glasplatte bedeckt die Probe vollflächig.

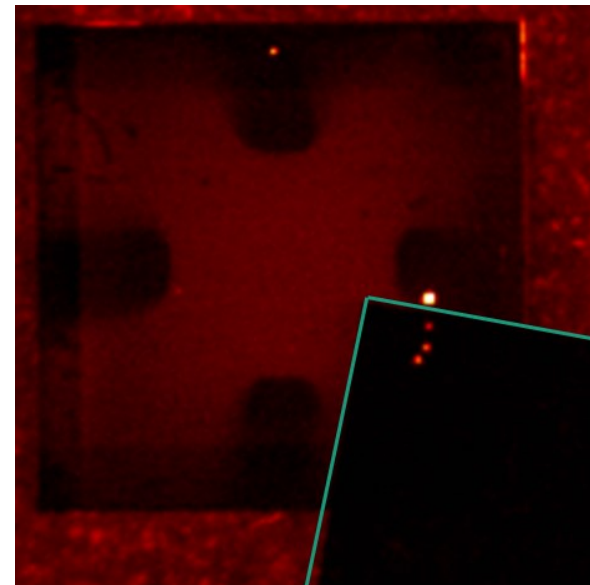


Abbildung 15b Glasplatte bedeckt markierten Bereich.

Abbildung 15: Defekte mit hoher Leistungsdissipation in einer Perovskitsolarzelle. Die ILIT Messung mit blauem Licht erfolgte durch das Glas.

Auch an größeren $5 \times 5 \text{ cm}^2$ großen Perowskit-Silizium Tandemsolarzellen konnten erfolgreich DLIT- und ILIT-Messungen durchgeführt werden. Abbildung 16 zeigt eine solche untersuchte Tandemsolarzelle. Sowohl in den DLIT-, als auch in den ILIT-Messungen können (die gleichen) Defekte mit erhöhter Leistungsdissipation lokalisiert werden. Sehr vorteilhaft ist, dass die ILIT-Messungen eine Zuordnung der Defekte zu den jeweiligen Teilzellen erlauben. Dadurch können die Defekte einzelnen Prozessierungsschritten zugeordnet werden. Bei einem Vergleich von Abbildung 16a) und Abbildung 16b) fällt auf, dass scheinbar der Defekt in der Siliziumzelle nicht in den DLIT-Messungen sichtbar ist. Im Allgemeinen sind in den DLIT-Messungen auch die Defekte in der Siliziumteilzelle sichtbar. Dieser Defekt ist jedoch so gering, dass er erst bei einer stark angepassten Farbskala sichtbar wird, wo andere Teile der Zelle bereits deutlich außerhalb der Grenzen des Farbverlaufes sind.

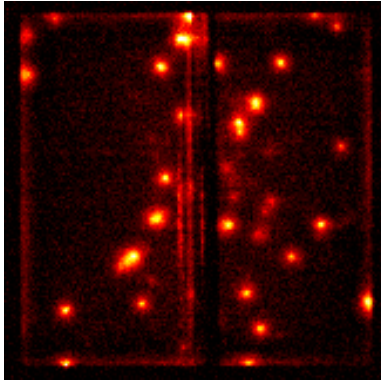


Abbildung 16a DLIT Messung

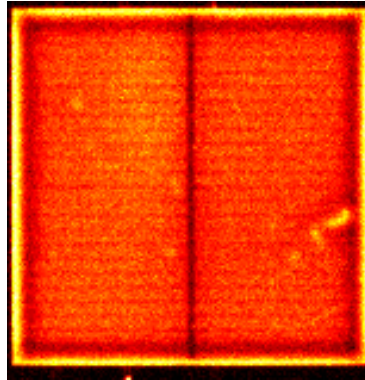


Abbildung 16b IR ILIT Messung an Siliziumteilzelle

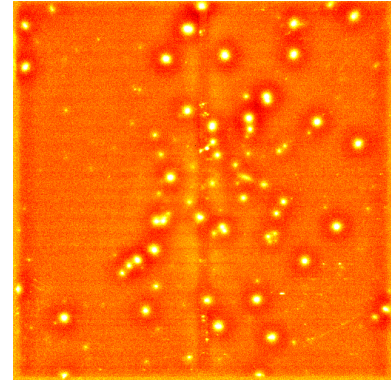


Abbildung 16c Blaue ILIT Messung an Perowskitteilzelle

Abbildung 16: DLIT und ILIT Messung mit IR und blauer LED. Defekte mit hoher Leistungsdissipation können lokalisiert werden. Die vertikalen roten Striche im Zentrum der DLIT Messung sind Artefakte, die auf den Kontaktierungsstreifen zurückzuführen sind.

AP 3.3 Quantifizierung von lateralen Inhomogenitäten in Perowskit-Silizium-Tandemzellen

Um den Einfluss lateraler Inhomogenitäten in Perowskit-Silizium-Tandemzellen auf die Kalibrierung zu bestimmen, soll die am ISE im Rahmen des KATANA-Projektes entwickelte 3D-Modellierung genutzt werden, um einen Vergleich zwischen Simulation und Messung realer Tandemsolarzellen durchzuführen. Zum jetzigen Zeitpunkt kann noch nicht abschließend geklärt werden, wie die flächige Homogenität zukünftiger Perowskit-Absorberschichten aussehen wird, da sich die Prozessierung großflächiger Perowskitschichten von den Herstellungsprozessen kleiner Laborzellen unterscheiden wird. Daher wurden vorab Kriterien festgelegt, mit denen allgemeingültige Evaluierungen durchgeführt werden können.

Flächige Inhomogenitäten der Perowskitschicht einer Tandemsolarzelle treten bei EQE- und IV-Messungen in Wechselwirkung mit inhomogener Messbeleuchtung. Dies kann signifikante Abweichungen vom wahren Strom-Spannungsverhalten bewirken, welche fehlinterpretiert zu falschen Schlussfolgerungen in der weiteren Zellentwicklung führen kann. Schließlich vergrößert sich durch solche Effekte auch die Messunsicherheit. Um Inhomogenitäten zu untersuchen, können flächige Charakterisierungsmöglichkeiten wie EL, PLI, LIT etc. zunächst Aufschluss geben, der Einfluss auf den Wirkungsgrad, bzw. die Messunsicherheit lässt sich aus diesen jedoch nicht direkt ableiten. Stattdessen soll dies mithilfe von Simulation geschehen, die in enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE durchgeführt wurden.

Im Folgenden werden verschiedene als signifikant eingeschätzte Kriterien ausgewählt, um die neuartige Modellierung mit EQE- und IV-Messungen abzugleichen. Während in der I-V-Charakterisierung vor allem die Wechselwirkung von (lokalen) Shuntwiderständen und inhomogenen Zellabsorberschichten unter unterschiedlich inhomogenem Messlicht zu erwarten ist, kommt es in der EQE-Messung der Teilzellen von Mehrfachsolarzellen auch zu

weiteren Effekten. Dort haben sowohl die Bias-Beleuchtung als auch die extern angelegte Biasspannung, die für die korrekte Messung notwendig sind, Auswirkungen auf die Messergebnisse und können zu Messartefakten führen. Daher soll auch die Wechselwirkung mit unterschiedlichen Biaseinstellungen in der EQE-Messung untersucht werden. Da sich metastabile Perowskitzellen aufgrund ihres dynamischen Verhaltens nicht dafür eignen, während der eigentlichen Messung die optimalen Einstellungen durchzuführen, sollte es das Ziel sein mit den Erkenntnissen der Simulation vorab akkuratere Einstellungen abschätzen zu können, um Messartefakte zu verhindern bzw. die Messunsicherheit zu verringern.

Am Messplatz des Fraunhofer ISE lassen sich auch 6" Solarzellen sowohl mit modulierten monochromatischem als auch mit gleichförmigem Biaslicht überstrahlt beleuchten. Üblicherweise ist das monochromatische Messlicht aufgrund geringer Intensität ein kleiner Lichtfleck von signifikant geringerem Ausmaß als das der Zellfläche. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes (AP2.2) wurde die Biasbeleuchtung auf LED-Balkenbeleuchtung mit je >100 LEDs umgestellt. Die flächige Inhomogenität der Biasbeleuchtung wurde dadurch deutlich verbessert und beträgt nun für die blaue Beleuchtung (467 nm) 9.05 % (vorher: 74.86 %) und für die infrarote (860 nm) 9,57 % (vorher: 76,72 %). Durch diese Verbesserung der Homogenität des Messlichtes verringert sich der Einfluss der Messapparaturen auf das Charakterisieren von inhomogenen Perowskitabsorbern.

Der Einfluss zu wählender Biasspannung während der EQE-Messung einer Mehrfachzelle wird anhand zweier Beispiele in Abbildung 17 grafisch dargestellt. Die I-V-Kennlinien der einzelnen Teilzellen und die resultierende Tandemkennlinie sind für zwei Beleuchtungs-Zustände gezeigt. Ebenso ist eine angelegte Biasspannung eingezeichnet, wie sie in der Messung der Teilzell-EQEs verwendet wird. Während im Beispiel links bei Strombegrenzung der Oberzelle die angelegte Spannung zu einem Strom führt, der im Bereich des Kurzschlussstromes der Oberzelle liegt, ist im Beispiel rechts zu sehen, wie der Shuntwiderstand der Oberzelle zu einem fehlerhaften Abschätzen der Biasspannung führt. Der resultierende Strom liegt deutlich unterhalb des Kurzschlussstromes der begrenzenden Unterzelle.

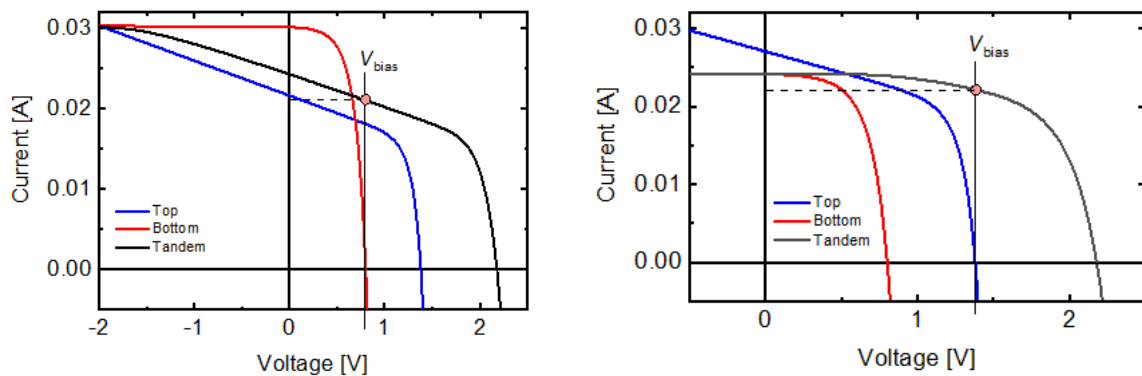


Abbildung 17: Die Grafiken zeigen die Teilzell- und Tandem I-V-Charakteristik für den Fall bei Strombegrenzung durch die Oberzelle (links) und Unterzellbegrenzung (rechts) mit signifikantem Shuntwiderstand. Die eingezeichnete gewählte Biasspannung (V_{bias}) würde im Fall der rechten Grafik zu einem deutlichen Messartefakt führen, da der der Strom der Tandemzelle an diesem Arbeitspunkt niedriger ist als der Kurzschlussstrom der begrenzenden Unterzelle. In Abhängigkeit von der Art und Homogenität der Beleuchtung und der Inhomogenität der Solarzellabsorber werden sich die notwendigen Messeinstellungen unterscheiden.

Um den Einfluss von Inhomogenitäten reproduzierbar zu untersuchen und zum Projektzeitraum keine Perowskitproben mit genügend zeitlich stabilen I-V-Parametern vorlagen, wurde stattdessen eine Probe aus III-V-Halbleitern für die experimentellen Untersuchungen ausgewählt.

Um den Einfluss lateraler Effekte zu untersuchen, wurden Vergleichsmessungen mit kleinem monochromatischem Lichtfleck an verschiedenen Positionen auf einer zwar inhomogenen aber dennoch voll funktionsfähigen Mehrfachsolarzelle mit Messungen verglichen, bei denen die gesamte Zellfläche inklusive des Zellrands homogen ausgeleuchtet wurde (GaInP/Al_{0,0635}GaAs//Si, ca. 30 % Wirkungsgrad).

Die Ergebnisse in Abbildung 18 zeigen die signifikant unterschiedlichen EQE-Signale der untersuchten Oberzelle. Bei der Messung mit kleinem Lichtfleck im Bereich starker Photolumineszenz ergibt sich das höchste EQE-Signal. Wurde der gleiche Lichtfleck jedoch in einen Bereich der Zelle mit geringerer Photolumineszenz positioniert lag das resultierende EQE-Signal mehr als 5 %_{abs.} darunter.

Wurde hingegen die gesamte Zelle mit monochromatischem Messlicht überstrahlt, lag der EQE-Wert überraschenderweise auf der EQE-Messung mit Lichtfleck auf geringer Photolumineszenzregion. Dies lässt sich vermutlich mit Randeffekten erklären, die bei der lokalen EQE-Messung nicht berücksichtigt wurden.

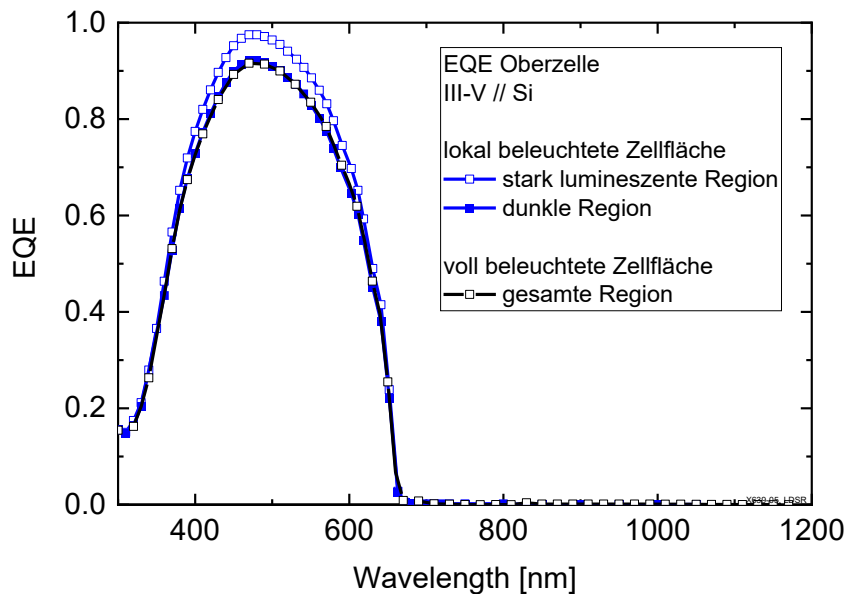


Abbildung 18: Drei verschiedene EQE-Messungen an der gleichen Oberzelle der III-V-Solarzelle. Einmal mit voll beleuchteter Zellfläche bzw. kleinem monochromatischem Lichtfleck (\square $\sim 5,8$ mm) an zwei Stellen mit unterschiedlichem Photolumineszenz-Signal auf der 2×2 cm² großen III-V//Si-Probe.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das meist übliche lokale EQE-Messverfahren mit einer sehr hohen Unsicherheit behaftet ist. Es wurde gezeigt, dass diese lokale Methode selbst bei Solarzellen mit ca. 30 % Wirkungsgrad je nach Positionierung zu signifikant unterschiedlichen Ergebnissen führen kann. Oft wird jedoch die EQE-Messung genutzt, um vermeintlich absolute Ströme zu errechnen. Es ist davon auszugehen, dass diese Ströme häufig nicht mit den am Sonnensimulator bestimmten Strom übereinstimmen, da dort die Solarzelle überstrahlt beleuchtet wird.

Im Rahmen dieses Projektes wurden am EQE-Messplatz des Fraunhofer ISE Kalibrierlabors wie oben beschrieben Verbesserungen durchgeführt, die es nun erlauben auch 6“ Perowskit/Silicium Solarzellen überstrahlt zu charakterisieren.

Aufgrund der geringen Inhomogenität des monochromatischen und des Bias-Lichtes, und den überstrahlten Messbedingungen ist davon auszugehen, dass inhomogene Zellabsorber realitätsnah von dieser Messapparatur abgebildet werden können.

Die Ergebnisse demonstrieren, wie mithilfe der Simulationen die Sensitivität einzelner Messungen auf lokale Inhomogenitäten systematisch analysiert werden kann. Ähnlich wurde bei den lokalen Perowskit-Dickenvariationen vorgegangen wie im nächsten Kapitel (AP 3.4) beschrieben. Dies ist besonders für solche Inhomogenitäten von Bedeutung, deren Einfluss sich in verschiedenen globalen Messungen unterschiedlich auswirken.

AP 3.4 Modellierung

Experimentell validiertes optisches Simulationsmodell für Perowskit-Silizium-Tandemzellen

Im Rahmen des Projektes wurde das optische Simulationsmodell in Sentaurus TCAD³ für Perowskit-Silizium-Tandemzellen weiterentwickelt basierend auf früheren Publikationen⁴. Abbildung 19a zeigt den Schichtstapel der untersuchten Tandemzelle mit planarer Vorderseite und texturierter Rückseite. Die Perowskit-Oberzelle besteht aus einem p-i-n Schichtaufbau mit einer Perowskit-Bandlücke von 1,68 eV. Die Silizium-Unterzelle leitet sich aus der Silizium-Heterojunction-Technologie ab und ist elektrisch verbunden über eine ITO Rekombinationsschicht. Diese Struktur wurde experimentell eingehend untersucht in Schulze et al.⁵. Für das Simulationsmodell wurden die komplexen optischen Brechungsindices der meisten Schichten in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE und Fraunhofer IST gemessen und als Inputparameter benutzt. Für die restlichen Schichten (u.a. der Perowskitabsorber und die amorphen Siliziumschichten) wurden Literaturwerte herangezogen.

Abbildung 19b zeigt als Ergebnisgraphen den Vergleich des optischen Simulationsmodells (durchgezogene Linien) mit den gemessenen Daten aus Schulze et al.⁶ (gepunktete Linien) für die Reflexion (grün), den Perowskitabsorber (blau) und den Siliziumabsorber (rot). Man erkennt eine insgesamt sehr gute Übereinstimmung der gemessenen EQEs (externe Quanteneffizienzen) mit den Absorptionsdaten der Simulation, sowie der Reflexionsdaten. Ein entscheidender Faktor zur korrekten Beschreibung der optischen Eigenschaften des Schichtstapels aus Abbildung 19a war hierbei die Berücksichtigung der Inhomogenität der Perowskit-Absorberdicke. Diese wurde in Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop festgestellt und variierte für die untersuchte Struktur zwischen etwa 310 und 375 nm. Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 19b exemplarisch die Reflexion des Tandemschichtstapels für die Einzelsimulationen mit Perowskit-Absorberdicken von jeweils 310, 350 und 375 nm in hellgrün (siehe Legende). Keine der Einzelsimulationen mit einer festen Perowskit-Absorberdicke kann die gemessene Reflexion adäquat abbilden. Bei den in Abbildung 19b gezeigten TCAD-Simulationen handelt es sich um eine arithmetische Mittelung der Simulationsergebnisse aus den Einzelsimulationen mit den drei unterschiedlichen Absorberdicken.

³ Synopsis, "Sentaurus TCAD: Release U-2022.12-SP1," <http://www.synopsys.com>, 2022

⁴ Messmer, C., Goraya, B. S., Nold, S., Schulze, P. S., Sittinger, V., Schön, J., ... & Hermle, M. (2021). The race for the best silicon bottom cell: Efficiency and cost evaluation of perovskite-silicon tandem solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 29(7), 744-759.

⁵ Schulze, P. S., Bett, A. J., Bivour, M., Caprioglio, P., Gerspacher, F. M., Kabaklı, Ö. Ş., ... & Goldschmidt, J. C. (2020). 25.1% High-efficiency monolithic perovskite silicon tandem solar cell with a high bandgap perovskite absorber. *Solar RRL*, 4(7), 2000152.

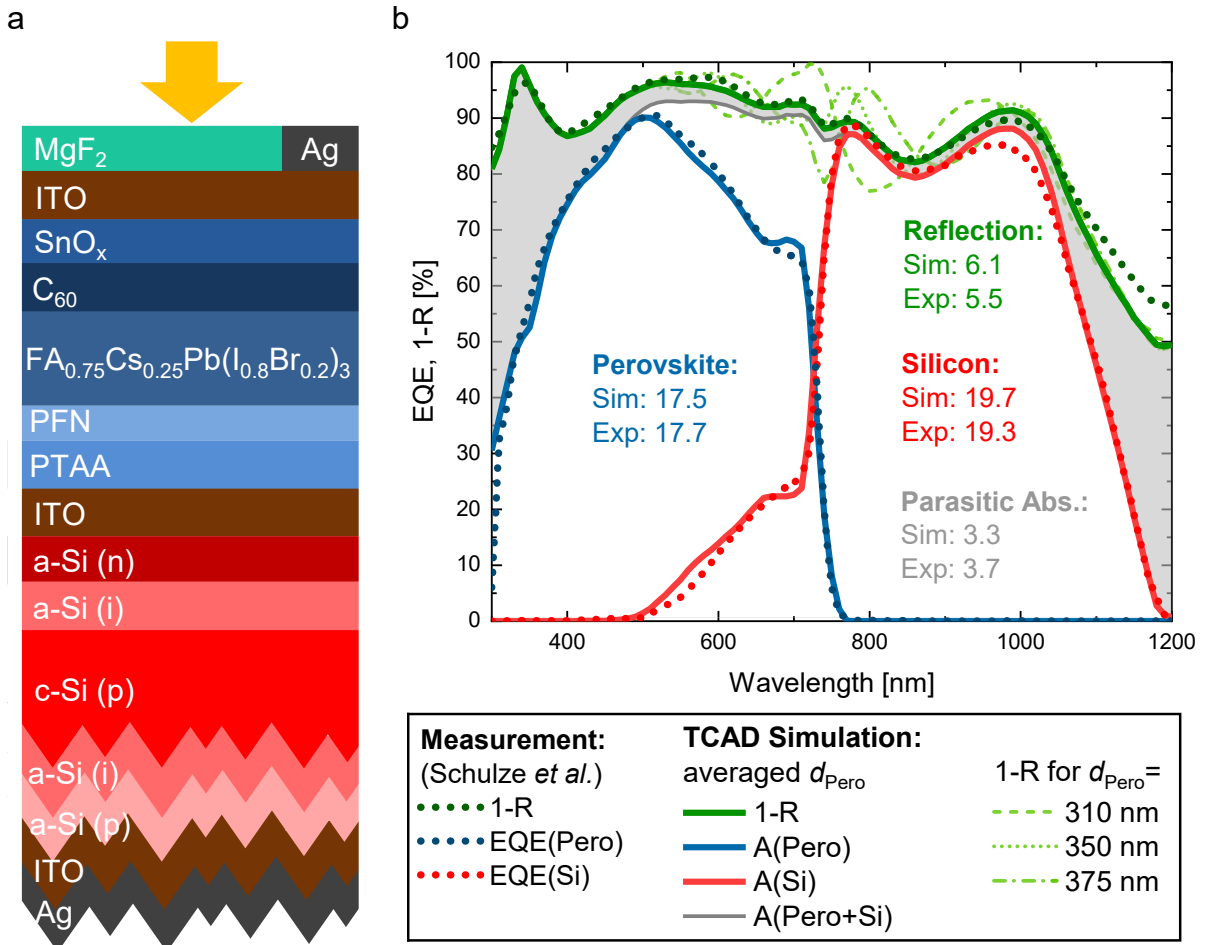


Abbildung 19 (a, links) Schichtstapel der untersuchten Perowskit-Silizium Tandemzelle mit planarer Vorderseite und texturierter Rückseite nach Schulze et al. (b, rechts) Vergleich des optischen Simulationsmodells (durchgezogene Linien) mit den gemessenen Daten aus Schulze et al. (gepunktete Linien) für die Reflexion (grün), den Perowskitabsorber (blau) und die Siliziumunterzelle (rot). Die Simulationsdaten wurden aus drei Einzelsimulationen mit unterschiedlicher Perowskitdicke gemittelt. Für die Reflexion sind die Einzelsimulationen für die drei Dicken beispielhaft in hellgrün dargestellt. Die Summe der Ströme beider Absorber ist als graue Linie dargestellt, die parasitäre Absorption hingegen als graue Fläche.

Erweiterung des opto-elektrischen Modells zur detaillierten transienten Simulation von Vorkonditionierungs- und Messprozeduren

Ein weiterer wesentlicher Fortschritt innerhalb des Projektes bestand in der Erweiterung des opto-elektrischen Modells auf zwei mobile Ionentypen im Perowskitabsorber für die jeweils Diffusionsgleichungen gelöst werden (siehe Abbildung 20a): Sowohl die typischerweise schnelleren Anionen (dargestellt in grün), als auch die mutmaßlich für Langzeiteffekte verantwortliche Kationen (dargestellt in blau) können mit dem Modell nun abgebildet und deren Einfluss auf die Zellmessung untersucht werden. Sollten weitere Untersuchungen zeigen, dass die Annahme von weiteren Ionentypen sinnvoll wäre, ist dieses Modell prinzipiell erweiterbar auf weitere Ionentypen. Die Diffusionskoeffizienten werden im ersten Schritt auf $10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ und $10^{-15} \text{ cm}^2/\text{s}$ für die Anionen bzw. Kationen angenommen. Abbildung 20a zeigt das Banddiagramm einer Perowskit-Silizium-Tandemzelle unter Kurzschlussstrombedingung mit typischen Schichtstapel und -dicken, wie sie aktuell experimentell am Fraunhofer ISE prozessiert wird. Insbesondere das HTL wurde auf die nun standardmäßig verwendeten SAMs (self-assembled monolayers), hier 1 nm 2PACz, erweitert. Die Anion- und Kationkonzentrationen beziehen sich auf die rechte y-Achse. Die simulierte Zelle kann transient in verschiedene Betriebszustände, beispielsweise zum V_{oc} (siehe Abbildung 20b), überführt werden.

Ein beispielhafter Ablauf einer transienten Simulation von Vorkonditionierung und simulierter Messung und der Einfluss der Ionenmigration ist in Abbildung 20c dargestellt. Die Ionenkonzentration der Anionen (grün) und Kationen (blau) am Lochkontakt (HTL, gepunktet) und Elektronkontakt der Topzelle (ETL, durchgezogene Linie) ist dargestellt als Funktion der Zeit. Die Vorkonditionierung beginnt mit dem Erreichen des Gleichgewichtszustandes im Dunkeln ohne externe Spannung (EQ) nach etwa einem Tag (hinterlegt in grau). Darauf folgt wird das Licht innerhalb einer Sekunde auf 1 Sonne hochgefahren (hinterlegt in gelb) und anschließend innerhalb von einer Sekunde zu einer Vorkonditionierungsspannung gebracht, die für eine variable Zeit gehalten wird (rot hinterlegt). Erst im Anschluss daran beginnt die Simulation der eigentlichen Messung, die aus einem Rückwärts- und einem Vorwärtsscan mit variabler Scanzeit aufgebaut ist. Abbildung 20c zeigt insbesondere, wie die Elektronkonzentration am ETL (in rot) von der Anionkonzentration am ETL (in grün) abhängt und erklärt damit auch die beobachteten Hysterese-Effekte bei Strom-Spannungsmessungen von Pero-Si Zellen.

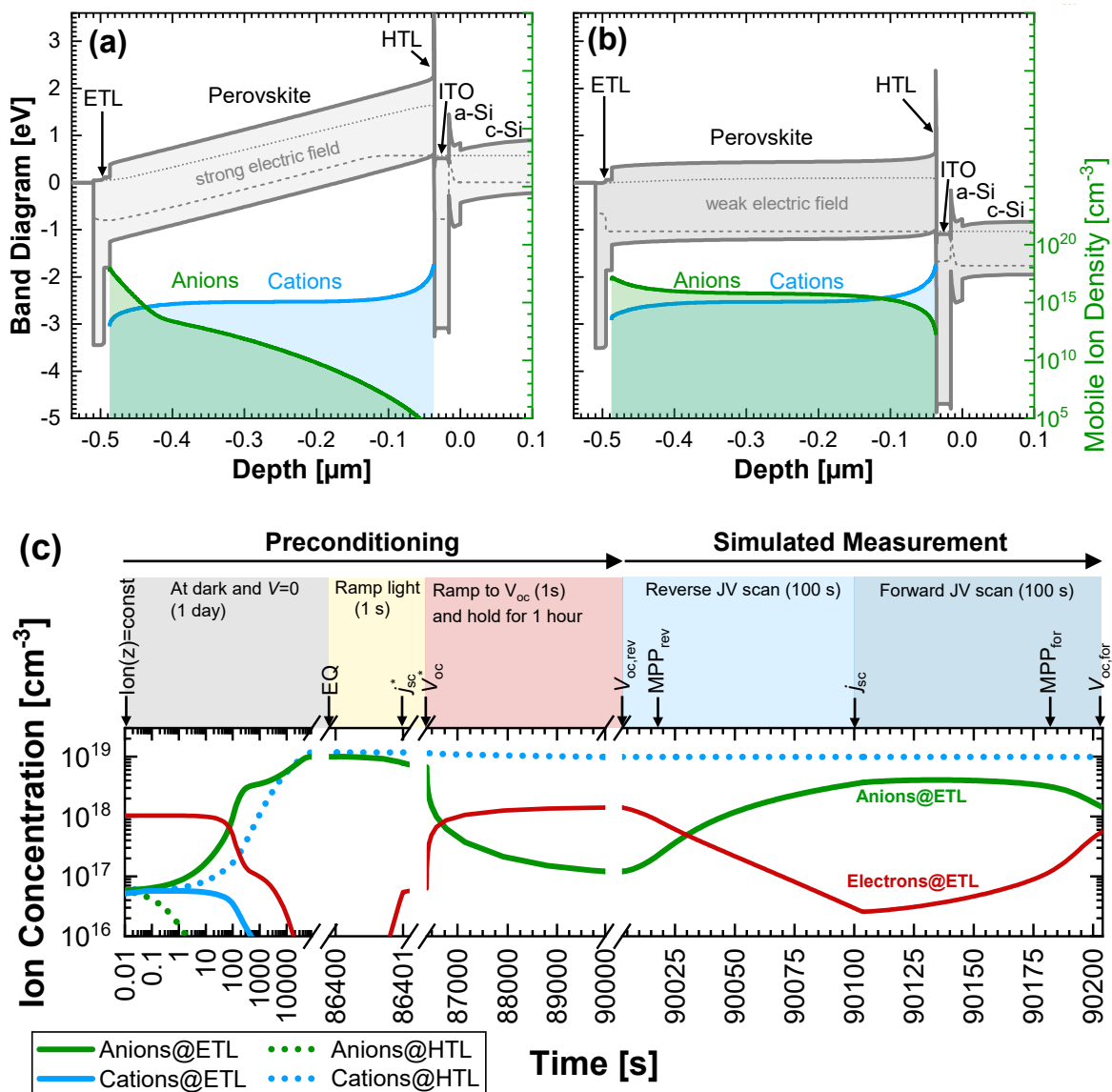


Abbildung 20: (a) Simuliertes Band-Diagramm einer Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle unter Beleuchtung und Kurzschlussbedingungen, sowie die Konzentration von mobilen Anionen (in grün) und Kationen (in blau) im Perowskitabsorber (siehe rechte Achse). (b) Banddiagramm unter Betrieb am V_{oc} der Zelle. (c) Transiente Simulation von Ionenmigration: Die Ionenkonzentration der Anionen (grün) und Kationen (blau) als Funktion der Zeit, jeweils am Lochkontakt (gepunktet) und Elektronenkontakt (durchgezogene Linie), sowie die Elektronenkonzentration (rot) am Elektronenkontakt.

Untersuchung des Einflusses der Vorkonditionierungszeit und -spannung auf die Zellmessung

Auf Grundlage des erweiterten transienten Simulationsmodells kann nun der Einfluss der Vorkonditionierung auf die anschließende Zellmessung simuliert werden. Hierzu wurde auf Grundlage von Abbildung 20c eine Variation der Vorkonditionierungszeit und -spannung (siehe Abbildung 20c, rot hinterlegt) durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 21 dargestellt, welche die Tandemeffizienz für den Rückwärtsscan als Funktion der Vorkonditionierungsspannung zeigt. Dabei wurde die Vorkonditionierungszeit über mehrere Größenordnungen variiert (siehe Legende) zwischen 5 Sekunden (gelb) bis hin zu dem Zeitpunkt, an dem die Ionenmigration den Quasi-Steady-State (QSS) erreicht hat (schwarz). Betrachten wir zuerst den unkontaktierten Fall (d.h. OC) bei etwa 1,93 V, so wird deutlich, dass die simulierte Tandemeffizienz deutlich von der Vorkonditionierungszeit abhängt: Für 100 Sekunden (violett) liegt die Tandemeffizienz bereits etwa $0.2\%_{\text{abs}}$ höher als ohne OC-Vorkonditionierung (graue Linie). Dieser Anstieg ist den schnelleren Anionen zuzuschreiben (siehe grüner Pfeil), deren Zeitkonstante in diesem Bereich liegt. Zwischen 100 Sekunden (violett) und 1 Stunde (grün) bleibt die Tandemeffizienz etwa gleich, da die Anionen ihren Steady-State erreicht haben, doch die 4 Größenordnungen langsameren Kationen sich kaum bewegen konnten. Wartet man dagegen zwischen Stunden und einer Woche (rot), oder bis zum QSS (schwarz), so sieht man hingegen einen weiteren deutlichen Anstieg der Tandemeffizienz um weitere $0,3\%_{\text{abs}}$, der auf die Bewegung der Kationen zurückzuführen ist (siehe blauer Pfeil).

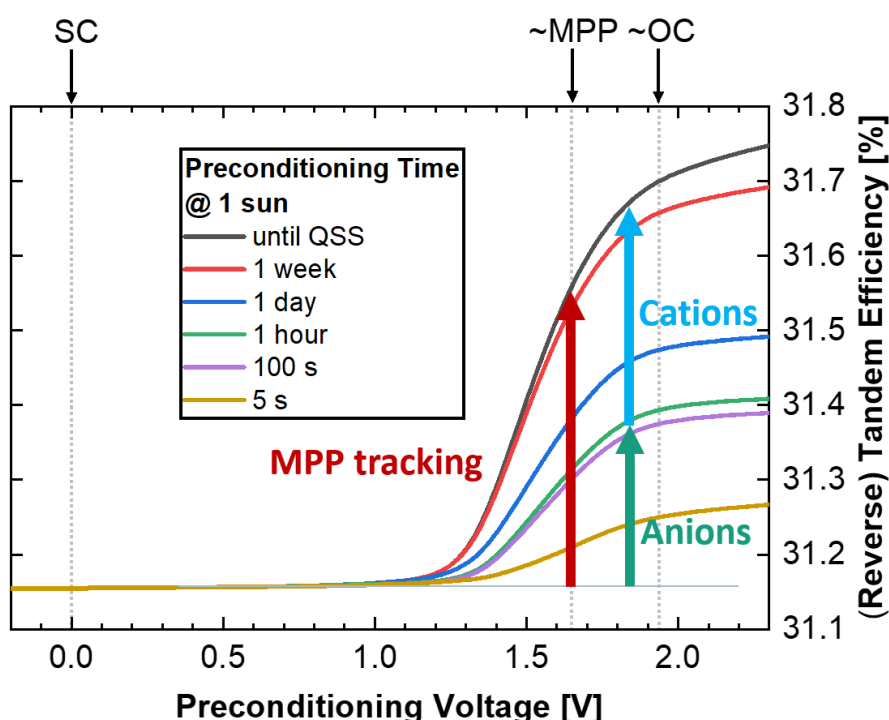


Abbildung 21: Tandemeffizienz für den Rückwärtsscan als Funktion der vorangehenden Vorkonditionierung bei einer festgelegten Vorkonditionierungsspannung (siehe x-Achse) und unterschiedlichen Vorkonditionierungszeiten (siehe verschiedene Farben in der Legende).

Des Weiteren zeigt Abbildung 21, dass eine Vorkonditionierung am MPP (anstelle OC) weniger starke Verschiebung der Ionen bewirkt, sodass die Tandemeffizienzen gegenüber dem OC geringer ausfallen. Für Vorkonditionierungsspannungen unterhalb von 1 V, einschließlich der Kurzschlussbedingung (SC) ist keine Veränderung der Tandemeffizienz gegenüber dem Ausgangszustand EQ zu beobachten. Erklärt werden kann dieses Verhalten durch das elektrische Feld innerhalb des Perowskitabsorbers: Das durch die Kontakte

erzeugte Potenzial im Perowskitabsorber („built-in potential“) treibt bei EQ und SC Bedingungen die Anionen ans ETL und Kationen ans HTL (siehe Abbildung 20a; „strong electric field“). Bei MPP- bzw. OC-Bedingungen hingegen gleicht die externe Spannung V_{mpp} bzw. V_{oc} das interne elektrische Feld teilweise aus, was zu Ionendiffusion weg von den Kontakten führt (siehe Abbildung 20b; „weak electric field“). Diese üblicherweise als „light soaking“ bezeichnete Vorkonditionierung zeigt sich im Lichte von Abbildung 21 hingegen als „voltage soaking“, da in erster Linie die am Perowskit anliegende effektive Spannung für die Ionenmigration verantwortlich ist. Durch experimentelle Vergleiche zwischen OC-Vorkonditionierung unter Licht und Spannungsvorkonditionierung im Dunklen wären hier spannende weitere Ergebnisse naheliegend.

Experimenteller Abgleich an industriellen Minimodulen

Die aus dem letzten Unterabschnitt dargestellten Erkenntnisse wurden anschließend mit experimentellen Messungen an industriellen Pero-Si Tandem Minimodulen abgeglichen. Abbildung 22a zeigt die Strom-Spannungs-Charakteristik des Rückwärtsscans für vier verschiedene Vorkonditionierungszeiten am V_{oc} zwischen 0 und 450 Sekunden, sowohl für die experimentellen Minimodule (gepunktete Linien), als auch für die TCAD-Simulation (durchgezogene Linien). Man erkennt signifikante Unterschiede um den maximalen Leistungspunkt (MPP) für längere Wartezeiten vor Start der Messung. Das experimentelle Verhalten lässt sich mit den Anionen mit einer Diffusionskonstante von $10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ in der Simulation sehr gut beschreiben.

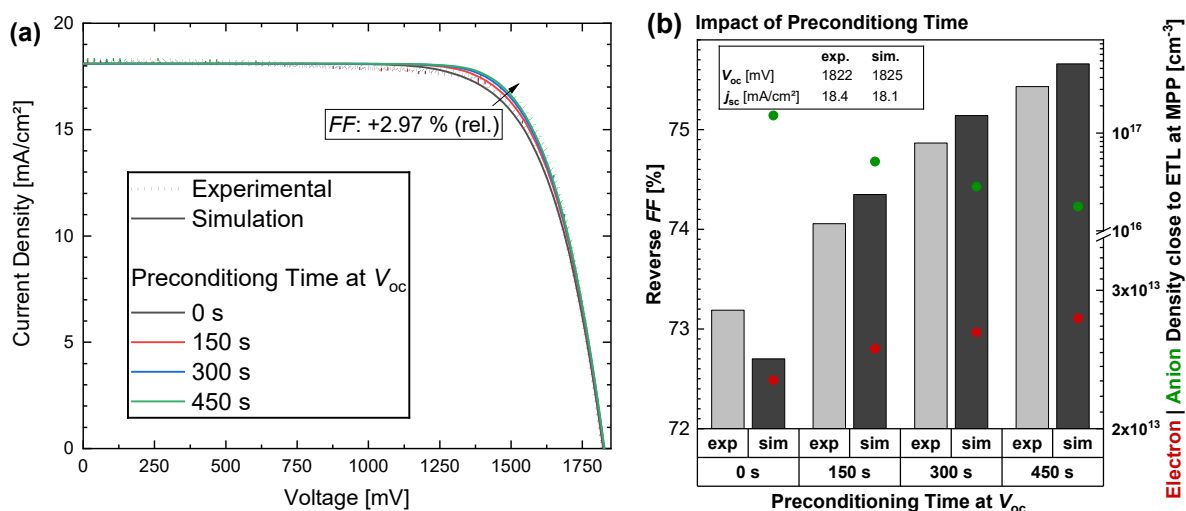


Abbildung 22: (a) Einfluss der Vorkonditionierungszeit am V_{oc} zwischen 0 s (schwarz) und 450 s (grün) auf die Strom-Spannungskennlinien des Rückwärtsscans einer Pero-Si Tandemzelle für experimentelle Messung an industriellen Minimodulen (gepunktete Linien), sowie für die simulierte Messung mit Sentaurus TCAD (durchgezogene Linien). (b) Füllfaktor FF des Rückwärtsscans als Funktion der Vorkonditionierungszeit am V_{oc} für Experiment (hellgrau) und Simulation (dunkelgrau), sowie die aus dem Simulationsmodell extrahierten Anion- (grün) und Elektronkonzentrationen (rot) am Elektronkontakt des Perowskitabsorbers (rechte y-Achse), welche durch längere Vorkonditionierungszeiten am V_{oc} positiv für die Elektronextraktion beeinflusst wird und den ansteigenden Füllfaktor erklärt.

Abbildung 22b zeigt den Füllfaktor FF des Rückwärtsscans von Abbildung 22a als Funktion der Vorkonditionierungszeit am V_{oc} für Experiment (hellgrau) und Simulation (dunkelgrau), sowie die aus dem Simulationsmodell extrahierten Anion- (grün) und Elektronkonzentrationen (rot) am Elektronkontakt des Perowskitabsorbers (rechte y-Achse). Längere Vorkonditionierungszeiten bei V_{oc} beeinflussen so die Elektronextraktion positiv, was wiederum den ansteigenden Füllfaktor erklärt. Man erkennt, dass innerhalb von für das Messprozedere relevanten Vorkonditionierungszeiten (0 bis 450 Sekunden) signifikante Füllfaktorunterschiede von etwa $2.5\%_{\text{abs}}$ gemessen wurden, die auch in der Simulation nachgebildet werden konnten.

Einfluss der Scanzeiten und Ionendiffusivität auf die Tandemeffizienz

Des Weiteren untersuchten wir mithilfe des opto-elektrischen Simulationsmodell den Einfluss der Scanzeit der JV-Messung auf die beim Rückwärts- und Vorwärtsscans gemessene JV-Kurve von Perowskit-Silizium-Tandemzellen. In Abbildung 23 ist die simulierte Tandem-Effizienz aus einem Rückwärts- (gestrichelte Linie) und Vorwärtsscans (durchgezogene Linie) als Funktion der Scanzeit für verschiedene Anionen-Diffusionskoeffizienten dargestellt, während die Kationen zunächst als gleichverteilt und unbeweglich angenommen wurden (transparente Linien: ‚with immobile cations‘).

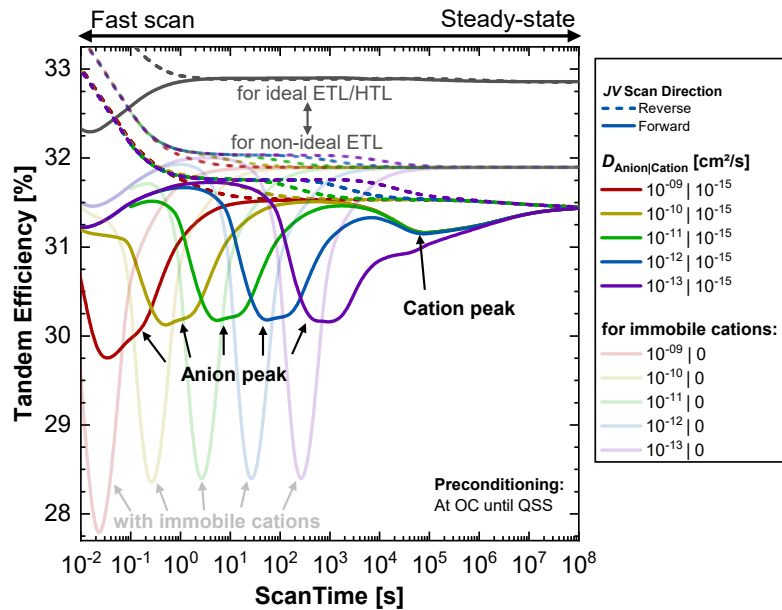


Abbildung 23: Tandemeffizienz als Funktion der Scanzeit, jeweils für den Rückwärts- und Vorwärtsscan als gestrichelte und durchgezogene Linien. Die grauen Linien zeigen die Rückwärts- und Vorwärtsscan-Tandemeffizienz für die ideale Selektivität des ETL/HTL. Die dunkel gefärbten Linien zeigen die Tandemeffizienz für mobile Anionen und Kationen mit in der Legende angegebenen Diffusionskoeffizienten. Die transparenten Linien zeigen die gleichen Eigenschaften, wenn die Kationen unbeweglich sind (homogen verteilt). Jeder Simulationsspunkt wurde unter Offenkreisspannung bei einer Beleuchtung von einer Sonne vorkonditioniert. Der Gesamtstrom der Tandemzelle wird leicht durch den Strom der Perowskit-Oberzelle begrenzt, was das Verhalten des Vorwärtsscans beeinflusst.

Der Einfluss hoher Selektivität der Kontaktschichten sowohl für den HTL als auch für den ETL wurde untersucht (‚ideal ETL/HTL‘), was hier durch eine sehr hohe Elektronenkonzentration des ETL von 10^{21} cm^{-3} realisiert wurde. Die resultierenden Tandem-Effizienzen für Rück- und Vorwärtsscan sind in Abbildung 23 als gestrichelte und durchgezogene graue Kurve dargestellt und erreichen eine hohe Effizienz von etwa 33%, die (fast) unabhängig von der Scanzeit ist. Nur für Scanzeiten unter 1 Sekunde steigt die Effizienz des Rückwärtsscans an, während die Effizienz des Vorwärtsscans abnimmt, was auf grundlegende kapazitive Effekte der Elektronen und Löcher zurückzuführen ist und ebenfalls in Siliziumzellen auftritt.

Zudem betrachteten wir den Fall eines nicht-idealen ETL mit einer niedrigeren Dotierungskonzentration von 10^{19} cm^{-3} , welche eine nicht-ideale Selektivität des Kontaktes zur Folge hat. In diesem Fall beeinflusst die transiente Akkumulation und Verarmung der Ionen an den Kontakten des Perowskitabsorbers entscheidend die Ladungsträgerextraktion und somit hängt die resultierende Tandem-Effizienz in Abbildung 23 sowohl von der Scanzeit der JV-Kurve als auch von den Diffusionskoeffizienten sowie Konzentrationen der beweglichen Ionen ab. Für sehr langsame Scanzeiten verschwindet die Hysterese und es ergibt sich eine Tandem-

Effizienz für beide Scanrichtungen von knapp 32%. Es konnte gezeigt werden, dass eine hysteresefreie JV-Messung bei einer gewissen Scanzeit nicht zwangsläufig heißt, dass der Einfluss der Ionenmigration vernachlässigbar wäre. Stattdessen wurde gezeigt, dass sowohl sehr schnelle als auch sehr langsame Scanzeiten zu einer hysteresefreien Messung führen, da im schnellen Scan die Ionen quasi ‚eingefroren‘ (quenched) sind, wohingegen für sehr langsame Scans die Ionen zu jedem Zeitpunkt einen Gleichgewichtszustand einnehmen können („quasi-steady-state“). Je nach Ionendiffusivität gibt es hier ‚Peaks‘ in der Hysterese (siehe Abbildung 23), die für Scanzeiten auftreten, die zwischen diesen beiden Extremfällen liegen. Diese ‚Peaks‘ verschieben sich um eine Größenordnung zu niedrigeren Scanzeiten, wenn die Ionendiffusivität um eine Größenordnung sinkt (siehe verschiedene Farben von rot bis violett). Abbildung 23 zeigt auch, dass für extrem schnelle Scanzeiten unter 1 Sekunde sich die transienten Effekte der Ionenmigration mit den kapazitiven Effekten der Elektron-/Locheigenschaften überlagern.

Darüber hinaus zeigen die Simulationsergebnisse in Abbildung 23 das Verhalten, wenn auch die Kationen als beweglich angenommen werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Berücksichtigung der Kationendiffusion (oder zumindest ihrer nicht-homogenen Verteilung) die Charakteristika der JV-Scans signifikant verändern kann. Da Kationen laut Literatur im Allgemeinen deutlich niedrigere Diffusivität aufweisen und daher deutlich längere Migrationszeiten, ist es wichtig, auch die Vorkonditionierungsbedingungen bei der Berichterstattung von JV-Kurven anzugeben und verschiedene Scanzeiten zu testen, um zuverlässigere experimentelle Messungen zu gewährleisten und deren Reproduzierbarkeit zu verbessern.

Im Rahmen des KATANA Projektes haben wir zudem die JV-Parameter in Abhängigkeit von der JV-Scan-Zeit für eine laminierte M6 (274,15 cm²) Perowskit-auf-Silizium-Tandem-Solarzelle von Oxford PV, im Folgenden als 'Mini-Modul' bezeichnet, gemessen. Abbildung 24a zeigt die Leerlaufspannung V_{oc} (normalisiert auf den global höchsten V_{oc} -Wert) des gemessenen Rückwärts- und Vorwärtsscans als hell- und dunkelrote Symbole. Man sieht, dass für Scanzeiten über 5 Sekunden Rückwärts- und Vorwärts- V_{oc} identisch sind, d.h., keine Hysterese beobachtet wird. Bei niedrigeren Scanzeiten fällt der V_{oc} des Vorwärtsscans auf etwa 94% des maximalen V_{oc} -Werts für eine Scan-Zeit von 0,05 Sekunden ab, während der V_{oc} des Rückwärtsscans konstant bleibt. Die Simulationsergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung der Scanzeitabhängigkeit für Anionen mit einem sehr schnellen Diffusionskoeffizienten von $D_{anion} = 10^{-9}$ cm²/s (entsprechend der roten Kurve in Abbildung 23).

Der normierte Füllfaktor FF des vor- und rückwärtigen JV-Scans in Abbildung 24b zeigt eine Hysterese im FF für Scanzeiten unter 100 Sekunden. Der rückwärtige FF steigt von 95% für Langzeit-Scans auf 100% für eine Scan-Zeit unter 0,1 Sekunden an, sowohl für Experiment als auch Simulation. Der gemessene FF -Trend des Vorwärtsscans zeigt eine sehr hohe Hysterese von mehr als 10% für Scanzeiten um 1 Sekunde und weniger. Die moderate Hysterese zwischen 10 s und 100 s Scanzeit wird in der Simulation nicht gesehen, weil die sehr schnellen Anionen in den Simulationen zu schnell sind.

Abbildung 24c zeigt den Scanzeit-abhängigen, normierten Kurzschlussstrom j_{sc} für Experiment (Symbole) und Simulation (durchgezogene Linien). Man sieht, dass der gemessene Trend im Vorwärtsscan unter 1 Sekunde Scanzeit in der Simulation nicht zu sehen ist. Der Grund dafür ist noch unklar, aber möglicherweise könnten unterschiedliche Eigenschaften einer Kontaktschicht (entweder ETL oder HTL) diese Differenz erklären. Dies sollte in zukünftigen Arbeiten ebenso adressiert werden wie potenzielle Stromverluste aufgrund unvollständiger Ladungsträgerkollektion.

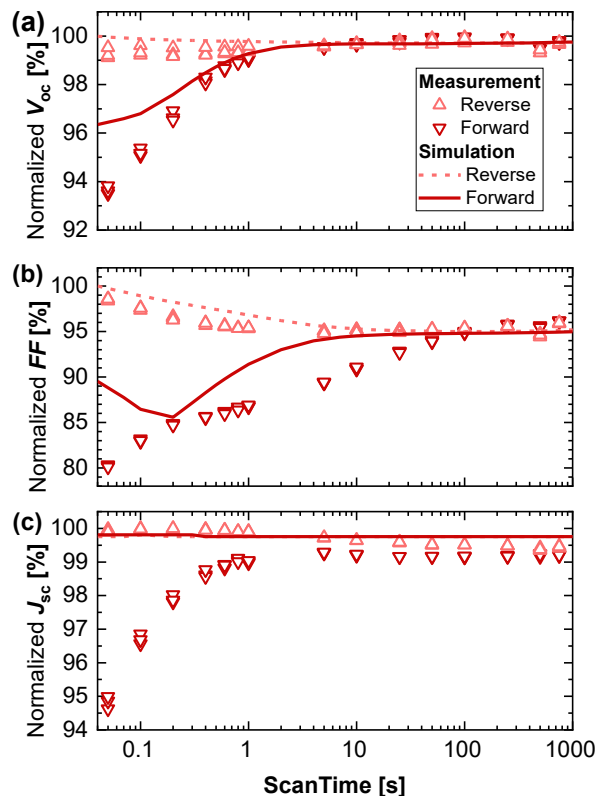


Abbildung 24: Zeitabhängige Messungen eines Mini-Moduls von Oxford PV (Symbole) und Simulation (Linien), für die (global) normierte (a) Leerlaufspannung V_{oc} , (b) Füllfaktor FF und (c) Kurzschlussstromdichte j_{sc} , jeweils für den Rückwärts- und Vorwärtsscan in hell- und dunkelrot. Die Hysterese (d.h., der Unterschied zwischen Rückwärts- und Vorwärtsscan) ist eine Funktion der Scan-Zeit und nimmt für schnelle Scan-Zeiten zu.

Einfluss der stromlimitierenden Teilzelle auf die Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie

Des Weiteren wurde im Rahmen des KATANA-Projektes das opto-elektrische Simulationsmodell dahingehend erweitert, dass die Perowskit-Silizium-Tandemzellen unter unterschiedlichen spektralen Bedingungen simuliert und analysiert werden können, um so den Einfluss der stromlimitierenden Teilzelle auf die Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie besser zu verstehen, und im zweiten Schritt auch spektrometrische Charakterisierungsmethoden simulieren zu können und damit das experimentelle Verständnis zu erweitern.

Abbildung 25a zeigt simulierte JV-Kurven für die gesamte Tandemzelle (grün), die Silizium-Teilzelle (rot) und die Perowskit-Teilzelle (blau), für ein leicht blauverschobenes Spektrum. Die Tandemzelle wird daher minimal durch den Strom der Silizium-Teilzelle begrenzt (sogar nur $0,03 \text{ mA/cm}^2$ vom Current-Matching-Punkt entfernt). Während eines rückwärtigen JV-Scans der Tandemzelle von V_{oc} - zu j_{sc} -Bedingungen unterscheiden sich die Betriebspunkte der beiden entsprechenden Teilzellen: Am j_{sc} der Tandemzelle (grüner Punkt in Abbildung 25a) ist die Silizium-Teilzelle stark im ‚reverse bias‘ bei etwa $-1,0 \text{ V}$, während die Perowskit-Teilzelle umgekehrt eine vorwärts angelegte Teilzellenspannung erfährt, welche nahe ihrem maximalen Leistungspunkt MPP liegt. Während des gesamten Tandem-JV-Scans von V_{oc} zu j_{sc} und zurück zu V_{oc} wird die Perowskit-Teilzelle daher nur von ihrem eigenen V_{oc} über ihren MPP und zurück zu ihrem V_{oc} verschoben und daher stark in Vorwärtsrichtung betrieben. Dies führt zu einem schwachen elektrischen Feld innerhalb des Perowskit-Absorbers während des gesamten Scan-Vorgangs, was die Ionen innerhalb des Perowskitabsorbers so umverteilt, dass geringere Ionenkonzentrationen an den Kontaktschichten vorliegen, was vorteilhaft für die Ladungsträgerextraktion und damit für den Füllfaktor ist und somit zu einer geringen JV-Hysterese führt.

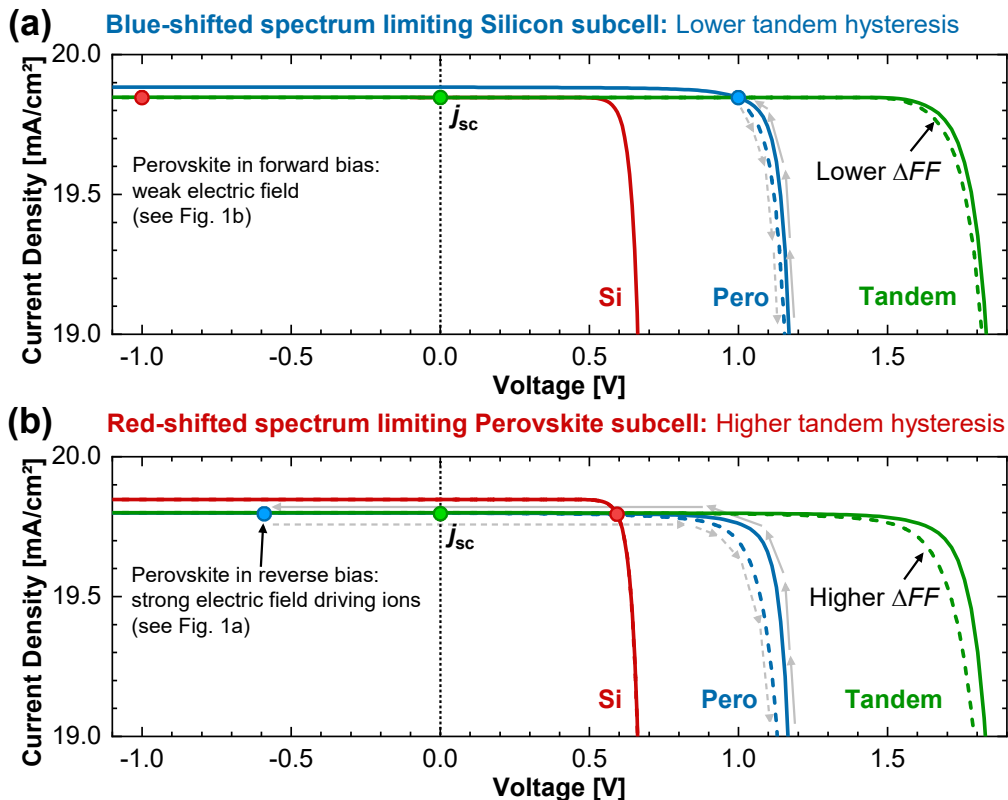


Abbildung 25: Darstellung des Einflusses eines JV-Scans für verschiedene strombegrenzende Bedingungen der Pero-Si-Tandemzelle, die bei AM1.5g stromangepasst ist. (a) JV-Scan der gesamten Tandemzelle (grün), der Perowskit-Teilzelle (blau) und der Silizium-Teilzelle (rot) für ein leicht blauverschobenes Spektrum, bei dem die Siliziumzelle den Gesamtstrom des Tandems begrenzt und während des JV-Scans eine dauerhafte Vorwärtsverstärkung der Perowskit-Zelle verursacht. (b) JV-Scan für ein leicht rotverschobenes Spektrum, bei dem die Perowskit-Teilzelle den Tandemstrom begrenzt und unter j_{sc} -Bedingungen der Gesamtzelle zu einer starken Rückwärtsspannung („reverse bias“) der Perowskit-Teilzelle führt.

Im Gegensatz dazu begrenzt in Abbildung 25b die Perowskit-Teilzelle den Gesamtstrom der Tandemzelle aufgrund eines leicht rotverschobenen Spektrums, was die Perowskit-Teilzelle dazu zwingt, am j_{sc} der Tandemzelle (grüner Punkt) zeitweise unter einer stark rückwärtsgerichteten (Teil-)Spannung (siehe blauer Punkt in Abbildung 25b) betrieben zu werden. Während des gesamten JV-Scans der Tandemzelle wird die Perowskit-Teilzelle daher mit Spannungen beginnend bei ihrem eigenen V_{oc} bis hinunter auf etwa -0,6 V (dies entspricht etwa dem negativen MPP-Wert der Silizium-Teilzelle) und zurück zu ihrem eignen V_{oc} betrieben. Die starke rückwärtige Spannung des Perowskit-Absorbers führt zu einem sehr starken elektrischen Feld, was dazu führt, dass die Ionen zu den Kontaktschichten getrieben werden, was die Selektivität des ETL (und auch des HTLs) verringert und zu einem niedrigeren Füllfaktor des Vorwärtsscan und damit zu einer höheren JV-Hysteresis führt. Dies ist ein relevanter Effekt bei Pero-Si-Tandemzellen, bei denen mobile Ionen die Leistung der Tandemzelle (transient) beeinflussen.

Simulation spektrometrischer Charakterisierungsmethoden für Perowskit-Silizium-Tandemzellen

Die aus dem vorherigen Unterabschnitt gewonnenen Erkenntnisse wurden tiefergehend untersucht, indem das opto-elektrische Simulationsmodell für die sogenannte spektrometrische Charakterisierung, gemäß Meusel *et al.*⁶ für Perowskit-Silizium-Tandemzellen, erweitert wurde. So konnte der Einfluss unterschiedlicher Stromanpassungssituationen einer

⁶ Meusel et al., Prog. Photovolt: Res. Appl, vol. 10, no. 4, 2002.

Perowskit-Silizium-Tandem-Solarzelle für unterschiedliche spektrale Beleuchtungsbedingungen und deren Auswirkungen auf die Ionenmigration untersucht werden. Bei der spektrometrischen Charakterisierung werden JV-Kurven für verschiedene spektrale Bedingungen aufgezeichnet.

Abbildung 26 zeigt die simulierten JV-Parameter als Funktion des spektralen Parameters $1+z$, wobei $1+z = 1$ auf ein Spektrum verweist, bei dem die optische Erzeugung in der oberen und unteren Teilzelle gleich der Erzeugung unter dem AM1.5g-Spektrum ist. Für $1+z < 1$ erhalten wir rotverschobene Spektren, bei denen die optische Generation im Perowskit-Absorber um den Faktor z im Vergleich zur AM1.5g-Bedingung reduziert ist, während die optische Generation im Silizium-Absorber um denselben Faktor erhöht wird. Entsprechend erhalten wir für $1+z > 1$ blauverschobene Spektren, bei denen die optische Generation in der Siliziumzelle um denselben Faktor reduziert ist, wie die optische Generation erhöht wird. Zur Berechnung haben wir die optischen Eigenschaften der Pero-Si-Tandem-Solarzelle, wie sie für diese Untersuchung basierend auf dem experimentellen Tandemzelle von Heydarian et al.⁷ verwendet wurde, berücksichtigt und etwa 400 Spektren für einen LED-basierten Sonnensimulator berechnet, der eine spektrale Variation von $0,8 \leq 1+z \leq 1,2$ abdeckt.

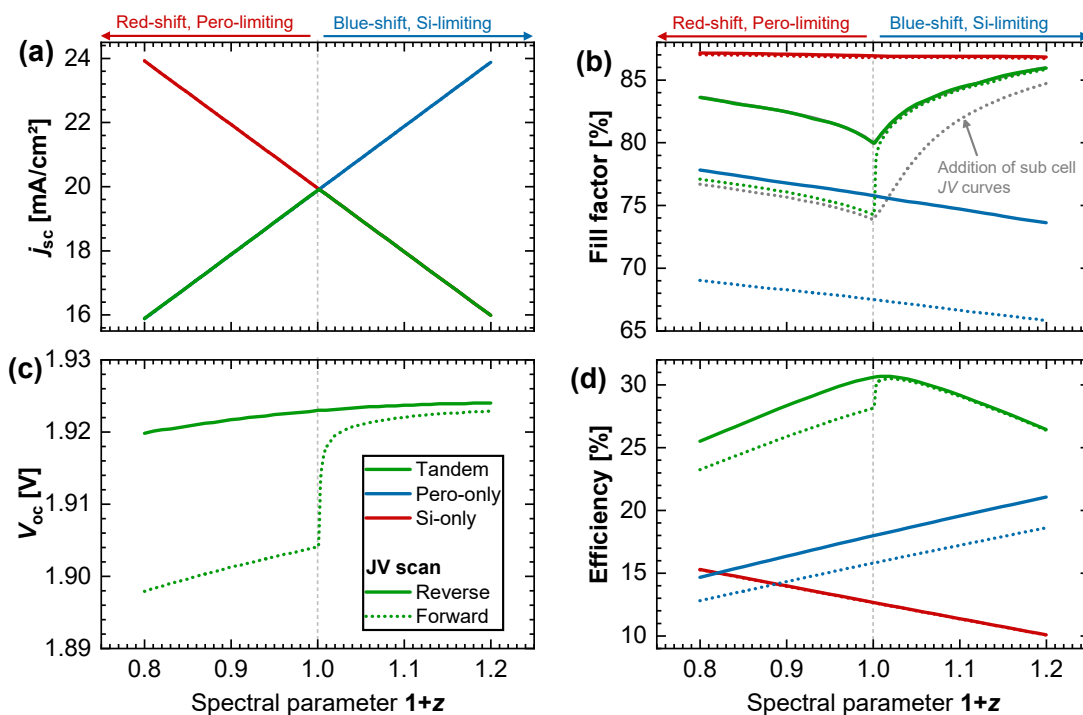


Abbildung 26: Simulation der spektrometrischen Charakterisierungsmethode, wie experimentell von Bett et al. untersucht. (a) Kurzschlussstromdichte j_{sc} (b) Füllfaktor FF (c) Leerlaufspannung V_{oc} und (d) Tandemeffizienz.

Abbildung 26a zeigt die resultierende Kurzschlussstromdichte j_{sc} basierend auf dem Simulationsmodell dieser Arbeit für alle berechneten Spektren. Dabei fällt auf, dass es einen typischen Punkt gibt, am sogenannten ‚current matching‘, an dem die Stromdichte für das Tandem-Device maximiert wird, in diesem Fall nahe bei $1+z=1$. Ein rotverschobenes Spektrum führt dabei zu einem linearen Abfall des Tandemstroms aufgrund des begrenzenden Stroms der Perowskit-Teilzelle. Umgekehrt führt das blauverschobene Spektrum zu einem linearen Abfall des Tandemstroms aufgrund des begrenzenden Stroms der Silizium-Teilzelle. Diese Beobachtung ist in Einklang mit experimentellen Untersuchungen und kann verwendet werden, um den Stromausgleichspunkt in Tandemzellen zu untersuchen. Im

⁷ Heydarian et al., Solar RRL, vol. 7, no. 7, 2023.

Simulationsmodell können wir auch die beiden Teilzellen als elektrisch unabhängig betrachten (aber immer noch unter derselben Beleuchtung), wie durch die blaue und rote Linie in Abbildung 26a für die Perowskit- und Silizium-Teilzelle gezeigt. In diesem Fall sehen wir einen linearen Anstieg der nicht begrenzenden Teilzellenstromdichte über den ‚current-matching‘ Punkt hinaus, wie erwartet.

Abbildung 26b zeigt den Füllfaktor der Silizium-Unterzelle, der Perowskit-Oberzelle und der gesamten Tandemzelle in Rot, Blau und Grün für den vor- und rückwärtigen JV-Scan, dargestellt als gestrichelte und durchgezogene Linien. Betrachten wir zunächst den FF der Silizium-Unterzelle, so sehen wir einen sehr hohen FF ohne Hysterese, der nahezu unabhängig vom spektralen Parameter ist. Für die Perowskit-Teilzelle sehen wir eine Abnahme des FF für blauverschobene Spektren, hauptsächlich aufgrund einer Zunahme der Stromdichte (und des V_{oc}). Darüber hinaus zeigt die Perowskit-Teilzelle eine Füllfaktor-Hysterese von etwa 9%, die nahezu unabhängig von $1+z$ ist. In Bezug auf den rückwärtigen FF der Tandemzelle beobachten wir einen minimalen FF bei ‚current matching‘, der für Mehrfachzellen bekannt ist und von einfachen JV-Kurvenadditionen abgeleitet werden kann. Beim Übergang zu rotverschobenen Spektren, bei denen die Perowskit-Teilzelle den Tandemstrom begrenzt, beobachten wir einen Anstieg des rückwärtigen FF, wie erwartet. Der Anstieg des rückwärtigen FF gegenüber den blauverschobenen Spektren, bei denen die Silizium-Teilzelle den Strom begrenzt, ist sogar höher, da die Tandemzelle von dem höheren FF der Silizium-Unterzelle profitiert.

Bei Betrachtung des FF aus dem Vorwärts-Scan der Tandemzelle in Abbildung 26b beobachten wir praktisch keine Hysterese im blauverschobenen Fall, während beim Annähern ans ‚current matching‘ eine sehr scharfe Zunahme der FF-Hysterese von etwa 0 auf rund 7%_{abs} innerhalb eines sehr engen spektralen Bereichs von nur $\Delta z = 0,01$ beobachtet wird. Dies ist überraschend, da wir anhand der Addition der Spannungen der entsprechenden Teilzellen-JV-Kurven (d.h. des roten und des blauen Falls) einen viel gleichmäßigeren und langsameren Rückgang der Hysterese in Richtung der von der Silizium-Unterzelle begrenzten Szenarien erwarten würden. Dieser Unterschied kann durch das Fallbeispiel des letzten Abschnitts erklärt werden: Für blauverschobene Spektren bleibt die Perowskit-Teilzelle während des gesamten JV-Scans in Vorwärtsspannung, was zu einer nahezu hysterese-freien JV-Messung führt. Für rotverschobene Spektren hingegen liegt die Perowskit-Teilzelle um den j_{sc} der Tandemzelle herum in starker Rückwärtsspannung, wodurch die Ionen zu den Kontakten wandern, was den nachfolgenden Vorwärts-FF verringert und die Hysterese erhöht. Der Grund für den sehr scharfen Übergang um den ‚current matching‘-Punkt herum liegt in der genauen Dicke des Perowskit-Absorbers innerhalb der Simulation (in diesem Fall: 450 nm). Bei realen Tandemzellen wird erwartet, dass die Dickenvariation der Perowskit-Schicht diesen scharfen Übergang ausgleicht. Die experimentelle Validierung wird im nächsten Abschnitt präsentiert.

Simulation spektrometrischer Charakterisierungsmethoden für Perowskit-Silizium-Tandemzellen

Basierend auf den Erkenntnissen des Simulationsmodells für die spektrometrische Charakterisierung von Perowskit-Silizium-Tandem-Solarzellen haben wir unsere Vorhersagen im Rahmen des KATANA Projektes an zwei verschiedenen experimentellen Zellen getestet, nämlich an einer hauseigenen Pero-Si-Tandemzelle (Abbildung 27a) und dem zuvor erwähnten Oxford PV Mini-Modul (Abbildung 27b).

Zunächst zeigt Abbildung 27a die Messungen an einer 0,25 cm² großen, hauseigenen Pero-Si-Tandem-Solarzelle mit einer Effizienz von rund 26% unter STC-Bedingungen, die am ISE unter einem LED-Solar-Simulator mit denselben spektralen Bedingungen wie im letzten Abschnitt gemessen wurde. Die normierte FF-Hysterese (d. h. $1-FF_{for}/FF_{rev}$ skaliert auf den höchsten Wert), die für diese experimentelle Tandemzelle als Funktion des spektralen Parameters $1+z$ für jedes Spektrum und für drei aufeinanderfolgende JV-Messungen (M1, M2, M3) gemessen wurde, wird als schwarze, rote und blaue gestrichelte Punkte dargestellt. Man kann sehen, dass die Hysterese für $1+z > 1,04$ nahezu null ist, während ein etwas linearer

Anstieg um den Stromanpassungspunkt bei $1+z \sim 1$ erfolgt, gefolgt von einem Plateau bei der maximalen Hysterese für $1+z < 0,95$.

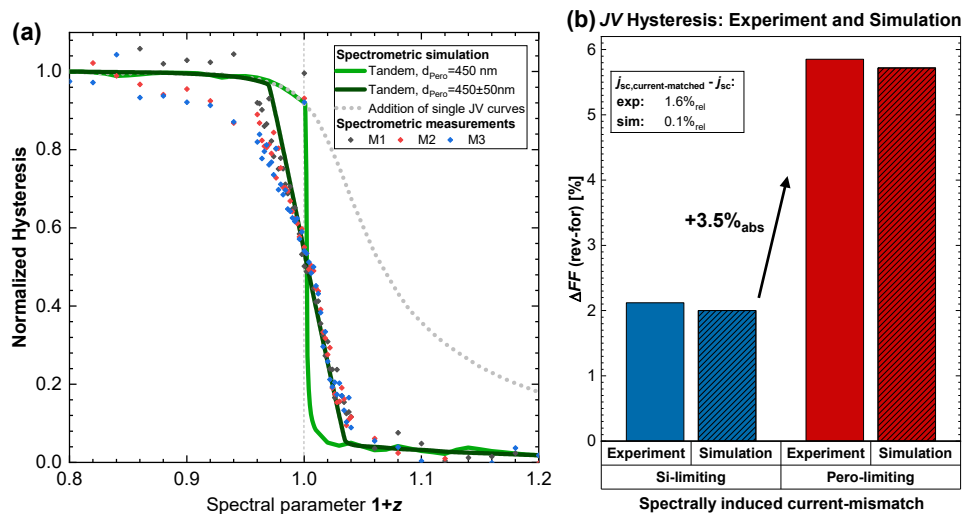


Abbildung 27: (a) Füllfaktor-Hysterese (normalisiert auf den maximalen Wert) der simulierten Tandemzelle mit einer Perowskit-Dicke von 450 nm, dargestellt in hellgrün, zeigt einen scharfen Anstieg der Hysterese um den Bereich des current matchings (gestrichelte Linie bei $1+z=1$) für eine Scan-Zeit von 5 s. Die dunkelgrüne Kurve zeigt die Füllfaktor-Hysterese für einen lateral inhomogenen Perowskit-Absorber mit 450 ± 50 nm, wobei ein flacherer Anstieg der Hysterese zu sehen ist. Die Punkte zeigen Messwerte aus der spektrometrischen Charakterisierungsmethode für eine hauseigene Pero-Si-Tandem-Teststruktur. Die gestrichelte graue Linie zeigt die erwartete Füllfaktor-Hysterese durch Addition der Einzel-JV-Kurven. (b) Unterschied zwischen Rückwärts- und Vorwärts-Füllfaktor für eine Pero-Si-Tandemzelle, jeweils bei geringfügiger Strombegrenzung durch die Silizium- oder Perowskit-Teilzelle ($\Delta z = \pm 0,025$), dargestellt in Blau und Rot, sowohl für experimentelle Messungen von Oxford PV Mini-Modulen (einfache Balken) als auch Simulationen (gestrichelte Balken). Ein geringfügig verändertes Spektrum, die die Bedingungen der strombegrenzenden Teilzelle ändert, führt hier zu einer um $3,5\%_{\text{abs}}$ höheren Hysterese.

Des Weiteren zeigt Abbildung 27a die simulierte Hysterese, die aus Abbildung 26b extrahiert wurde, als leichte grüne Kurve, die den sehr scharfen Übergang der Hysterese um den Stromanpassungspunkt zeigt. Um die inhomogene Dicke des Perowskit-Absorbers zu berücksichtigen, die sich gemäß SEM-Bildern ändert, haben wir eine lateral inhomogene Dicke zwischen 450 ± 50 nm angenommen und alle resultierenden verschobenen Hysteresekurven gemittelt, um die dunkelgrüne durchschnittliche Kurve in Abbildung 27a zu erhalten. Wir sehen einen qualitativ sehr ähnlichen Trend wie bei den experimentellen Messungen mit einem linearen Bereich von $0,96 < 1+z < 1,04$ (siehe dunkelgrüne Linie). Besonders möchten wir darauf hinweisen, dass die gemessene Hysterese für $1+z > 1,04$ verschwindet, was nicht durch die Addition einzelner JV-Kurven erklärt werden kann, wie durch die gestrichelte graue Linie (berechnet aus der Addition der JV-Kurven) gezeigt wird. Daher schlussfolgern wir, dass die positive Teilzellspannung des Perowskit-Absorbers und die entsprechende Ionenmigration eine wichtige Rolle bei der Messung von JV-Kurven von Perowskit-Silizium-Tandem-Solarzellen spielen.

Wir zeigen weiterhin, dass dieser grundlegende Effekt aufgrund der Ionenmigration auch in industrieüblichen hochmodernen Pero-Si-Tandemvorrichtungen vorhanden ist. Abbildung 27b zeigt die gemessene FF-Hysterese der Mini-Module des KATANA-Projektpartners Oxford PV für ein Spektrum, das um $\pm 0,025$ über den Stromanpassungspunkt der Tandemzelle rot- und blauverschoben ist, sowie die simulierte FF-Hysterese. Man kann sehen, dass sowohl Simulation als auch Experiment eine FF-Differenz von etwa $3,5\%_{\text{abs}}$ ergeben, auch hier aufgrund der unterschiedlichen positiven bzw. negativen vorliegenden Teilzellspannung der

Perowskizelle (auch hier spielt der Effekt, der durch die einfache Addition von JV-Kurven kommt, eine untergeordnete Rolle, da die spektralen Änderungen gering sind). Es konnte demnach im Rahmen des Projektes sehr eindrücklich gezeigt werden, wie die Hysterese aufgrund von Ionenmigration innerhalb von Tandemzellen sehr stark von der stromlimitierenden Teilzelle abhängt.

Mit der Berücksichtigung von inhomogenen Ionenverteilung und lateraler Dickenvariationen bei industrierelevanten Tandemzellen, die nahe des Current-matching betrieben werden, können bisher fehlende Inhomogenitäten und deren Einfluss auf JV-Messungen quantifiziert werden, so dass Meilenstein 3.4 erfüllt werden konnte.

Strom-Spannungskennlinien mit Ion-Quenching für Verlustanalysen

Im Rahmen des KATANA Projektes und mithilfe des entwickelten opto-elektrischen Simulationsmodell in TCAD wurde deutlich, wie entscheidend die Vorkonditionierung und die Messroutine selbst die Charakteristik der Strom-Spannungskennlinie von Perowskit-Silizium-Tandemzellen beeinflusst. Diese Erkenntnisse und das Modell selbst wurden im Rahmen des PRESTO Projektes für eine umfassende Verlustanalyse einer am Fraunhofer ISE entwickelten Perowskit-Silizium-Tandemzelle verwendet, die volltexturiert mit dem sogenannten ‚Hybrid‘-Verfahren hergestellt wurde. Die Verlustanalyse selbst wird im Rahmen des PRESTO Projektberichtes genauer beschrieben. Bezüglich der Inhalte des KATANA Projektes war es jedoch von großer Bedeutung, eine Messroutine zu entwickeln, in der die Verteilung der Ionen durch die Vorkonditionierung günstig beeinflusst wird und somit die Strom-Spannungskennlinie zwischen Simulation und Experiment vergleichbar.

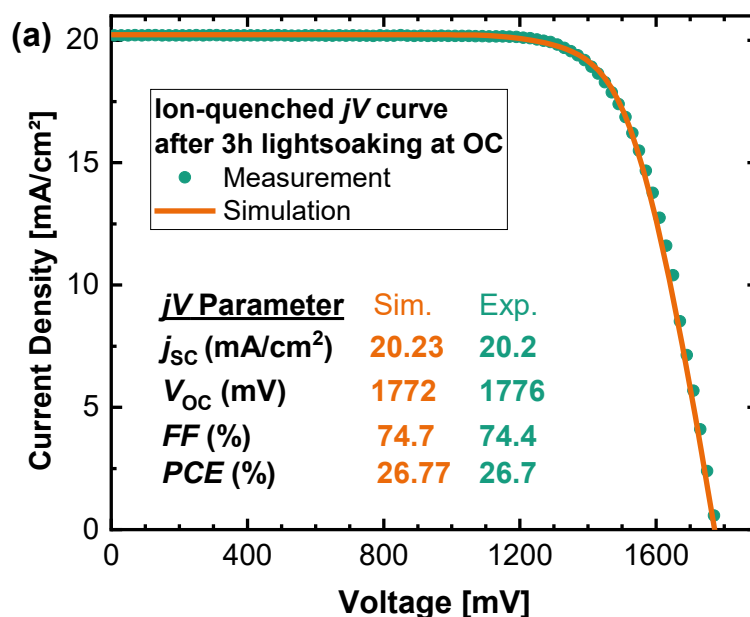


Abbildung 28: ‚Ion-quenched‘ jV-Kurve nach Vorkonditionierung von 3 Stunden unter einer Sonne und Leerlaufbedingung sowohl für die gemessene (grüne Punkte) als auch die simulierte (orange Linie) Perowskit-Silizium-Tandemzelle, welche eine sehr gute Übereinstimmung des opto-elektrischen Modells mit der experimentellen Zelle zeigt. Insbesondere die korrekte Messweise und Vorkonditionierung sind bei diesem Zelltyp entscheidend für eine korrekte Interpretation der JV Kennlinie.

Abbildung 28a zeigt die "ion-quenched jV-Kurven" sowohl für die Simulation (orangefarbene Linie) als auch für das Experiment (grüne Punkte). Eine Vorkonditionierung von 3 Stunden unter Beleuchtung bei 1 Sonne und Leerlaufbedingungen wurde sowohl in der Simulation als auch im Experiment durchgeführt. Anschließend wurde die experimentelle jV-Kurve ermittelt, indem zwischen jedem Messpunkt (in grünen Punkten dargestellt) und den Leerlaufbedingungen (OC) hin und her gesprungen wurde. Die Haltezeit bei Leerlaufbedingungen ist deutlich länger als bei den Messpunkten, daher ist zu erwarten, dass

die Ionen quasi am OC gehalten werden. In der Simulation wurde das Ionendämpfen effektiv erreicht, indem eine kurze Scangeschwindigkeit von 5 s verwendet wurde, die zu niedrig ist, um die Ionen zu bewegen, sodass die Verteilung der Ionen weiterhin der Verteilung bei Offenklammspannung entspricht. Es sei erwähnt, dass aufgrund der hohen Ionenkonzentration von $6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ die Tandemzelle (sowohl in der Simulation als auch im Experiment) signifikante FF-Hysterese zeigt, wenn "Standard"-jV-Scans in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung durchgeführt werden. Für die im Rahmen des PRESTO Projektes durchgeführte Verlustanalyse war es jedoch entscheidend, die Verluste nicht anhand „Standard“-jV-Scans zu analysieren, sondern stattdessen die "ion-quenched jV-Kurven" zu benutzen, da für diese die Anionen- (Kationen-) Konzentration an der ETL- (HTL-) Grenzfläche vergleichbar mit dem Betrieb erwartet wird. (Dabei entspricht der Rückwärts-jV-Scan fast der ionengedämpften jV-Kurve, wenn die Scangeschwindigkeit ausreichend hoch ist, z.B. kleiner als 90 Sekunden.) Man kann sehen, dass aufgrund der sinnvoll gewählten Vorkonditionierung und Messroutine die simulierte jV-Kurve die experimentellen Daten sehr gut beschreibt und insbesondere die korrekte Messweise und Vorkonditionierung sind bei diesem Zelltyp entscheidend für eine korrekte Interpretation der jV Kennlinie waren.

Arbeitspaketübergreifende Ergebnisse

Inhomogenitäten von Kontakteigenschaften an Zwischenschichten von Perowskit-Silizium Tandem Solarzellen mithilfe von Lumineszenz Imaging, Lock-In Thermographie und 2D/3D Simulationen

Eine Kombination von Quokka-Simulationen von ISE-Seite, sowie Sentaurus-TCAD-Simulationen und Thermographie-, sowie Lumineszenzmessungen von Uni-Seite mündete in eine Veröffentlichung zur lokalen Kontaktanalyse an der Perowskit-Teilzelle. Konkret wurde mithilfe von Quokka 3 Simulationen (siehe näheres dazu im ISE-Katana-Projektbericht) und Sentaurus TCAD Simulationen untersucht, wie sich ein lokal veränderter Serienwiderstand, eine lokal erhöhte nicht-strahlende Rekombinationsrate und eine Energiebarriere am selektiven Kontakt zum Perowskit auswirken. Die Ergebnisse wurden mit EL- und PL-Messungen verglichen, welche in Abbildung 29 dargestellt sind. Markante Stellen sind beispielhaft markiert. Der Verschattungseffekt des Lumineszenzsignals durch Finger und das durch Kurzschlüsse verminderte Signal in EL- und PL-Messung sind in den Bereichen F und S1/S2 erkennbar. Die lokale Änderung der Kontakteigenschaften zeigt sich in Bereich C, wo die EL und PL-Bilder einen gegenläufigen Trend aufzeigen. Um sicherzustellen, dass der beobachtete Effekt auf eine Kontakteigenschaft zurückzuführen ist und nicht etwa durch einen Kurzschluss in der anderen Teilzelle, wurden EL Messungen an der Silizium-Teilzelle (siehe Abbildung 30) und ILIT-Messungen an beiden Teilzellen (siehe Abbildung 31) durchgeführt.

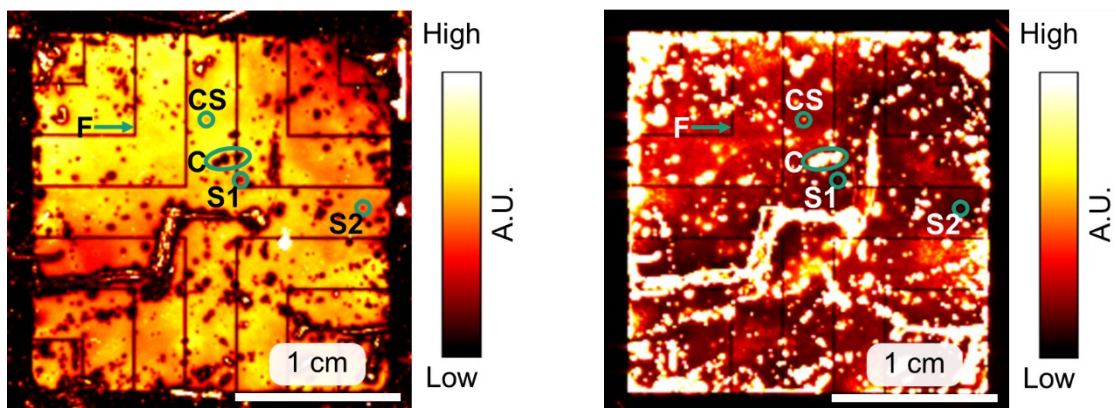


Abbildung 29a EL-Signal

Abbildung 29b) PL-Signal

Abbildung 29 Lumineszenzsignal der Perowskitteilzelle (siehe auch ISE-Katana-Projektbericht). Markante Stellen wie die Verschattung durch Finger, lokale Zellkurzschlüsse und eine Variation der Kontakteigenschaften sind markiert.

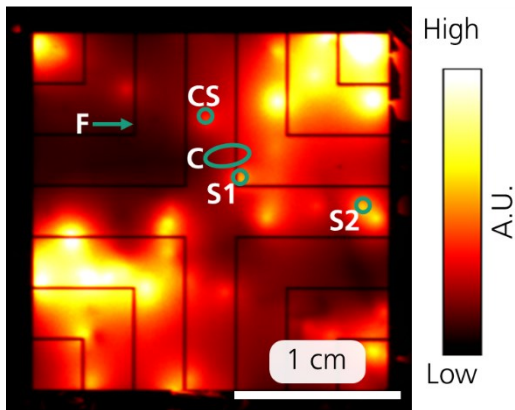


Abbildung 30 EL Signal der Siliziumteilzelle. Das Signal in den Bereichen S1 und S2 ist erhöht, da eine höhere Spannung über der Siliziumzelle aufgrund des Kurzschlusses in der Perowskitteilzelle abfällt. In Bereich C ist dieser Effekt nicht zu beobachten. Das Signal in Bereich C ist homogen und auch nicht bedeutend verringert gegenüber anderen Zellbereichen, was einen Kurzschluss in der Siliziumteilzelle ausschließt.

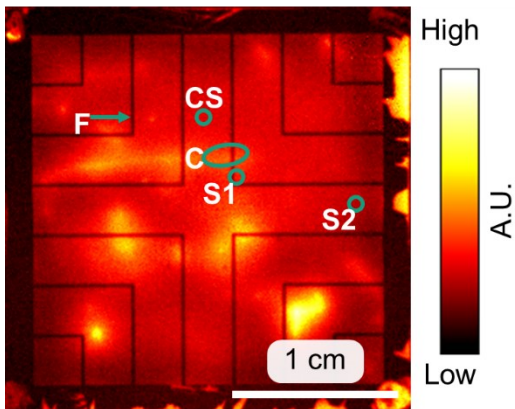


Abbildung 31 Siliziumteilzelle

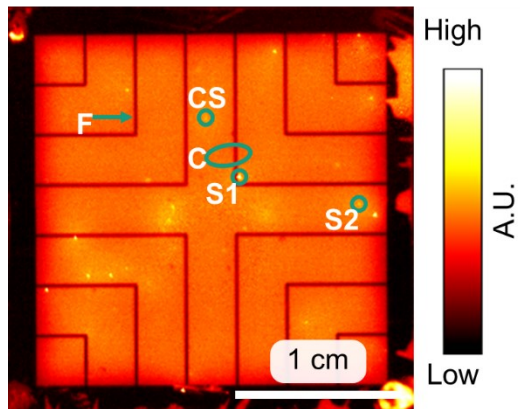


Abbildung 31b) Perowskitteilzelle

Abbildung 31 ILIT Messung an beiden Teilzellen der Perowkit-Silizium Tandemsolarzelle. Bereiche mit Kurzschlüssen und besonders stark erhöhter, nicht strahlender Rekombination sind gut erkennbar. Bereich C ist hier jedoch unauffällig.

Zu den oben beschriebenen EL-, PL- und ILIT-Messungen wurden umfangreiche Simulationen durchgeführt. Die Quokka 3 Simulationen wurden vom Fraunhofer ISE durchgeführt und in dem entsprechenden Projektbericht beschrieben. Zusätzlich wurden Sentaurus TCAD Simulationen an der Universität Freiburg durchgeführt. Für Sentaurus TCAD wurde ein zweidimensionaler Querschnitt eines Tandems gewählt, wobei für 0.2 mm des insgesamt 4 mm großen Simulationsbereiches eine Energiebarriere von $\Delta E_{C,spot}^{ETL} = 0$ eV angenommen wurde und für den Rest des Bereiches $\Delta E_{C,spot}^{ETL} = 0.5$ eV. Abbildung 32 zeigt die Simulationsbereiche in Quokka3 und Sentaurus TCAD.

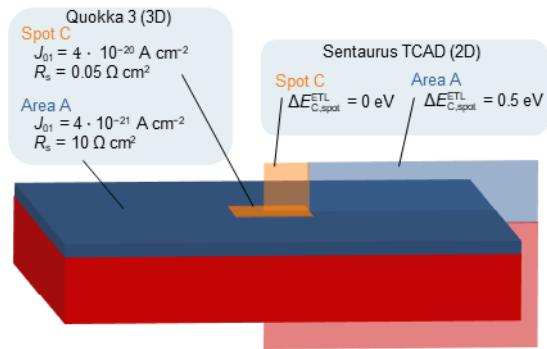


Abbildung 32 Die Simulationsbereiche der Quokka 3 Simulation (vgl. Fraunhofer ISE Projektbericht) und der Sentaurus TCAD Simulation.

Anschließend wurden drei verschiedene Fälle simuliert, wie in Abbildung 33 dargestellt. Abbildung 33a zeigt die Banddiagramme für den PL-Fall in den Bereichen Spot C (orange) und Area A (blau) separat, d.h. für den Fall, in dem die zwei Bereiche lateral nicht verbunden sind. Man kann sehen, dass die interne Aufspaltung der Quasi-Fermi-Niveaus für beide Bereiche gleich hoch ist (siehe gepunktete Pfeile), sodass das PL-Signal in diesem Fall gleich groß wäre. Die extern abgreifbare Spannung V_{oc} ist jedoch verschieden: Der ungünstige Energieoffset $\Delta E_{C,area}^{ETL} = 0.5 \text{ eV}$ im Gebiet A sorgt für eine nicht-ideale Ladungsträgerextraktion, sodass die externe Spannung V_{oc} deutlich kleiner ist als die interne Spannung iV_{oc} . Für den Spot C mit dem verringerten Energieoffset steigt die Selektivität des Kontaktes, sodass $V_{oc} = iV_{oc}$.

Da nun im Device die beiden Bereiche lateral miteinander über die Vorderseitenelektrode elektrisch miteinander kontaktiert sind, entsteht nun der Fall wie in Abbildung 33b dargestellt. Durch die laterale Kontaktierung der beiden Bereiche ist die äußere Spannung V_{oc} nun gleich für Area A und Spot C. Durch den größeren Flächenanteil von Gebiet A gegenüber Spot C wird die Spannung auf das Niveau der Fläche abgesenkt. Da die Selektivität und damit der Spannungsabfall am Kontakt in beiden Bereichen gleichbleibt, sehen wir nun ein verringertes PL-Signal im Spot C gegenüber der Fläche A, welcher dann als dunkler Fleck messbar ist, wie in AP 3.3. experimentell beobachtet.

Abbildung 33c zeigt nun die lokalen Banddiagramme für den EL Fall, in den lateral miteinander verbundenen Bereichen. Hier ist die äußere Spannung gleich, wohingegen durch die verringerte Leitfähigkeit im Gebiet A aufgrund des Energieoffsets nun ein Spannungsabfall $\Delta V_{oc,area}$ auftritt, der das EL Signal gegenüber dem Spot C verringert. Hier erscheint also der Spot C im EL Signal als heller Punkt gegenüber der Fläche, wie in AP 3.3. experimentell beobachtet.

Somit ist die Vermutung, dass die laterale Inhomogenität des Perowskit-Absorbers von einer Inhomogenität der Energiebarriere am Pero/ETL Kontakt herrühren könnte, plausibel und deckt sich mit allen Messergebnissen. Auch das geringe ILIT-Signal deckt sich mit diesem Erklärungsansatz, da hier die Spannungs- und damit Leistungsverluste im Gebiet A (und nicht, wie in anderen Fällen im Spot C) auftreten, und schwerer zu detektieren sind.

Dieses Beispiel zeigt, wie eine umfassende Charakterisierung zusammen mit detaillierten Simulationsmodellen zur Untersuchung verschiedener Erklärungsansätze für Leistungsverluste und Inhomogenitäten in Tandemzellen genutzt werden kann und größere Aussagekraft hat als die jeweiligen Einzelergebnisse.

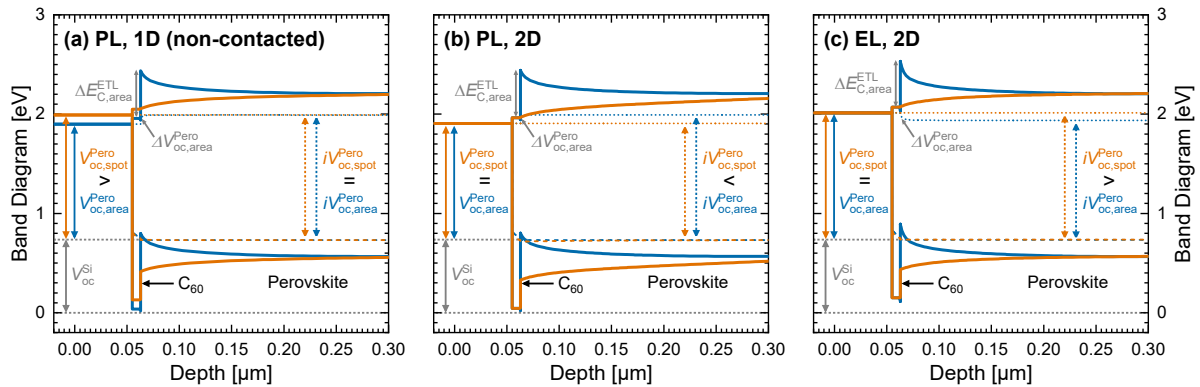


Abbildung 33 Ergebnisse der Sentaurus TCAD Simulation zu einer lokal niedrigeren Energiebarriere $\Delta E_{C,spot}^{ETL}$.

II.2 Erfolge oder geplante Veröffentlichungen

Teile der oben genannten Ergebnisse flossen in die folgenden Journal- und Konferenz-Veröffentlichungen ein:

1. Alexander J. Bett, David Chojniak, Michael Schachtner, S. Kasimir Reichmuth, Özde Ş. Kabaklı, Patricia S. C. Schulze, Oliver Fischer, Florian Schindler, Jochen Hohl-Ebinger, Gerald Siefer, and Martin C. Schubert, Spectrometric Characterization of Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells doi: 10.1002/solr.202200948
2. Christoph Messmer, Jonas Schön, Uli Würfel, Patricia S. C. Schulze, Martin C. Schubert, Martin Bivour, Stefan W. Glunz, Martin Hermle, „Efficient Charge Carrier Extraction in Perovskite-Silicon Tandem Solar Cells Investigated by Numerical Simulation”, 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-8), 2022, doi: 10.4229/WCPEC-82022-2BV.2.40
3. S. K. Reichmuth, A. Fell, G. Siefer, M. Schachtner, D. Chojniak, O. Fischer, M. Mühleis, M. Rauer, J. Hohl-Ebinger, M. C. Schubert, "Impact of lateral effects on the EQE measurements of large scale tandem solar cells," in 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2022, pp. 222–226. [Online]. Available: DOI: 10.4229/WCPEC-82022-2AO.1.6
4. Andreas Fell, Oliver Schultz-Wittmann, Christoph Messmer, Martin C. Schubert, Stefan W. Glunz, “Combining Drift-Diffusion and Equivalent-Circuit Models for Efficient 3D Tandem Solar Cell Simulations”, IEEE Journal of Photovoltaics (Volume: 12, Issue: 6, November 2022), doi: 10.1109/JPHOTOV.2022.3209608
5. Christoph Messmer, David Chojniak, Alexander J. Bett, S. Kasimir Reichmuth, Jochen Hohl-Ebinger, Martin Bivour, Martin Hermle, Jonas Schön, Martin C. Schubert, and Stefan W. Glunz, “Toward more reliable measurement procedures of perovskite-silicon tandem solar cells: The role of transient device effects and measurement conditions”,
 - Journal Publication: Prog. Photovolt. Res. Appl. 2024; 1-17. doi:10.1002/pip.3782
 - Presented at the EU PVSEC, Lisbon, 2023.
6. Oussama Er-raji, Christoph Messmer, Alexander J. Bett, Oliver Fischer, S. Kasimir Reichmuth, Florian Schindler, Martin Bivour, Oliver Schultz-Wittmann, Juliane Borchert, Martin Hermle, Jonas Schön, Friedemann D. Heinz, Martin C. Schubert, Patricia S.C. Schulze, Stefan W. Glunz, “Loss Analysis of Fully-Textured Perovskite Silicon Tandem Solar Cells: Characterization Methods and Simulation toward the

Practical Efficiency Potential”, Solar RRL (Volume: 7, Issue: 24, December 2023), doi: 10.1002/solr.202300659

7. Oliver Fischer, Anh Dinh Bui, Florian Schindler, Daniel Macdonald, Stefan W. Glunz, Hieu T. Nguyen, and Martin C. Schubert, “Versatile Implied Open-Circuit Voltage Imaging Method and its Application in Monolithic Tandem Solar Cells”
 - Journal Publication: Prog. Photovolt. Res. Appl. 2023; doi: 10.1002/pip.3754
 - Presented at the EU PVSEC, Lisbon, 2023, **Winner of the Student Award**.
8. Oliver Fischer, Andreas Fell, Christoph Messmer, Raphael Efinger, Florian Schindler, Stefan W. Glunz, and Martin C. Schubert, “Understanding Contact Nonuniformities at Interfaces in Perovskite Silicon Tandem Solar Cells Using Luminescence Imaging, Lock-In Thermography, and 2D/3D Simulations”, Solar RRL (Volume: 7, Issue: 19, October 2023), doi: 10.1002/solr.202300249