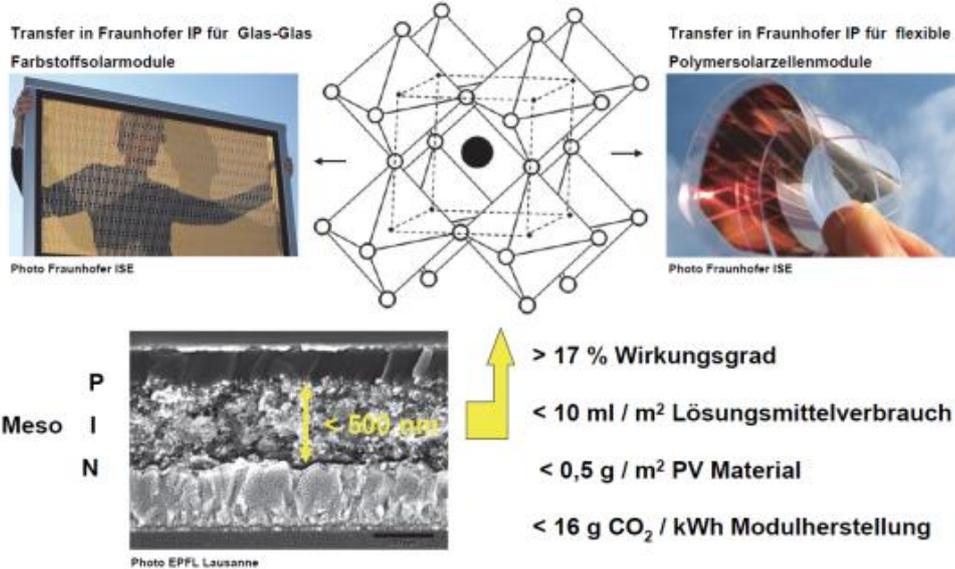


Hocheffiziente gedruckte (> 17%) Perowskit Solarzellen “Meso-PIN”

Top-aktuelle Materialentwicklung für eine ressourcenschonende, lokal produzierbare Photovoltaik



Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE (Koordinator)	Förderkennzeichen: 03SF0484A  Bundesministerium für Bildung und Forschung
Vorhabensbezeichnung: Hocheffiziente gedruckte (>17%) Perowskit Solarzellen, Top-aktuelle Materialentwicklung für eine ressourcenschonende, lokal produzierbare Photovoltaik	
Laufzeit des Vorhabens: 01. 09. 2014 – 30. 04. 2018	
Berichtszeitraum: 01. 09. 2014 – 30. 4. 2018	

Dr. Andreas Hirsch, Fraunhofer ISE

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

Inhalt

1	<i>Gesamtziel des Vorhabens / Zusammenfassung</i>	2
1.1	Zusammenfassung	2
1.2	Vorstellung des Verbundvorhabens	2
1.2.1	Einleitung	2
1.2.2	Inhaltlicher Ablauf	3
1.2.3	Organisatorischer Ablauf	3
2	<i>Wissenschaftlich-technische Ergebnisse</i>	5
2.1	Photophysikalische Untersuchungen	5
2.1.1	Photolumineszenzeigenschaften individueller Perokristalle (AP 2)	5
2.1.2	Korrelation zwischen Kristallisation und Photostrom (AP 5)	6
2.1.3	Korrelation zwischen Photolumineszenz und Ladungstransport in Perowskitsolarzellen (AP 3)	7
2.2	Optimierung der Kristallisation in der Photo-Absorberschicht	7
2.2.1	Kristallisation aus Perowskitschmelze bei Raumtemperatur (AP 2)	8
2.2.2	PL-Mikroskopie des Kristallisationsvorganges (AP 3)	8
2.3	Entwicklung ladungsträgerselektiver Kontaktschichten	9
2.3.1	Anorganische p-leitende Kontaktmaterialien (AP 1.2)	9
2.3.2	Anorganische n-leitende Kontaktmaterialien (AP 1.2)	10
2.3.3	Vermeidung von Kurzschlüssen / Shunts (AP 5)	10
2.4	Optimierung von hoch-effizienten Perowskitsolarzellen	11
2.4.1	Perowskitsolarzellen mit Graphitelektrode (AP 4)	11
2.4.1.1	Zertifizierte Wirkungsgrade (AP 3)	11
2.4.1.2	Transientenverhalten (AP 5)	12
2.4.1.3	Strukturelle Untersuchungen (AP 2)	13
2.5	Entwicklung von aufskalierbaren Perowskitsolarzellen	13
2.5.1	Entwicklung von druckbaren glasversiegelten in-situ Perowskitsolarzellen (AP 6)	13
2.5.1.1	Zertifizierte Wirkungsgrade (AP 3)	14
2.6	Messung und Zertifizierung des Wirkungsgrades (AP 3)	15
2.7	Beurteilung der industriellen Herstellbarkeit	15
2.7.1	Siebdruck von in-situ Perowskitsolarmodulen (AP 6)	15
2.7.2	Produktionsszenario in-situ Perowskitsolarmodule (AP 6)	16
2.7.3	Zukünftige dezentrale Produktion von Perowskitsolarmodulen (AP 6)	17
3	<i>Relevante FE-Ergebnisse von dritter Seite</i>	18
3.1.1	Vergleichbare Arbeiten anderer	18
3.1.2	Aktueller Forschungstrend Perowskitsolarzellen	18
4	<i>Bewertung der Projektergebnisse im Vergleich zur Planung</i>	19
5	<i>Fortschreibung des Verwertungsplans</i>	20
5.1	Publikationen	20
5.2	Konferenzbeiträge	20
5.3	Pressemitteilung	23

1 Gesamtziel des Vorhabens / Zusammenfassung

1.1 Zusammenfassung

Ziel des Projektes war es, auf das sich seit 2013 rasant entwickelnde Forschungsgebiet der Perowskitsolarzellen zu reagieren und ein entsprechendes Wissen aufzubauen. Im Projekt wurde die ganze Bandbreite von fundamentalen Fragen der Funktionsweise und der Materialentwicklung, bis hin zu aufskalierbaren Zell- und Herstellungskonzepten angesprochen und bearbeitet. Hierbei gelang es wesentliche Fortschritte zu erzielen und an den Stand der aktuellen internationalen Forschung und Entwicklung von Perowskitsolarzellen anzuknüpfen. Dies zeigt sich unter anderem an der aus dem Projekt heraus getätigten hohen Anzahl an Veröffentlichungen in renommierten Zeitschriften und an den zahlreichen Konferenzbeiträgen. Ebenso gelang es, basierend auf den Projektergebnissen eigenständige Lösungen für Zell- und Modulkonzepte zu entwickeln und in einer entsprechenden Pressemitteilung der Öffentlichkeit vorzustellen. Hierbei wird insbesondere auf das gegenüber bestehenden Solartechnologien sehr hohe Einsparpotential für den mit der Herstellung von Solarmodulen verbundenen Ausstoß von Kohlendioxid hingewiesen. Weiterhin lieferte das Projekt wichtige Erkenntnisse zur zertifizierten Messung von stabilisierten solaren Wirkungsgraden und zur späteren Qualitätskontrolle. Ein wichtiger laufender Forschungsaspekt für die spätere Kommerzialisierung, der Ersatz von Bleiverbindungen, wurde im Projekt durch die Synthese und Charakterisierung neuer Perowskitmaterialien ebenfalls behandelt.

Die Anschlussfähigkeit des Projektes konnte in weiterführenden Forschungsprojekten und Forschungsanträgen gezeigt werden. Dies betrifft nicht nur das Gebiet der Perowskitsolarzellen sondern auch das verwandte Anwendungsgebiet der Sensoren.

1.2 Vorstellung des Verbundvorhabens

1.2.1 Einleitung

In den letzten Jahren sind die Kosten von Photovoltaik stark gefallen. Dies wurde ermöglicht durch den schnellen Ausbau an Produktionskapazitäten von bestehenden Technologien. Durch die Fokussierung auf die Kosten wurde bisher relativ wenig Wert auf den Aspekt der Nachhaltigkeit gelegt. So gibt es u.a. noch Verbesserungspotential beim Energie- und Rohstoffverbrauch. Hierzu müssen Materialien und Konzepte entwickelt werden, die mittel- bis längerfristig Alternativen bieten könnten. Forschungsarbeiten die zukünftig eine möglichst ressourcenschonende, lokal produzierbare Photovoltaik ermöglichen, sind daher sehr gut motivierbar. In dem vorliegenden Projekt wurde aus diesem Grund das top-aktuelle Thema der Perowskit Solarzellen aufgegriffen und die Materialien unter dem Gesichtspunkt zukünftiger Produktionskonzepte weiterentwickelt.

Nachdem in 2013 quasi aus dem Stand ein zertifizierter Laborwirkungsgrad von 14.3% für aus der Lösung aufgebrachte Festkörper-Perowskit Solarzellen gezeigt wurde, erfährt dieses Konzept ein starkes weltweites Forschungsinteresse. Der aktuelle Labor-Wirkungsgrad (23.2% in 2018) liegt bereits jetzt über dem von sehr guten Dünnschichtsolarzellen. Eine weitere Steigerung ist mit zunehmendem Verständnis der zugrundeliegenden photovoltaischen Prinzipien zu erwarten.

Das wesentliche Ziel des vorliegenden Projektes war es, das Know-How auf diesem neuen

Gebiet in Deutschland möglichst effektiv aufzubauen und zu verbessern. Zu diesem Zweck wurden Projektpartner mit nachweislich großer Erfahrung in den nah verwandten Gebieten der organisch- und nanobasierten Photovoltaik und dem Physikverständnis von Solarzellen sowie Projektpartner mit langjähriger Erfahrung in der Entwicklung von Lochleitern und Perowskiten zusammengebracht.

Als erster Schritt zur Sicherung von IP wurde im August 2013 durch das Fraunhofer ISE ein besonders gut aufskalierbares Zellkonzept für Perowskit Solarzellen zum Patent angemeldet bei dem keine Vakuumprozesse und keine hohen Investitionen erforderlich sind. 2018 wurde hierfür das Patent in China erteilt. Das Projekt profitierte von zeitgleich laufenden Forschungsk Kooperationen der Partner auf EU-Ebene und wurde exemplarisch von Firmen aus der Solar- und Anlagenbranche mit eigenen Entwicklungsbeiträgen unterstützt.

1.2.2 Inhaltlicher Ablauf

Die im Projekt geplante und umgesetzte inhaltliche Ausführung der Arbeiten sei im Folgenden kurz erläutert:

In einer ersten Phase sollten Materialien und Herstellungsmethoden für den Referenzaufbau Glas/SnO₂:F/TiO₂/nc-TiO₂+CH₃NH₃PbI₃/spiro-OMeTAD/Au etabliert werden. Parallel hiermit sollten alternative Perowskite durch Variation der Größe der Kationen und Anionen sowie aus verschiedenen Metallsalzen hergestellt und entsprechende Beschichtungslösungen optimiert werden. Begleitend sollten Strukturuntersuchungen zur homogenen Kristall- und Schichtbildung durch Vergleich mit früherer Literatur durchgeführt werden. Zur Variation der Austrittsarbeit der p-Schicht sollten wie oben beschrieben Polymere in Lösungen sowie anorganische p-Leiter wie mikronisierter Graphit hergestellt werden. Spezifische photo-physikalische Charakterisierungsmethoden für das Perowskitmaterial sollten etabliert werden.

In einer zweiten Phase sollten aufskalierbare Konzepte für standardisierte Solar-Testzellen sowohl auf Glas als auch auf Foliensubstraten umgesetzt und ein Materialscreening durchgeführt werden. Eine detaillierte theoretische und experimentelle Verlustanalyse der Testzellen in Analogie zur Vorgehensweise bei anderen Hocheffizienz zellen sollte ausgeführt werden. Beruhend hierauf wurde mit den optimierten Materialien und Zellparametern der Nachweis von > 17% effizienten Championzellen angestrebt.

In einer dritten Phase sollte die Übertragbarkeit der Methoden in im Technikum realisierbaren Herstellungsverfahren untersucht werden. Hierbei sollten erste Modulkonzepte in glaslot-versiegeltem Architekturglas (in-situ) und auf transparenten Barrierefolien realisiert und in Analogie zu bestehenden Methoden der Farbstoff und polymeren Solarzellen umgesetzt werden. Erste Prototypen sollten hergestellt und bewertet werden. Während der kompletten Laufzeit fanden experimentelle Workshops und der Austausch von Projektmitarbeitern statt.

1.2.3 Organisatorischer Ablauf

Der organisatorische Ablauf des Gesamtprojektes war wie in Abbildung 1 dargestellt in sechs Arbeitspakete gegliedert.

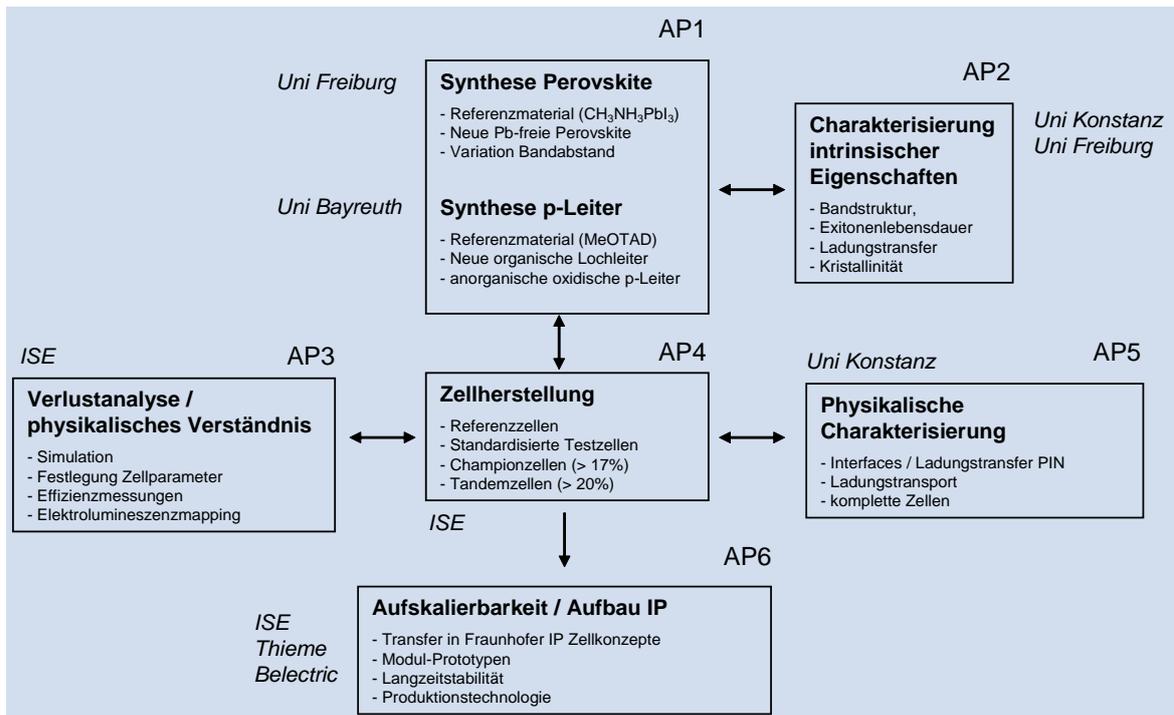


Abbildung 1: Übersicht der Arbeitspakete und des Projektablaufs

Neben den periodischen Projekttreffen wurden im Projekt zum Abgleich der experimentellen Arbeiten drei über mehrere Tage abgehaltenen Workshops erfolgreich durchgeführt (s. Abbildung 2).



Abbildung 2: Impressionen zu einem in Rahmen von MesoPIN abgehaltenen Workshop zum Erfahrungsaustausch und zum Abgleich der Herstellungsmethoden für Perovskitsolarzellen im Labor.

2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Im Folgenden werden die wesentlichen Projektergebnisse des Fraunhofer ISE in ihrem inhaltlichen Zusammenhang dargestellt.

2.1 Photophysikalische Untersuchungen

2.1.1 Photolumineszenzeigenschaften individueller Perokristalle (AP 2)

Zur Beurteilung der Qualität eines neuen Absorbermaterials ist die Messung der Photolumineszenz, also der Rate an strahlenden Rekombinationen ausschlaggebend. Am Fraunhofer ISE wurden daher im Projekt auch Arbeiten zur räumlich verteilten Photolumineszenz der Perowskitschicht durchgeführt. Hierbei ist es gelungen Submikron-aufgelöste Photolumineszenzbilder (μ -PL) der Kristallite im direkten Vergleich mit mikroskopischen REM Daten zu erhalten (Abbildung 3). Dies ist in den weiterführenden Arbeiten zum Verständnis und der Kontrolle der Kristallbildungen wichtig.

Es fällt auf, dass kleinere Kristallite eine höhere PL und eine Verschiebung der Peakemission hin zu höheren Energien (kleineren Wellenlängen) aufweisen. Dieser Effekt ist auch aus der Forschung an Halbleiter Quantumdots bekannt und kann u.a. dahin interpretiert werden, dass in isolierten Kristallen die absolute Zahl an nicht-strahlenden Rekombinationsstellen mit dem Volumen der Kristalle abnimmt. Hierbei ist zusätzlich zu beachten, dass die Intensität der μ PL nicht nur von der Kristallgröße abhängt, sondern zusätzlich auch von der Passivierung an der Oberfläche beeinflusst werden kann.

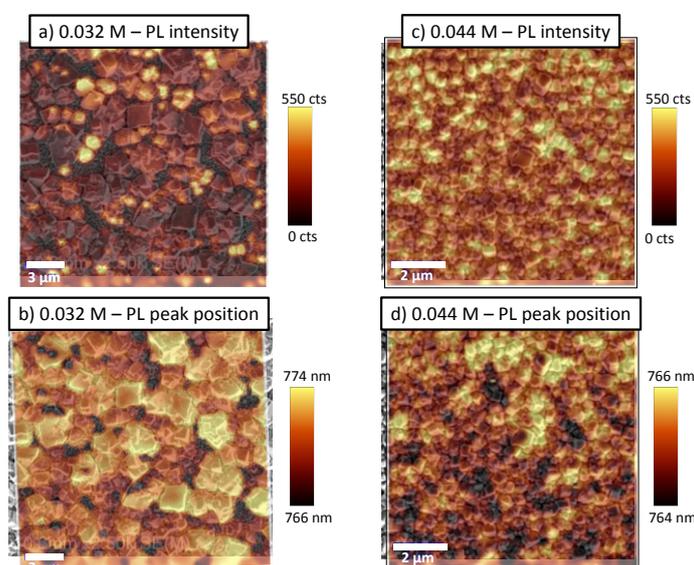


Abbildung 3: Räumlich aufgelöste Photolumineszenz der Perowskitkristalle einer Absorberschicht im Submikrometerbereich auf der Elektrode einer Perowskitsolarzelle im direkter Überlagerung mit der REM Aufnahme an der gleichen räumlichen Position zum Vergleich. Die Größe der Kristallite wurde in diesem Fall durch Änderung der Konzentration von Methylammoniumiodid in der Reaktionslösung variiert.

2.1.2 Korrelation zwischen Kristallisation und Photostrom (AP 5)

Für eine effiziente Optimierung von Perovskitsolarzellen wurde am Fraunhofer ISE untersucht, wie der fundamentale Zusammenhang zwischen der Kristalldynamik in der Absorberschicht und der Ausbildung des Photostromes während der Herstellung der Solarzelle verfolgt werden kann. Hierfür wurde ein neuartiger experimenteller Modell-Ansatz entwickelt, wobei zum ersten Mal für Halbleiterbauelemente der Photostrom während der Kristallisation zeitgleich aufgezeichnet werden konnte. Dies wurde möglich durch die in den Perovskitsolarzellen verwendeten porösen Kontaktstrukturen, (mesoporöses TiO_2 als Elektronenakzeptor und mikronisiertes Graphit als Löcherkontakt) wodurch bereits vor der Kristallisation des Perovskits die Vorder- und Rückseitenkontakte vorhanden sind. Die Zellen wurde u.a. in einem sogenannten „2-step“ Prozess hergestellt, wobei die TiO_2 - ZrO_2 -Graphitstruktur zunächst mit Blei-Iodid (PbI_2) gefüllt wird, welches dann in eine Lösung aus Methylammonium-Iodid (MAI) zu Perovskit reagiert (Abbildung. 4)

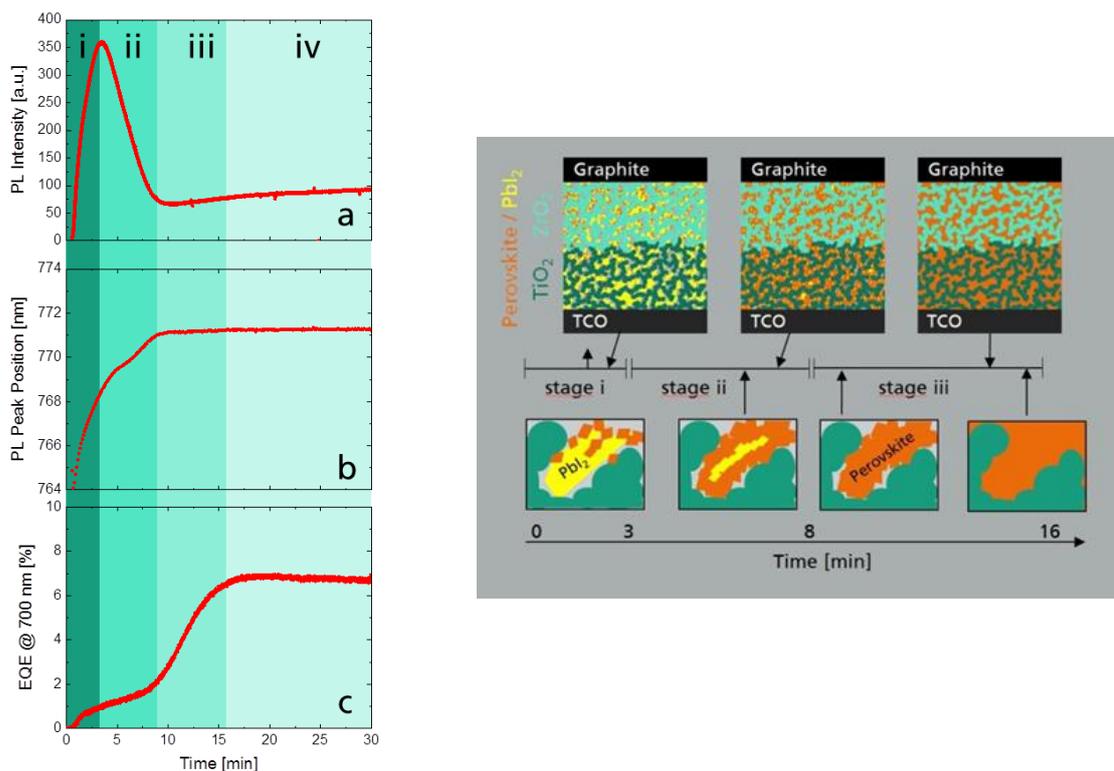


Abbildung 4: (links) Messergebnisse der Echtzeit-Untersuchung während der Ausbildung der Kristallisation im Inneren einer mesoporösen Perovskitsolarzelle durch simultane Messung der Photolumineszenz (PL) und des Photostromes (EQE). (rechts) Daraus abgeleitetes Kristallisationsmodell

Aus einer Rotverschiebung der Photolumineszenz (PL) des Perovskites während der ersten Minuten der Kristallisation lässt sich ein Kristallwachstum bis zu diesem Zeitpunkt ableiten. Das starke Ansteigen der PL-Intensität während dieser Zeit deutet auf die Bildung elektrisch isolierter Kristallisationskeime hin. Ab einer bestimmten Größe und Anzahl berühren sich diese Kristalle, was zu einer Abnahme des PL-Signals durch vermehrte nicht-strahlende Rekombinationen führt. Bemerkenswert an diesem Experiment ist auch die Ausbildung des Photostromes (verdeutlicht durch die Messung der EQE bei 700 nm). Anders als zu erwarten ist der Beitrag des Photostroms zum Zeitpunkt der abgeschlossenen Kristallisation noch marginal. Während der Verlauf des PL-Signals auf keine weitere Änderung im Kristall

hindeutet, findet der signifikanteste Anstieg des Photostromes erst nach diesem Zeitpunkt statt. Dieser Effekt konnte dahingehend interpretiert werden, dass erst nach Abschluss der vollständigen Bildung der Perowskitkristalle eine verbesserte elektrische Ankopplung an die porösen Kontaktstrukturen stattfindet.

2.1.3 Korrelation zwischen Photolumineszenz und Ladungstransport in Perowskit-solarzellen (AP 3)

Wie oben bereits beschrieben sind Ladungstransport und Photolumineszenz bei Perowskitsolarzellen miteinander verknüpft. Es war daher naheliegend, die bildgebende Photolumineszenz zur Visualisierung der Transportvorgänge in den Zellen einzusetzen. Am Fraunhofer ISE wurden hierzu an noch nicht vollständig optimierten Perowskitsolarzellen entsprechende Untersuchungen unter offener Klemmenspannung (Photospannung V_{oc}) und im Kurzschluss (Photostrom I_{sc}) durchgeführt und eine erste Modellvorstellung entwickelt.

Wie in Abbildung 5 aufgezeigt ist ein direkt reziprokes Verhältnis zwischen Photolumineszenz und Photostrom gegeben. Es ist daher möglich mittels Umschaltens zwischen den beiden Moden, ein hochaufgelöstes Bild von den Orten unterschiedlichen Ladungstransportes in der Perowskitsolarzelle zu erzielen. Dies stellt für die weitere Optimierung von Perowskitsolarzellen und für die spätere Qualitätskontrolle in der Produktion ein wichtiges Werkzeug dar.

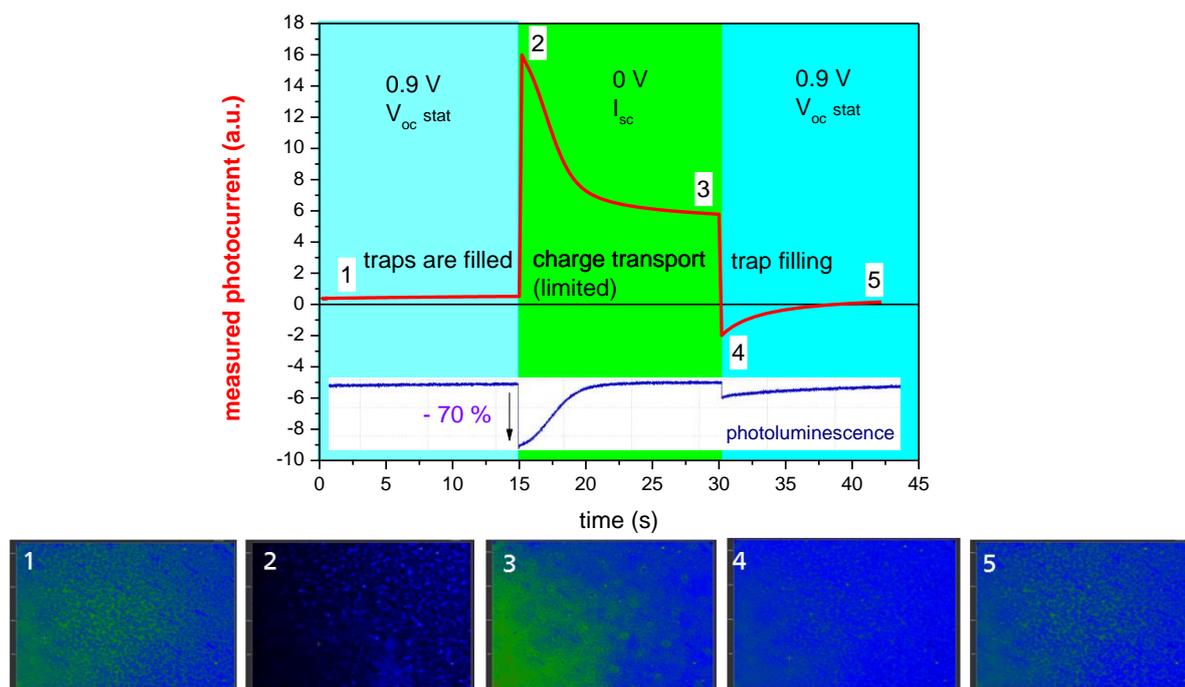


Abbildung 5: Zusammenhang von Photostrom und Photolumineszenz (PL) einer nicht vollständig optimierten Perowskitsolarzelle unter Beleuchtung mit voller Sonnenintensität, sowie die zugehörigen mikroskopischen Bilder der Photolumineszenz der Zellen (schwarz: Orte niedrigster PL, grün: Orte höchster PL)

2.2 Optimierung der Kristallisation in der Photo-Absorberschicht

Die für Photovoltaikanwendungen geeigneten Perowskite können aus Lösung abgeschieden

werden. Dies hat den gegenüber Vakuumverfahren bestehenden Vorteil einer sehr einfachen Herstellung der Schichten, aber den anfänglichen Nachteil einer inhomogenen Schichtbildung. Der fundamentale Grund hierfür liegt in dem unkontrollierten Kristallwachstum beim Ausfällen eines Salzes aus einer Lösung während der Trocknung. Dies führte zur Bildung von individuellen, oft länglichen, unzusammenhängenden Einzelkristallen in der Schicht und damit verbunden zu einem schlechten Transport der Ladungsträger in der Solarzelle und einem niedrigen solaren Wirkungsgrad. Im Projekt wurden unterschiedliche Methoden entwickelt um die Kristallisation kontrollieren zu können und eine homogene Schichtbildung zu erzielen.

2.2.1 Kristallisation aus Perowskitschmelze bei Raumtemperatur (AP 2)

Am Fraunhofer ISE wurde im Projekt intensiv der Überlegung nachgegangen, die Kristallisation nicht chemisch durch schwer zu kontrollierendes Ausfällen aus einer Lösung zu bewirken, sondern eine physikalische Kristallisation aus einer Perowskitschmelze herbeizuführen. Hierbei gelang es, festes Perowskitpulver mittels der Adsorption von Methylamin Gas bei Raumtemperatur in ein geschmolzenes Salz überzuführen. Nach Aufbringen der Schmelze als dünne Schicht wird durch Desorption des Gases der Schmelzpunkt wieder erhöht und es kann so eine Temperatur-kontrollierte Auskristallisation der Schicht stattfinden. Eine sehr homogene Verteilung der Perowskitkristallite ist so möglich (Abbildung 6).

Dieses für eine Aufskalierung von gedruckten Perowskitsolarzellen besonders gut geeignete Verfahren wurde auch zum Patent angemeldet. Zellwirkungsgrade bis **15 %** wurden hiermit bisher erreicht.

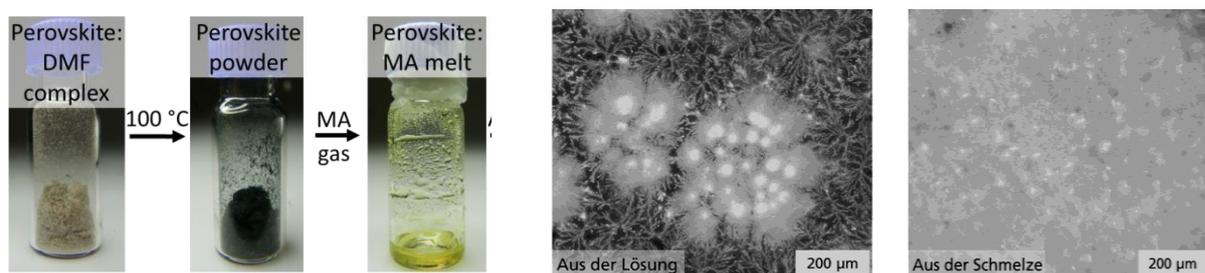


Abbildung 6: (links) Foto der Umwandlung des Perowskites ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) mittels der Adsorption von Methylamin (CH_3NH_2) Gas in ein bei Raumtemperatur geschmolzenes Salz. (rechts) Vergleichende Photolumineszenzaufnahmen der Photo-Absorberschichten in aus der Lösung und aus der Schmelze hergestellten Solarzellen.

2.2.2 PL-Mikroskopie des Kristallisationsvorganges (AP 3)

Gekoppelt mit Echtzeit-Aufnahmen der Photolumineszenz (PL) konnte der Kristallisationsprozess in Perowskitsolarzellen mit poröser Graphitgegenelektrode überwacht und auf kritische Kristallisationsparameter (Temperatur, Dauer) hin optimiert werden (Abbildung 7).

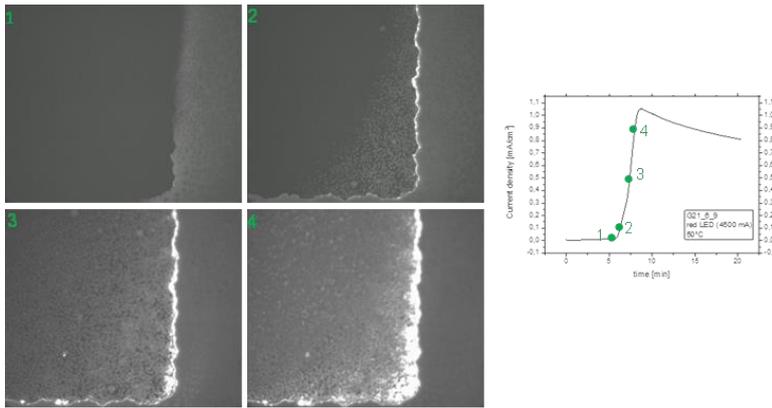


Abbildung 7: (links) Photolumineszenzmikroskopische Aufnahmen einer Perowskitsolarzelle während der Kristallisation aus einer Precursorlösung bei 50 °C (Bildbreite ca. 1.5 mm). Die Anregung der Lumineszenz fand bei 625 nm mit einer Intensität von etwa „1 Sonne“ statt, die Detektion bei Wellenlängen > 780 nm. Die Zunahme der Photolumineszenz mit der Dauer des Ausheizens zeigt die Ausbildung von Perowskit in der Zelle. Im Gebiet A ist eine starke Abnahme der Lumineszenz nach dem Umschalten erkennbar. (rechts) Simultane Messung der entsprechenden Photoströme der Zelle. Somit kann die Ausbildung der Perowskitkristalle sowie des Photostroms in Echtzeit während der Kristallisation beobachtet werden.

2.3 Entwicklung ladungsträgerselektiver Kontaktschichten

Um die hohe innere Photospannung des Perowskitabsorbers optimal extern nutzen zu können müssen die vorder- und rückseitigen elektrischen Kontaktschichten eine gute Selektivität für die Ladungsträger (Elektronen und Löcher) ausweisen. D.h. eine Grenzflächen-Rekombination mit dem entgegengesetzten Ladungsträger muss verhindert sein. Dies kann u.a. durch die Wahl von Materialien mit unterschiedlicher Austrittsarbeit erreicht werden. Gleichzeitig muss an der Grenzschicht zwischen Kontaktschicht und dem jeweiligen Ladungsträger des Absorbers eine gute Ankopplung für einen verlustfreien Stromfluss gewährleistet sein. Die Kontaktschichten sind entweder organischer oder anorganischer Art und müssen mindestens auf einer Seite der Solarzelle transparent sein. Im Projekt wurden in der Literatur beschriebene aber auch neue aussichtsreichsten Kontaktmaterialien hergestellt.

2.3.1 Anorganische p-leitende Kontaktmaterialien (AP 1.2)

Ein wichtiger Schritt in Richtung effizienter siebgedruckter in-situ Perowskit-Solarzellen ist die Optimierung der porösen leitfähigen Rückkontaktierungsschicht. Zu diesem Zweck wurden graphithaltige Siebdruckpasten hergestellt und getestet.

Zudem wurde an der Optimierung von graphithaltigen Siebdruckpasten gearbeitet. Hierbei wurden ausgehend von einer wässrigen Dispersion die mikronisierten Graphitpartikel unter Zuhilfenahme von geeigneten Dispersionsmitteln getrocknet und in das organische Siebdruckmedium transferiert. Der direkte Transfer einer ethanolischen μ -Graphit Dispersion in das Siebdruckmedium wurde ebenfalls untersucht. In beiden Fällen konnte eine stabile Dispergierung in der Siebdruckpaste erreicht werden. Die resultierenden Schichtdicken lagen wie für die Funktion als p-selektiver Kontakt gewünscht bei 0.5 – 1 μm .

2.3.2 Anorganische n-leitende Kontaktmaterialien (AP 1.2)

Am Fraunhofer ISE wurde auf anorganische n-leitende Kontaktschichten zurückgegriffen. Hierzu wurden vor allem sehr dünne (ca. 10 nm) kompakte Schichten aus TiO_2 entwickelt und auf dem TCO Glas hergestellt. Ein Vergleich unterschiedlicher Beschichtungsmethoden (Sputtern, Atomic-Layer-Deposition ALD und Spray Coating SPD) wurde durchgeführt (Abbildung 8). Nach einer Optimierungsphase war der Einfluss der unterschiedlichen Beschichtungen auf die Photospannung in Perowskitzellen unter 1 Sonnen gering. Unter schwacher Beleuchtung wurde jedoch mit dem ALD Verfahren die beste Photospannung erzielt. Dies deutet darauf hin, dass in diesem Fall die Rekombinationsrate mit Löchern aus dem Perowskit am geringsten ist.

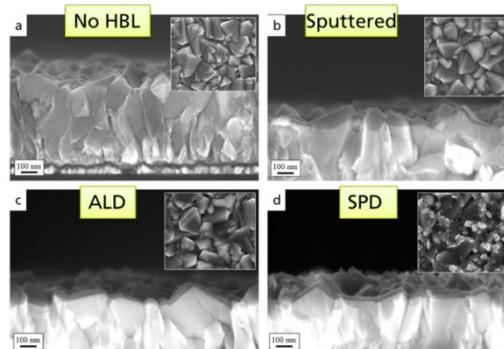


Abbildung 8: REM Querschnitt von TCO Glaselektroden (Photoelektrodenseite) mit sehr dünnen n-leitenden (löcherblockierenden) kompakten TiO_2 Schichten hergestellt mittels unterschiedlicher Verfahren (s. Text)

2.3.3 Vermeidung von Kurzschlüssen / Shunts (AP 5)

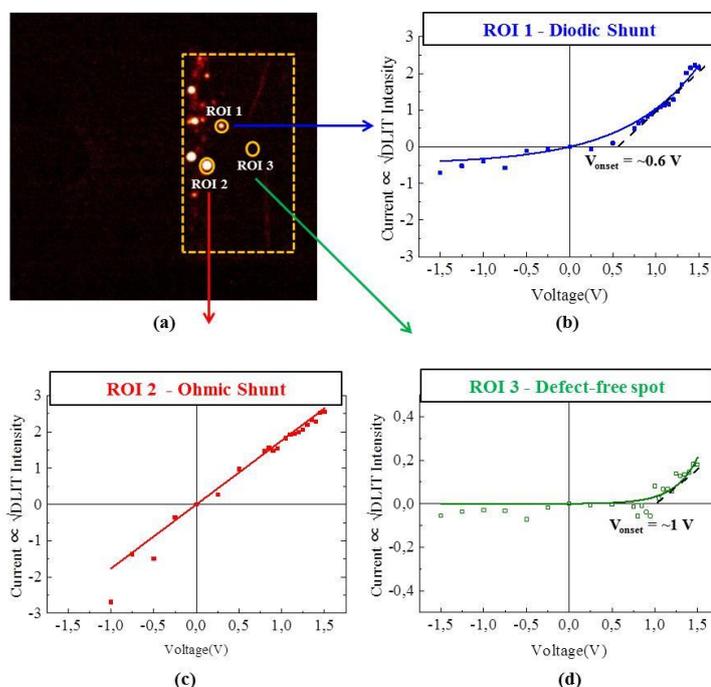


Abbildung 9: Detektion von ohmschen und diodischen lokalen Kurzschlüssen in graphitbasierten Perowskitsolarzellen mittels Dark-Lock-in_Thermographie (DLIT) vor dem Befüllen mit Perowskit

Ein entscheidender Punkt zur Optimierung des Wirkungsgrades bei gedruckten Perowskitsolarzellen stellt die Vermeidung von internen Kurzschlüssen dar. Im Hinblick darauf wurde im Projekt eine Optimierung der Elektronen-selektiven Schicht durchgeführt. Zum Vergleich verschiedener Herstellungsverfahren für diese Schicht wie Spraypyrolyse, Atomic-Layer-Deposition oder Sputtern wurde ein Verfahren zur Detektion von Kurzschlüssen mittels Dark Lock-In Thermography (DLIT) etabliert (Abbildung 9). Dadurch konnte erstmals zwischen Ohmschen und diodischen Kurzschlüssen unterschieden werden. Die optimierten Schichten führten zur Entwicklung von komplett kurzschlussfreien gedruckten Perowskitsolarzellen.

2.4 Optimierung von hoch-effizienten Perowskitsolarzellen

2.4.1 Perowskitsolarzellen mit Graphitelektrode (AP 4)

Druckbare Perowskitsolarzellen mit poröser Graphitelektrode stellen eine Variante dar, die bereits in der Antragsphase des Projektes als sehr innovatives Konzept angesehen und vorgeschlagen wurde. Dieses, mittlerweile auch von Arbeitsgruppen in England, Italien, der Schweiz, Finland und China verfolgte Konzept, zeichnet sich durch aufskalierbare Herstellung und niedrigste Materialkosten aus. Potentiell instabile und teure organische Lochleiter werden vermieden. Der Perowskitabsorber wird am Ende der Zellherstellung in die poröse Zellstruktur in die poröse Zellstruktur (s. Abbildung 10) eingebracht.

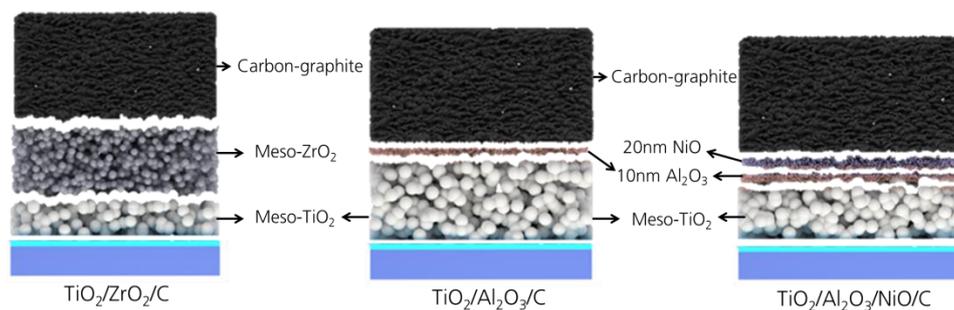


Abbildung 10: Schematischer Aufbau von monolithischen Perowskitsolarzellen mit poröser Graphitelektrode und unterschiedlichen elektrischen Isolatorschichten; der Lichteinfall ist von unten. Der Perowskit wird nach dem Sintern der gedruckten Schichten in die poröse Zellstruktur eingefüllt und kristallisiert

2.4.1.1 Zertifizierte Wirkungsgrade (AP 3)

Am Fraunhofer ISE wurde das Zellkonzept optimiert. Die Herausforderung lag insbesondere in dem Erreichen einer hohen Photospannung > 1 V. Dies konnte mit der in 2.2.4 bereits beschriebenen Methode des geschmolzenen Perowskits erreicht werden. Der anfänglicher, nicht-stabilisierter Wirkungsgrad von **15 %** wurde erreicht. Daraufhin wurde im Fraunhofer Kalibrierlabor (Callab) ein zertifizierter, stabilisierter Wirkungsgrad von **12.6 %** nachgewiesen werden (Abbildung 11). Dies ist bisher der höchste zertifizierte Wert für gedruckte Perowskitsolarzellen.

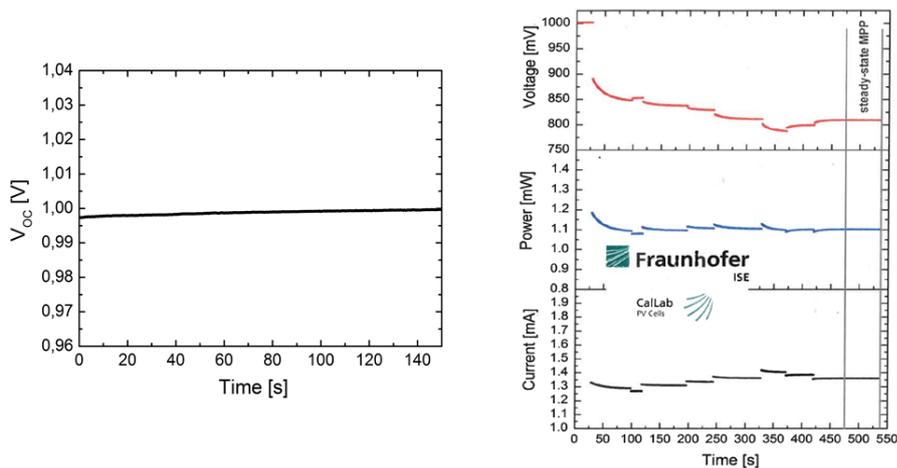


Abbildung 11: Links: stabilisierte Photospannung (V_{OC}) von aus der Schmelze hergestellten monolithischen Graphitsolarzellen. Der hohe V_{OC} weist auf sehr effiziente Extraktion der Elektronen am Vorderseitenkontakt hin. Rechts: Zertifizierter steady-state Wirkungsgrad von 12,6 %, gemessen am Fraunhofer ISE Callab.

2.4.1.2 Transientenverhalten (AP 5)

An den siebgedruckten Perovskitsolarzelle des Fraunhofer ISE konnte ein rechteckförmiges Transientenverhalten gemessen werden, das dem Transportverhalten in einer idealen Solarzelle bereits recht nahe kommt (Abbildung 12). Der absolute Photostrom ist allerdings aufgrund von flächiger Inhomogenität in der Kristallisation noch weiter steigerbar.

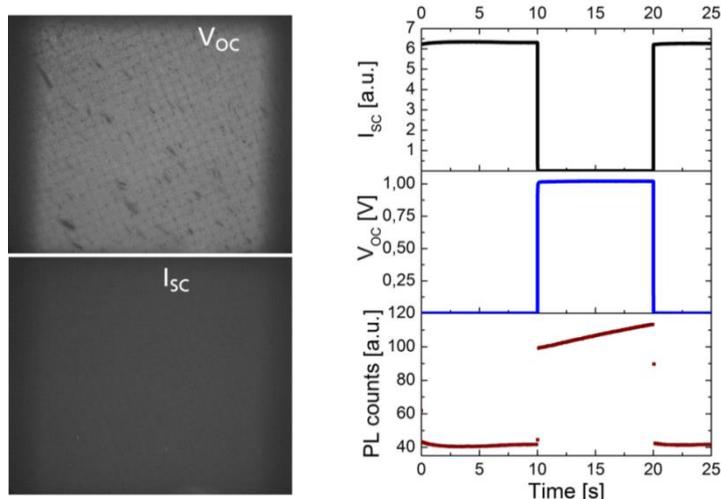


Abbildung 12: Untersuchung des Ladungstransportes in einer optimierten vollständig siebgedruckten Perovskitsolarzelle mit Graphitelektrode; durch ortsaufgelöster Photolumineszenz (links) sowie den Transientenmessungen des Photostromes I_{SC} , der Photospannung V_{OC} und der Intensität der Photolumineszenz

Im Kurzschluss der Solarzelle werden die photogenerierten Ladungsträger als Photostrom extern von der Photoelektrode zur Gegenelektrode aus Graphit aus der Zelle geführt. Im vorliegenden Fall eines optimierten Ladungstransportes bewirkt dies im Kurzschluss eine geringe Ladungsträgerdichte im Absorber was sich in einem starken konstanten „Quenching“ der Photolumineszenz niederschlägt. Beim Umschalten auf den Leerlauf ist die hohe

Photolumineszenz dann ein Maß für die hohe Dichte an im idealen Fall nur strahlend rekombinierenden Ladungsträgern, was eine hohe Photospannung bewirkt. Die gemessene Photospannung von 1 V liegt noch geringfügig (130 mV) unter dem mittels spin-coating und organischem Lochleiter erreichten Rekordwerten aus der Literatur. Der theoretische Limit der Photospannung liegt mit dem verwendeten Standardperowskit MAPI bei 1.2 V.

2.4.1.3 Strukturelle Untersuchungen (AP 2)

Wie unter AP 4.2 beschrieben, wurden monolithische Perowskitsolarzellen als Referenz für in-situ Testzellen entwickelt und hergestellt. Wichtig ist die Untersuchung des Schichtaufbaus und des Nachweis der Elemente des Perowskites in der fertigen Zelle. Hierzu wurden entsprechende Studien mittels SEM und EDX durchgeführt (Abbildung 13)

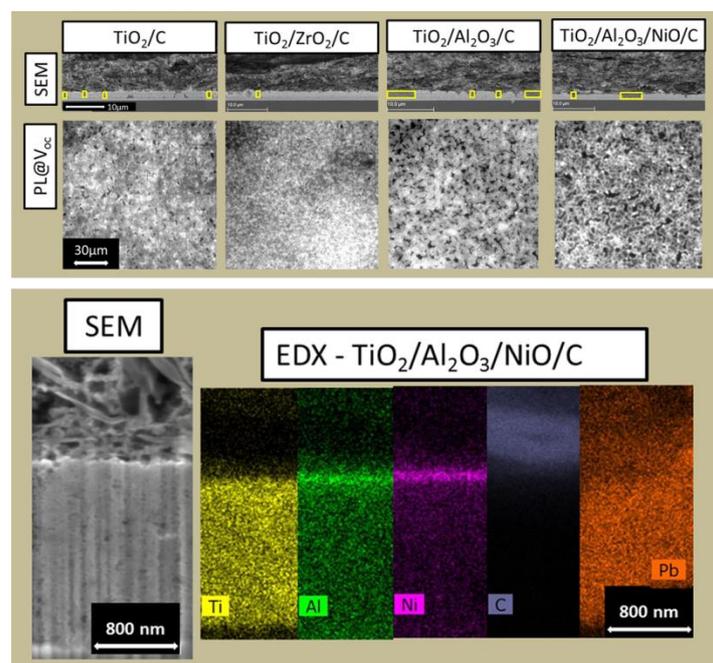


Abbildung 13: Querschnitt von lochleiterfreien, monolithischen Perowskitsolarzellen (s. 2.4.1) mit poröser Graphitelektrode. Vergleich der Rasterelektronischen (SEM) Aufnahme mit der Verteilung der Elemente (EDX). Oben sind für die 3 Varianten der elektrischen Isolatorschicht der SEM Querschnitt und die mikroskopische Photolumineszenz gezeigt.

2.5 Entwicklung von aufskalierbaren Perowskitsolarzellen

2.5.1 Entwicklung von druckbaren glasversiegelten in-situ Perowskitsolarzellen (AP 6)

Perowskite sind empfindlich gegenüber der Kombination von Sauerstoff und Licht. Außerdem ist wie aus der Forschung zu Farbstoffsolarzellen bekannt aufgrund des Salzcharakters eine schädliche ionische Drift in seriell aufgeschalteten Perowskitsolarmodulen zu erwarten. Mit dem vom Fraunhofer ISE entwickelten in-situ Konzept wird dieser Problematik von Anfang an Rechnung getragen. Im in-situ Konzept werden mesoporöse Kontaktschichten per Siebdruck auf Flachglasscheiben aufgebracht. Anschließend werden zwei Scheiben fest durch

niedrigschmelzendes Glaslot in einem Fügeprozess miteinander verbunden. Der Perowskitabsorber wird in einem letzten Schritt in flüssiger Form eingebracht und kristallisiert vor Ort – in-situ- in den Zellstrukturen aus. Die Verteilung erfolgt selbstorganisiert über Kapillarkräfte; die Kristallisation durch Austreiben des zur Verflüssigung verwendeten Gases. In Abbildung 14. ist dieses Verfahren dargestellt. Im Projekt wurde das komplexe Verhalten der Kristallisation intensiv weiter untersucht, optimiert und im Zellmaßstab umgesetzt.

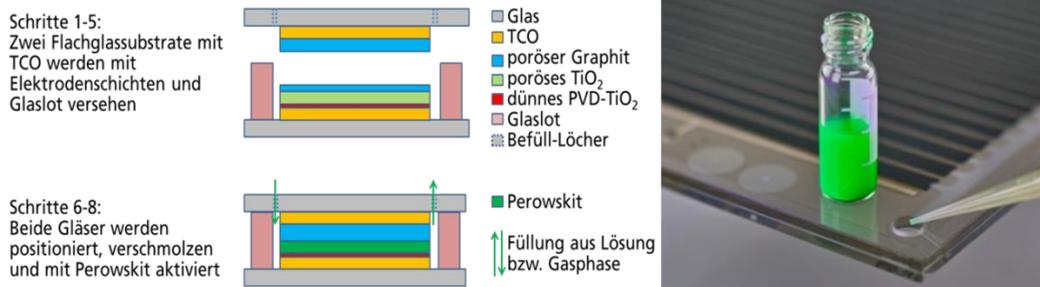


Abbildung 14: Links: Schematische Darstellung der Prozessschritte für die Herstellung von in-situ Perowskitsolarzellen. Die Versiegelung der einzelnen Zellen erfolgt mittels Glaslot. Rechts: Befüllung des fertigen Leermoduls mit geschmolzenem Perowskit. Die abgebildete Menge (2 mL) genügt für die Herstellung von 4 m² Modulfläche.

2.5.1.1 Zertifizierte Wirkungsgrade (AP 3)

Es konnte gezeigt werden, dass der Perowskit bei einer optimalen Befüllung kompakt in den porösen Schichten der Zelle auskristallisiert (vergleiche Abbildung 15). Die beste Zelle wurde zur Charakterisierung an ein akkreditiertes Testlabor (Fraunhofer ISE CalLab) gegeben, mit dem Resultat einer zertifizierten stabilisierten Effizienz von **9.3 %**. Dies ist in-situ Solarzellen der bisher höchste Wert und stellt den Machbarkeitsnachweis für eine weiter Aufskalierung dar.

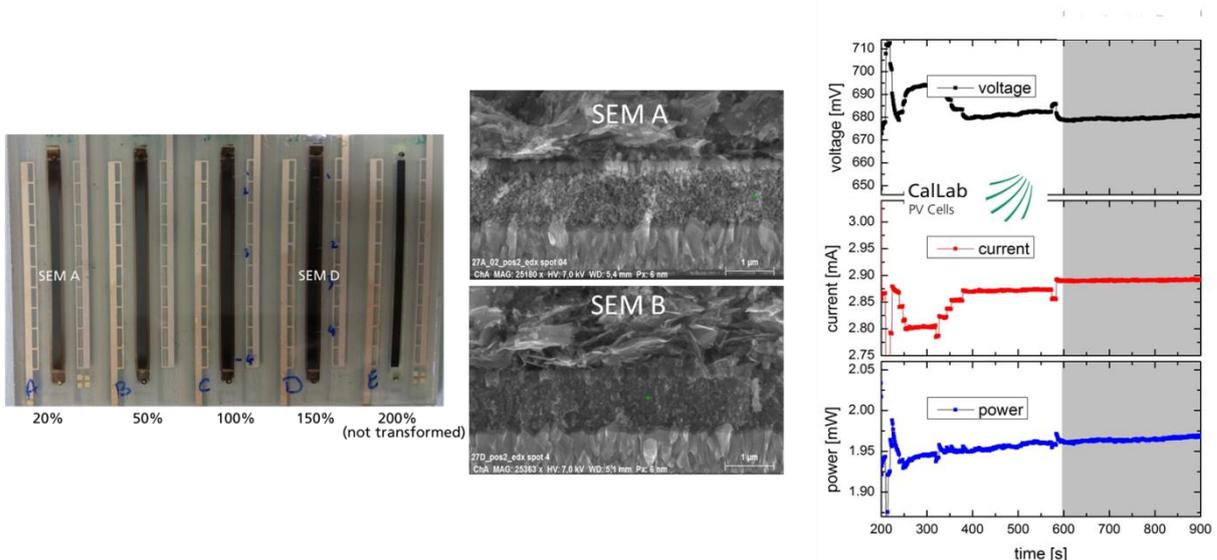


Abbildung 15: Links: Fotografie einer Platte mit fünf in-situ Testzellen im Labormaßstab nach der Kristallisation des Perowskits. Variiert wurde die Menge an Perowskit. Mitte: Die optimale Menge an Perowskit führt zu einer kompakten Füllung der porösen Schichten, wie im REM-Querschnitt der Zelle D gezeigt. Rechts: Zertifizierter stabilisierter Wirkungsgrad von 9.3% einer in-situ Zelle auf einer Teilfläche von 0.2 cm².

2.6 Messung und Zertifizierung des Wirkungsgrades (AP 3)

Perowskit-Solarzellen zeigen in vielen Fällen eine Hysterese, wenn die Strom-Spannungskennlinie aufgenommen wird. D.h. der gemessene Wert des Wirkungsgrades ist von der Scan-Richtung, der Scan-Geschwindigkeit und ggf. der Vorbehandlung der Solarzelle abhängig. Da Perowskit-Solarzellen gerade auch in Bezug auf diese Hysterese sehr unterschiedliche Eigenschaften zeigen, ist es nicht möglich eine bestimmte Scan-Geschwindigkeit oder ähnliche Festlegungen zu bestimmen, um damit grundsätzlich den realen Wirkungsgrad zu messen.

Mit den Partnern aus Konsortium wurde an der Universität Konstanz ein Messprotokoll entwickelt und die dazu verwendete Software den Partner, aber auch der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Diese Daten wurden veröffentlicht. Hier konnten wir anhand von Perowskit-Solarzellen aus den verschiedenen Laboren ein einheitliches Protokoll entwickeln werden, was zum einen den Zeitaufwand in vertretbarem Rahmen lässt, aber gleichzeitig reproduzierbare und realistische Performance-Werte der Solarzellen angibt, bzw. deutlich macht, falls es hier Probleme geben sollte. Die Festlegung auf ein Protokoll für die Messung von Perowskit Solarzellen ist unabdingbar, um die Ergebnisse verschiedene Labore miteinander vergleichen zu können. Es kann davon ausgegangen werden, dass derzeit noch immer viele Labore die Scan-Geschwindigkeit so wählen, dass ein „optimaler“ Wirkungsgrad herauskommt, der aber leider nur wenig mit dem Wirkungsgrad unter realistischen Bedingungen zu tun hat.

Das Zertifizierungslabor des Fraunhofer ISE (CaLab) hat diese Vorschläge übernommen. Eine Zertifizierung des Wirkungsgrades von Perowskitsolarzellen wird nur vergeben, wenn die Zellen unter Last am Spannungspunkt der maximalen Leistung über einen Zeitraum von mindestens 300 s einen konstanten Photostrom liefern.

2.7 Beurteilung der industriellen Herstellbarkeit

2.7.1 Siebdruck von in-situ Perowskitsolarmodulen (AP 6)

Zur Beurteilung der industriellen Machbarkeit von druckbaren in-situ Perowskitsolarzellen auf Glas wurden bei dem Projektpartner Thieme in enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE zahlreiche Workshops durchgeführt (Abbildung 16). Hierbei wurden für die entsprechenden Siebdruckpasten sämtliche Druckparameter optimiert, eine Vielzahl von Sieben hergestellt und Anpassungen der Druckmaschinen vorgenommen. Dies hat sich als wegweisend herausgestellt für die Beurteilung aber auch die zukünftige Umsetzung von Perowskitsolarmodulen. Die Firma Thieme konnte hiermit ein weiteres Geschäftsfeld erarbeiten, da zu erwarten ist, dass aufgrund der starken weltweiten Entwicklungsaktivität auf dem Gebiet der Perowskit-Photovoltaik sich eine wachsende Nachfrage an Drucktechnologie entwickeln wird. Thieme ist aufgrund seiner langjährigen Erfahrung im technischen Glasdruck in der Lage, das Geschäftsfeld sowohl auf dem Gebiet der Hochpräzisionsdrucks im Labor über Pilotlinien bis zu einer bis zu einer vollautomatisierten Drucklinie zu bedienen.

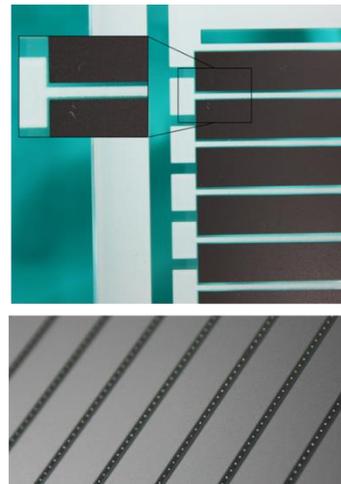


Abbildung 16: Links: Impressionen aus einem der zahlreichen Druck-Workshops beim Projektpartner Firma Thieme, Teningen. Rechts: Qualitätsbeurteilung der Druckgenauigkeit und der Homogenität des Druckbildes verschiedener Druckpasten für die Perowskitmodule. Die weiße Struktur oben ist das Glaslot (Stegbreite $\ll 1\text{mm}$). Die schwarze Struktur ist die Graphitelektrode. Die weißen Punkte unten sind Metallkontaktierungen für die elektrische Verschaltung.

2.7.2 Produktionsszenario in-situ Perowskitsolarmodule (AP 6)

Basierend auf der bei den industriellen Workshops beim Projektpartner Thieme gewonnenen Erfahrung wurde am Fraunhofer ISE ein erstes Produktionsszenario für die Herstellung von in-situ Perowskitsolarmodulen im 1 GW_p Massstab durchdacht und erstellt. In Abbildung 17 ist dieses Szenario gezeigt. Als Ausgangsprodukt wird Flachglas verwendet. Ein resultierender Durchsatz für die Bearbeitung und den Druck der beiden Elektrodenhälften auf bereits im industriellen Masstab verfügbarem, pyrolitisch mit TCO beschichtetem Flachglas liegt bei $12\text{ m}^2/\text{min}$. Dies entspricht in etwa $\frac{1}{4}$ der Produktionskapazität einer typischen Flachglasfabrik. Ein solcher Durchsatz ist auch aus Produktionslinien für dekorativem Einbrand-Siebdruck auf Glas bekannt. In einer anschliessenden Produktionseinheit findet der Ausbrand des Druckmediums, die Positionierung und das thermische Versiegeln (Fusing) der beiden Elektrodenhälften aufeinander statt. Hierbei wird von einem kombinierten Sinter- und Fusingschritt ausgegangen. Anschliessend werden die Leermodule in einer weiteren Einheit durch Befüllung und Auskristallization des Perowskiten photovoltaisch aktiviert. Abschliessend finden die Montage der elektrische Anschlussbox und in-line Qualitätskontrolle zur Endabnahme statt.

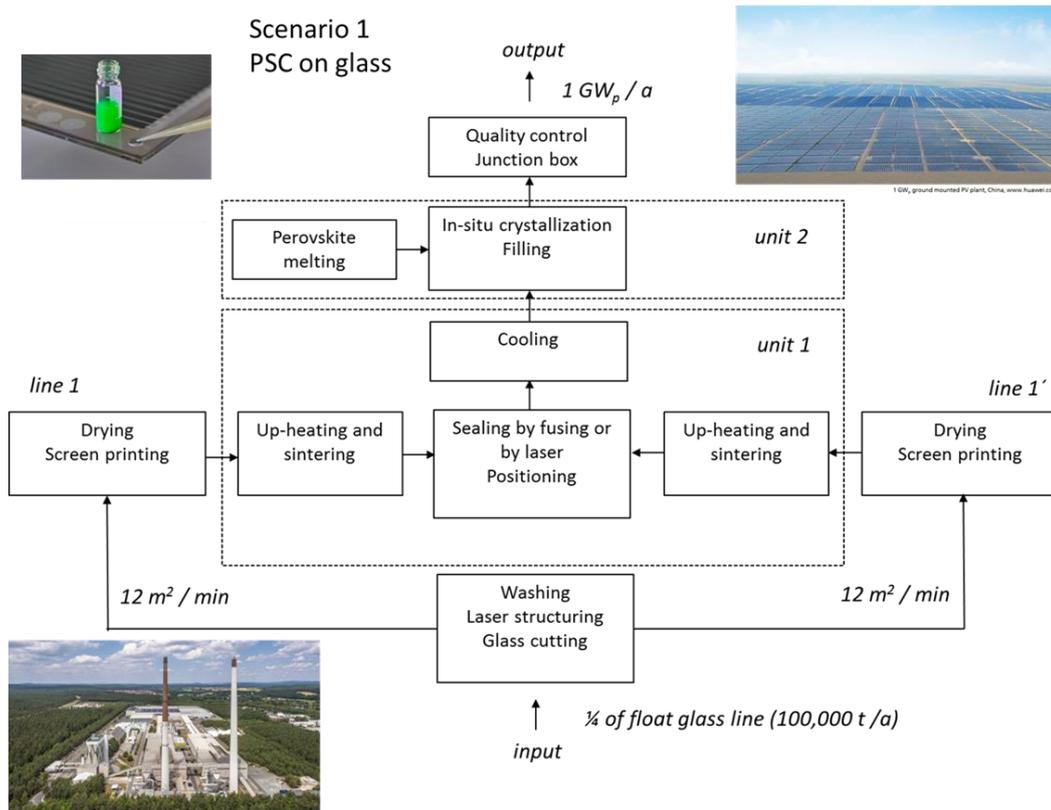


Abbildung 17: Produktionsszenario für die Herstellung von in-situ Perowskitsolarmodulen mit den Methoden der glasverarbeitenden Industrie.

2.7.3 Zukünftige dezentrale Produktion von Perowskitsolarmodulen (AP 6)

In den letzten Jahren sind die Kosten von Silizium-Photovoltaikmodulen stark gefallen. Dies wurde durch die Integration von F&E Ergebnissen, den schnellen Ausbau an Produktionskapazitäten und die Verschiebung der materialbedingt aufwendigen Produktion nach Asien erreicht. Durch die sich daraus ergebenden Transportwege wird das klimapolitische Ziel der Verringerung des CO₂-Fußabdrucks bei der Energiegewinnung erschwert. Gleichzeitig ist es notwendig, den exportorientierten deutschen Maschinen- und Anlagenbau durch innovative Produkte zu stärken.

Der Lösungsansatz des Fraunhofer ISE der gedruckten in-situ Perowskitsolarmodulen besteht darin, sehr preisgünstige Glassubstrate und effektive Absorbermaterialien mit einfachen Herstellungsverfahren zu kombinieren, wodurch die Material- und Energiekosten von Solarmodulen nahezu auf die der Glassubstrate reduziert werden. Der momentane Standortvorteil einer zentralisierten PV-Produktion in China würde damit entfallen, da Flachglas weltweit dezentral in den Märkten produziert und verarbeitet wird (s. Abbildung 18). Für die weltweit starke deutsche glasverarbeitende und -veredelnde Industrie erweitert diese Produktionstechnologie das traditionell erfolgreiche Geschäftsmodell.

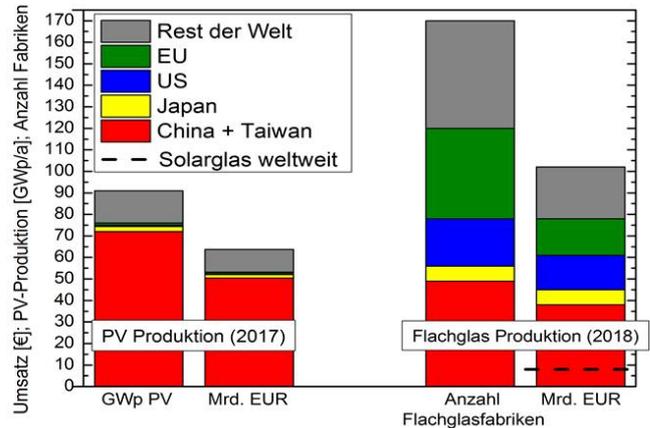
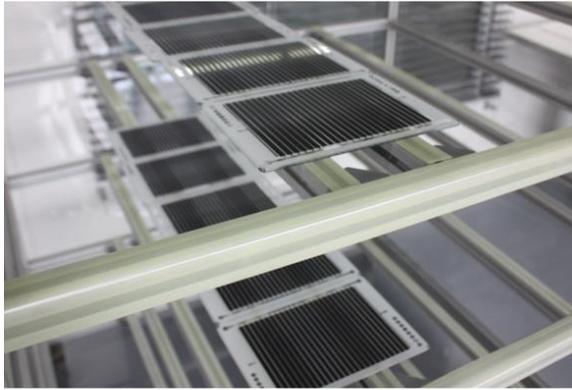


Abbildung 18: Links: Photo von siebgedruckten Elektroden für in-situ Perovskitsolarmodulen auf Glassubstraten. Rechts: Vergleich ökonomischer Kenndaten (installierte Leistung, Umsatz und Anzahl Flachglasfabriken) von gegenwärtiger Photovoltaikproduktion mit denen der weltweiten Flachglasproduktion. Die weltweit dezentralen Produktion von Flachglas gegenüber der in Asien zentralisierten Produktion von Silizium- und klassischer Dünnschicht-Photovoltaik ist erkennlich.

3 Relevante FE-Ergebnisse von dritter Seite

3.1.1 Vergleichbare Arbeiten anderer

Bisher wurden weltweit noch keine mit dem von Fraunhofer ISE entwickelten in-situ Konzept direkt vergleichbare Arbeiten berichtet. An der Universität Porto wurde jedoch ein laserunterstützter ebenfalls auf Glaslot basierender Versiegelungsprozess entwickelt und immerhin auf kleinen Flächen ($< 100 \text{ cm}^2$) erfolgreich getestet.

3.1.2 Aktueller Forschungstrend Perovskitsolarzellen

Die Anzahl an Publikationen auf dem Gebiet der Perovskit-Solarzellen ist weiterhin steigend. Es kommen derzeit täglich ca. 2 neue Publikationen zu dem Thema heraus. Relativ gering, wenn auch steigend, ist der Anteil an Arbeiten zu bleifreien Perovskitsolarzellen (Abbildung 19).

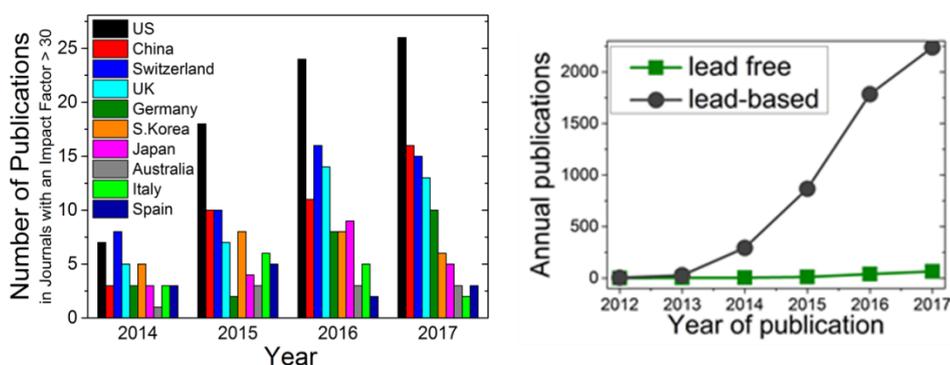


Abbildung 19: Links: Jährliche Anzahl an Veröffentlichungen zu Perovskitsolarzellen in hochwertigen Zeitschriften wie Nature, Science, etc. (impact factor > 30) in unterschiedlichen Ländern: Rechts: Jährliche Anzahl an Veröffentlichungen zu Blei-basierten und Blei-freien Perovskitsolarzellen.

Die in der Literatur angegebenen Wirkungsgrade sind mit Vorsicht zu genießen, da nicht immer klar dargestellt ist, wie diese genau gemessen wurden (z.B. Scan-Rate). Da dies aber einen großen Einfluss auf die Messwerte und die J-V Kurve hat, wird damit ggf. ein falscher Wirkungsgrad angegeben. Auch die Zertifizierung von Perowskitsolarzellen ist noch unterschiedlich. So ist etwa das Zertifikat der Firma Newport basiert auf der Messung von Anfangswerten, d.h. nicht stabilisierten Messungen. Dies betrifft auch den aktuellen Rekordwert von 23 %. Am Fraunhofer ISE Kalibrierlabor hingegen werden nur stabilisierte Werte der Effizienz zertifiziert.

Am holländischen Forschungsverbund Soliance wurde im April 2018 eine neue Rekorderffizienz für Perowskit-Module berichtet. Die Effizienz wurde auf einem Modul erreicht, das auf einem handelsüblichen Glassubstrat von 6 x 6 Zoll und 24 in Reihe verbundenen Zellen basiert. Die stabilisierte Effizienz über eine Aperturfläche von 144 cm² betrug 13,8%, wobei einzelne Zellen eine Leistung von 14,5% zeigten.

4 Bewertung der Projektergebnisse im Vergleich zur Planung

Im Projekt konnten alle Arbeitspakete wie vorgesehen bearbeitet werden. Der im Meilenstein und Projekttitel vorgesehene Wirkungsgrad von 17 % für druckbare Perowskitsolarzellen wurde nicht ganz erreicht. Dennoch ist der erreichte Wert von 15 % nicht-stabilisiert und 12,3 % zertifiziert stabilisiert im Vergleich zur Literatur als Weltrekord für gedruckte Perowskitsolarzellen anzusehen.

Am Anfang und während des Projektes wurden experimentelle Workshops mit den Projektpartnern durchgeführt um gemeinsam schneller den internationalen Stand der Perowskitsolarzellen Literatur zu erreichen. Für Referenzzellen wurde anschließend beim Projektpartner Universität Konstanz ein sehr guter Wirkungsgrad von 18% erreicht. Wenn man bedenkt, dass zu Beginn des Projektes in Deutschland praktisch bei „Null“ angefangen wurde, so ist festzustellen, dass das Projekt MesoPIN hier einen wichtigen Beitrag leisten konnte.

Unter dem Gesichtspunkt aufskalierbarer, langzeitstabile Modulkonzepten wurde am Fraunhofer ISE das in-situ Zellkonzept entwickelt. Durch die Entwicklung der Methode des durch Adsorption eines Gases geschmolzenen Perowskitsalzes konnte erfolgreich gezeigt werden, dass dieses bereits 2013 zum Basispatent angemeldete Konzept umsetzbar ist. Das Konzept wurde 2018 in China als Patent anerkannt. Ein zertifiziert stabilisierter Wirkungsgrad von 9,3 % wurde erreicht. Trotz dieses noch verbesserungswürdigen Wertes wurde allerdings bereits eine Photospannung von 1 V erzielt. Dies ist sehr bemerkenswert, da das in-situ Konzept basierend auf einer porösen Graphitelektrode ohne teure und potentiell instabile organische Lötleiter auskommt. Literaturzellen mit organischen p-Leitern erreichen maximal 1,13 V.

Zur Beurteilung der industriellen Machbarkeit des in-situ Zellkonzeptes wurden wie geplant in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Thieme umfangreiche Arbeiten zum größer-flächigen Siebdruck von Modulen durchgeführt und ein erstes Produktionsszenario erarbeitet.

Mit der Entwicklung der mikroskopischen Photolumineszenzmessung in Korrelation mit dem Ladungstransport in den Zellen konnte eine wichtige Methode für eine spätere in der Produktion notwendige Qualitätskontrolle bereitgestellt werden. Basierend hierauf wurde eine neue Methode entwickelt mit der der zeitliche Vorgang der Kristallisationsbildung im Inneren der Zellen während der Herstellung beobachtet werden kann.

5 Fortschreibung des Verwertungsplans

5.1 Publikationen

L. Wagner, S. Chacko, G. Mathiazhagan, S. Mastroianni, A. Hinsch, High Photovoltage of 1 V on a steady-state certified HTL-free perovskite solar cell by a molten-salt approach, *ACS Energy Letters*, available online (2018)

L. Wagner, L. E. Mundt, G. Mathiazhagan, M. Mundus, M. C. Schubert, S. Mastroianni, U. Würfel, A. Hinsch, S. Glunz, Distinguishing crystallization stages and their influence on quantum efficiency during perovskite solar cell formation in real-time, *Nature Scientific Reports* 7, 14899 (2017)

PSC. Schulze, AJ. Bett, K. Winkler, A. Hinsch, S. Lee, S. Mastroianni, LE. Mundt, M. Mundus, U. Würfel, SW. Glunz, M. Hermle, JC. Goldschmidt, Novel Low-temperature process for perovskite solar cells with a mesoporous TiO₂ scaffold, *ACS Appl Mater Interfaces*, 30567 – 30574 (2017)

E. Zimmermann, K. K. Wong, M. Müller, H. Hu, P. Ehrenreich, M. Kohlstädt, U. Würfel, S. Mastroianni, G. Mathiazhagan, A. Hinsch, T. P. Gujar, M. Thelakkat, T. Pfadler, L. Schmidt-Mende. Characterization of perovskite solar cells: Towards a reliable measurement protocol. *APL Mater.* 4(9), 091901 (2016)

S. Mastroianni, F. D. Heinz, J.-H. Im, W. Veurman, M. Padilla, M. C. Schubert, U. Würfel, M. Grätzel, N.-G. Park, and A. Hinsch, Analysing the effect of crystal size and structure in highly efficient CH₃NH₃PbI₃ perovskite solar cells by spatially resolved photo- and electroluminescence imaging, accepted for publication in *Nanoscale* (2015)

5.2 Konferenzbeiträge

A. Hinsch, Hochskalieren von gedruckten Perowskit-PV-Modulen (invited lecture), Perowskit-Workshop Baden-Württemberg, Stuttgart, 20th November 2018

G. Mathiazhagan, S. Bogati, L. Wagner, S. Mastroianni, A. Hinsch, Ultra-thin Al₂O₃ Space Layer and NiO_x Hole Transport Layer for Carbon-Graphite Based Perovskite Solar Cells (poster), PSCO 2018, Lausanne, Switzerland, 30th September – 2nd October 2018

L. Wagner, G. Mathiazhagan, S. Mastroianni, A. Hinsch, Printed Perovskite Photovoltaics: Towards Rigidly Encapsulated Devices (poster), PSCO 2018, Lausanne, Switzerland, 30th September – 2nd October 2018

G. Mathiazhagana, S. Bogatia, K. Yasaroglu, L. Wagner, S. Mastroianni, A. Hinsch, Ultra-thin Space Layer for Carbon-Graphite Based Perovskite Solar Cells (poster), HOPV - Hybrid and Organic PV, Benidorm, Spain 28th – 31th May 2018

L. Wagner, G. Mathiazhagan, S. Mastroianni, A. Hinsch, Certified printed perovskite photovoltaics by a molten salt approach (poster), HOPV - Hybrid and Organic PV, Benidorm, Spain 28th – 31th May 2018

V. Mergner, L. Wagner, S. Mastroianni, U. Würfel, C. Sanchez-Valle, A. Hinsch, From the very beginning: Linking photovoltaic evolution and crystal formation by the example of perovskite solar cells (lecture), DPG Frühjahrstagung, Berlin, 2018

S. Mastroianni, L. Wagner, S. L. Subramanian, G. Mathiazhagan, K. Yasaroglu, B. K. Das, S. Bogati, S. Chacko, L. E. Mundt, W. Kwapil, M.C. Schubert, C. Veit, B. Zimmermann, T. Kroyer, U. Würfel, A. Hinsch, Optimization of electron selective layer and perovskite crystallization for efficient outdoor and indoor light harvesting in graphite-based perovskite solar cells (lecture), ABXPV18, Rennes, Frankreich, März 2018

A. Hinsch, Perovskite Solar Cells: a new approach for photovoltaics (invited lecture), Israel Sustainable Energy Society Annual Meeting ISES 2017, Tel Aviv University, Israel, 16th October 2017

A. Hinsch, How much electrochemistry is present in iodide based (in-situ) perovskite solar cells? (lecture), PSCO 2017, Oxford, September 2017, UK

L. Wagner, L. E. Mundt, G. Mathiazhagan, M. Mundus, S. Chacko, M. C. Schubert, S. Mastroianni, U. Würfel, A. Hinsch, S. W. Glunz, Real-Time Photovoltaic Evolvement During Perovskite Crystallization; (lecture), PSCO 2017, Oxford, September 2017, UK

K. Yasaroglu, S. Aydemir, S. Chacko, Simone Mastroianni, G. Schmerber, J.-L. Rehspringer, A. Slaoui, A. Hinsch, A. Dinia, Enhancement of macroporosity by sol-gel TiO₂/SnO₂ moulding of self-assembled polymer beads for monolithic perovskite solar cell (poster), PSCO 2017, Oxford, September 2017, UK

S.L. Subramaniam, K.Yasogorulu, L.Wagner, S.Chacko, W. Kwapil, L.E. Mundt, B.K.Das, M.C.Schubert, T. Kroyer, S. Mastroianni, A. Hinsch, Dark Lock-in Thermography Characterization: Towards a Pin-hole Free Hole-Blocking Layer (HBL) for Perovskite Solar Cells (poster), PSCO 2017, Oxford, September 2017, UK

L. Wagner, A. Prasanna, S. Chacko, S. Mastroianni, A. Hinsch, A Molten Salt Approach for Controlled Crystallization in *In-Situ* Perovskite Cells (poster), PSCO 2017, Oxford, September 2017, UK

A. Hinsch, How much electrochemistry is present in iodide based (in-situ) perovskite solar cells? (lecture), NEXT-Gen III: PV Materials, Groningen, 2-5. July 2017; The Netherlands

L. Wagner, L. Mundt, G. Mathiazhagan, M. Mundus, M. Schubert, S. Mastroianni, U. Würfel, A. Hinsch, S. Glunz, Monitoring of Crystallization Kinetics in Graphite Based Perovskite Solar Cells (poster), ICMAT - International Conference on Materials of Advanced Technologies Suntec, Singapore/ 18-23 June, 2017

L. Wagner, G: Mathiazhagan, V. Mergner, J. Barichello, J. Gleissner, S. Chacko, S. Mastroianni, A. Hinsch, In-situ monitoring of methylamine induced crystallization in graphite based mesoscopic perovskite cells, (poster), HOPV - Hybrid and Organic PV, Lausanne (Switzerland), 21-24 Mai, 2017

S.L. Subramaniam, J. Zielonka, S. Chacko, W. Kwapil, L.E. Mundt, B.K.Das, M.C.Schubert, T. Kroyer, S. Mastroianni, A. Hinsch, Optimization of Electron-Transport Layer in Perovskite Solar Cells by Characterization using Dark Lock-in Thermography (poster), HOPV - Hybrid and Organic PV, Lausanne (Switzerland), 21-24 Mai, 2017

A. Prasanna, L. Wagner, S. Mastroianni, A. Hinsch, Improved performance of encapsulated graphite based in-situ perovskite solar cell (poster), HOPV - Hybrid and Organic PV, Lausanne (Switzerland), 21-24 Mai, 2017

A. Hinsch, In-situ kristallisierte Perowskit-Solarzellen; ein neues Konzept für sehr kostengünstige Solarzellen, Workshop: Verbindungshalbleiter für die Photovoltaik, European Society of Thin Films, Dresden, 6th May 2017

L. Wagner, G. Mathiazhagan, A. Prasanna, S. L. Subramaniam, S. Chacko, S. Mastroianni, A. Hinsch, Developments towards stable lowest-cost perovskite solar modules, PVTC 2017, Marseille; April 27th 2017, France

A. Hinsch, S. Mastroianni, W. Veurman, L. Wagner, J. Barichello, L. Subramaniam, G. Mathiazhagan, A. Prasanna, L. Mundt, Developments for printable long-term stable perovskite solar cells, (invited lecture) Next Generation Solar Energy Meets Nanotechnology, November 23 - 25th 2016, Erlangen

A. Hinsch, S. Mastroianni, W. Veurman, L. Wagner, J. Barichello, L. Subramaniam, G. Mathiazhagan, A. Prasanna, Developments for printable long-term stable perovskite solar cells (PSC), (invited lecture) BMBF-Workshop "Perovskite Photovoltaics", October 4-5th 2016, Würzburg

A. Hinsch, S. Mastroianni, W. Veurman, L. Wagner, J. Barichello, L. Subramaniam, G. Mathiazhagan, A. Prasanna, Developments towards printable long-term stable perovskite solar cells (PSC), (invited lecture) ISOS 2016, October, 12-14th 2016, Freiburg

A. Hinsch, S. Mastroianni, W. Veurman, L. Wagner, J. Barichello, L. Subramaniam, G. Mathiazhagan, A. Prasanna, Development for stable lowest-cost in-situ perovskite solar cell (PSC) modules, September 28th 2016, International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics PSCO 2016 (lecture), Genova, Italy

S. L. Subramaniam, L. E. Mundt, S. Mastroianni, M. C. Schubert, A. Hinsch, Dark Lock-in Thermography to study the contact layers in unfilled In-situ Perovskite Solar Cells (poster), September 28th 2016, International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics PSCO 2016, Genova, Italy

L. Wagner, A. Prasanna, L. E. Mundt, G. Mathiazhagan, J. Barichello, J. Zielonka, S. Mastroianni, M. C. Schubert, A. Hinsch, Controlling Crystallization in In-Situ Perovskite Solar Cells (poster), September 28th 2016, International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics PSCO 2016, Genova, Italy

G. Mathiazhagan, J. Barichello, L. Wagner, M. Mundus, J. Zielonka, S. Mastroianni, A. Hinsch, Comparison of Graphite Based Perovskite Solar Cells and Efficiency Enhancement through Methylamine Induced Defect Healing, September 28th 2016, International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics PSCO 2016, Genova, Italy

A. Hinsch, S. Mastroianni, W. Veurman, L. Wagner, J. Barichello, L. Subramaniam, G. Mathiazhagan, A. Prasanna, „Concept and material development for ultra-low-cost perovskite solar cells (PSC)“, Eingeladener Vortrag auf European Material Research Society EMRS Fall Meeting, 19-22. September 2016, Warschau, Polen

Laura E. Mundt, Friedemann D. Heinz, Simone Mastroianni, Martin C. Schubert, Wilhelm Warta and Stefan Glunz, Micro-Spectroscopic Characterization of Perovskite Solar Cells,

International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics PSCO 2015 (poster)
Lausanne 27th to 29th September

Welmoed Veurman, Simone Mastroianni, Gayathri Matiazhagan, Andreas Hinsch, Towards Large-area Printing of Perovskite Solar Cell Modules Using Glass Frit as Sealing Material, International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics PSCO 2015 (poster)
Lausanne 27th to 29th September

Gayathri Matiazhagan, Simone Mastroianni, Welmoed Veurman and Andreas Hinsch, Graphite based perovskite solar cells, International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics PSCO 2015 (poster) Lausanne 27th to 29th September

Andreas Hinsch, Welmoed Veurman, Simone Mastroianni, The in-situ perovskite concept; a route towards ultra-low cost perovskite solar module, International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics PSCO 2015 (lecture) Lausanne 27th to 29th September

Andreas Hinsch, Up-scaling of glass frit sealed dye and perovskite solar cells using the in-situ approach, presented at Hybrid-Organic Photovoltaics Conference (HOPV), Rome Italy, Mai 2015 (invited lecture)

Simone Mastroianni, Friedemann D. Heinz, Jeong-Hyeok Im, Welmoed Veurman, Martin C. Schubert, Uli Würfel, Michael Grätzel, Nam-Gyu Park, Andreas Hinsch, Confirming the role of optimal crystallinity in high efficient CH₃NH₃PbI₃ perovskite solar cells by photo and electroluminescence imaging, presented at Hybrid-Organic Photovoltaics Conference (HOPV), Rome Italy, Mai 2015 (lecture) and at International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics PSCO 2015 (poster) Lausanne 27th to 29th September

Simone Mastroianni, Katrine Flarup Jensen, Welmoed Veurman, Henning Brandt, Andreas Hinsch, Electro and Photoluminescence Analysis of Dye Solar Cells and Mesoporous Perovskite Solar Cells, Solid state Solar Cell SSSC-14 conference, September 2014, Oxford UK und IPS20 conference, Juli 2014, Berlin (lecture)

Hinsch, A., Mastroianni, S., Brandt, Heinz, F., Schubert, M. C., & Veurman, W. "Introduction to in-situ produced perovskite solar cells; a new concept towards lowest module manufacturing costs", Conference Proceeding at 29th European EUPVSEC September 2014 (Amsterdam) and World Conference WCPEC-6 November 2014 (Kyoto, Japan) (lectures)

Über die Arbeiten zu in-situ Perowskitesolarzellen wurde auch in den Jahresberichten des Fraunhofer ISE 2014 + 2015 + 2016 + 2017 berichtet.

5.3 Pressemitteilung

Vom Fraunhofer ISE wurde am 16.5.2018 eine Pressemitteilung zu gedruckten Perowskitesolarzellen veröffentlicht in der insbesondere auch auf das vorliegende Projekt verwiesen wurde. Die Resonanz in den Medien war gut, so gab es z.B. einen längeren Artikel in der Süddeutschen Zeitung und einen kürzeren Bildbeitrag unter Neuigkeiten in Bild der Wissenschaften.

Der Link ist: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2018/gedruckte-in-situ-perowskitesolarzellen-ressourcenschoned-und-lokal-produzierbar.html>