



**Schlussbericht des Projekts 03EE1119E
DURCHBLICK-PV – Entwicklung von organischen Solarmodulen mit
hoher visueller Transparenz; Teilvorhaben: Materialscreening,
Charakterisierung und Simulation**

für:

Projektträger Jülich

Forschungszentrum Jülich GmbH

Geschäftsbereich Erneuerbare Energien/Kraftwerkstechnik

Fachbereich Photovoltaik (ESE1)

Förderkennzeichen: 03EE1119E

Vorhabenbezeichnung: DURCHBLICK-PV – Entwicklung von organischen
Solarmodulen mit hoher visueller Transparenz; Teilvorhaben: Materialscreening,
Charakterisierung und Simulation

Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2022 bis 30.06.2025

Berichtszeitraum: 01.04.2022 bis 30.06.2025

bearbeitet von:

Dr. Uli Würfel

22.01.2026

Anschrift:

Freiburger Materialforschungszentrum FMF

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Arbeitsgruppe Organische und Perowskitesolarzellen

Stefan-Meier-Str. 21, 79104 Freiburg

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Förderkennzeichen: 03EE1119E

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhalt

I.	Kurzdarstellung	5
1.	Aufgabenstellung.....	5
2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	7
5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
II.	Eingehende Darstellung.....	8
1.	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	8
2.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	14
3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	14
4.	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	15
5.	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	16
6.	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	16

Dieser Bericht umfasst 17 Seiten. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse darf nicht unvollständig oder im sinnentstellenden Zusammenhang erfolgen.

Freiburger Materialforschungszentrum FMF
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Arbeitsgruppe Organische und Perovskitsolarzellen
Freiburg, 22.01.2026

Dr. Uli Würfel

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Das Ziel des am Freiburger Materialforschungszentrums FMF der Universität Freiburg durchgeführten Teilvorhabens „Materialscreening, Charakterisierung und Simulation“ ist das Materialscreening sowie die Charakterisierung und opto-elektrische Simulation von organischen Solarzellen und -modulen mit hoher visueller Transparenz. Das Materialscreening bezieht sich dabei hauptsächlich auf organische Absorbermaterialien, die auf Grund ihrer speziellen optischen Eigenschaften in der Lage sind, den Nahinfrarotanteil des Sonnenspektrums effizient zu nutzen und gleichzeitig nur eine geringe Absorption im Sichtbaren aufweisen. Um sowohl die Konversionseffizienz als auch die visuelle Transparenz zu maximieren, wird die Nahinfrarotreflexion der Rückelektrode in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE und die optisch-elektrischen Eigenschaften der Frontelektrode in Zusammenarbeit mit Heraeus und dem Fraunhofer ISE optimiert.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Innerhalb der insgesamt 39-monatigen Projektlaufzeit (36 Monate reguläre Laufzeit plus 3 Monate kostenneutrale Laufzeitverlängerung) hat sich die organische Photovoltaik (OPV) dynamisch weiterentwickelt. Dies erfolgte hauptsächlich in Bezug auf die Steigerung des Wirkungsgrades, der auf kleinen Flächen jetzt bei über 20% liegt. Auch das Thema der semitransparenten OPV wird weltweit inzwischen intensiv verfolgt. Es ist klar zu erkennen, dass der Anteil an wissenschaftlich-technologischen Arbeiten auf dem Gebiet der OPV, der in China durchgeführt wird, stetig anwächst. Dennoch konnte mit diesem Projekt gezeigt werden, dass Deutschland im Bereich der anwendungsnahen Forschung und Entwicklung zum Thema semitransparente OPV mit an der Spitze steht. Das Konsortium war im Hinblick auf die Übertragung der von der Universität Freiburg und dem Fraunhofer ISE erzielten Ergebnisse auf die Industriepartner sehr gut aufgestellt. Nur auf dem Gebiet der photoaktiven organischen Halbleitern sind wir auf die Entwicklungen in anderen Teilen der Erde angewiesen.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt war so geplant, dass die Universität Freiburg zusammen mit dem Fraunhofer ISE den Zellstapel weiterentwickelt und optimiert. Dabei war das Konsortium bezüglich neuer organischer Absorbermaterialien von internationalen Entwicklungen abhängig. Alle anderen Komponenten konnten aber innerhalb des Konsortiums bereitgestellt und entwickelt werden bzw. es handelte sich um gut verfügbare Standardmaterialien.

Das Projekt lief so ab, dass die Universität Freiburg das Materialscreening von neuen organischen Halbleitern mit vielversprechenden optischen Eigenschaften durchführte. Konnte in Solarzellen verifiziert werden, dass auch die elektrischen Eigenschaften den Anforderungen genügten, wurden diese am Fraunhofer ISE auf größeren Flächen und für den Einsatz in Modulen getestet. Parallel dazu entwickelte Heraeus neue PEDOT:PSS Formulierungen und stellte diese in ausreichender Menge zur Verfügung. Diese wurden an der Universität Freiburg und später auf größeren Flächen auch am Fraunhofer ISE getestet. Ein weiterer Entwicklungsstrang an der Universität Freiburg und dem Fraunhofer ISE war die Rückelektrode, die gleichzeitig eine hohe visuelle Transparenz und eine starke Reflexion im Nahinfraroten aufweisen soll. Es wurden von sämtlichen Materialien die optischen Koeffizienten (Brechungsindex und Extinktionskoeffizient) bestimmt und auf dieser Grundlage umfangreiche optische Simulationen durchgeführt. Dies war entscheidend, weil es sich bei dem Schichtstapel um ein Dünnschichtinterferenzsystem handelt, und somit die Dicke jeder einzelnen Schicht im Stapel die optische Performanz beeinflusst. Durch die Simulationen konnten die optimalen Schichtdicken bestimmt werden und dadurch die Anzahl der Experimente reduziert werden.

Die im Sputterverfahren entwickelte Rückelektrode wurde dann vom Industriepartner Rowo im Rolle-zu-Rolle Verfahren auf flexible Substrate aufgebracht und zunächst sowohl am Fraunhofer ISE als auch bei ASCA getestet. Damit wurden dann am Fraunhofer ISE verschiedene Module im Sheet-to-Sheet Verfahren erfolgreich gefertigt und unter anderem auf ihre Langzeitstabilität hin untersucht. Anschließend wurden ASCA die Ergebnisse zur Verfügung gestellt und dort semitransparente Module komplett im Rolle-zu-Rolle Verfahren hergestellt.

Insgesamt wurden sehr gute Ergebnisse erzielt und alle Meilensteine des Projekts erreicht. Allerdings birgt die semitransparente organische Photovoltaik noch ein enormes Entwicklungspotenzial, welches durch weitere F&E-Projekte realisiert werden sollte, um den erarbeiteten Vorsprung zu sichern und auszubauen.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Vor Projektbeginn gab es an der Universität Freiburg und dem Fraunhofer ISE in einem kleineren Umfang bereits Aktivitäten im Bereich der semitransparenten organischen Photovoltaik. Dabei konnten jedoch zunächst nur relativ geringe Werte für die sogenannte light utilization efficiency (LUE) von unter 2% erreicht werden. Die LUE ist dabei definiert als das Produkt von Wirkungsgrad (PCE) und gemittelter visueller Transmission (AVT). Auch gab es bereits gewisse Erfahrungen sowohl mit optischen Simulationen als auch mit Elektroden auf der Basis von dünnen Silberschichten, aber die so wichtige Eigenschaft der starken Reflexion von Nahinfrarot-Strahlung bei gleichzeitig hoher visueller Transparenz war noch nicht hinreichend realisiert worden.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projektkonsortium bestand aus den Firmen Heraeus, Asca und Rowo Coating, sowie der Universität Freiburg und dem Fraunhofer ISE. Eine enge Kooperation bestand während der gesamten Projektlaufzeit mit dem Fraunhofer ISE bei der Bearbeitung der Themen Weiterentwicklung des Zellstapels, insbesondere von Front- und Rückelektrode sowie optische Charakterisierung und Simulationen. Mit der Firma Heraeus gab es eine intensive Zusammenarbeit bei der Optimierung der Frontelektrode. Mit den Firmen Rowo und Asca fand ein intensiver Austausch im Bereich der Elektroden- und Modulhochskalierung statt.

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die Mittel aus der Zuwendung wurden ausschließlich zur Erreichung der Ziele des Vorhabens verwendet. Im Folgenden werden die Ziele des Teilvorhabens, wie sie in der Vorhabenbeschreibung aufgelistet sind mit den während der Projektlaufzeit erzielten Ergebnisse gegenübergestellt.

- Screening von organischen Absorbermaterialien mit starker Absorption im Nahinfraroten und gleichzeitig geringer Absorption im Sichtbaren

Resultat: Es wurden verschiedene Donor:Akzeptor Kombinationen für die photoaktive Schicht mit entsprechenden optischen Eigenschaften getestet, u.a. PM2:BTP-eC9, PDPP4T-2F:PVA 3 oder auch PCE10:IEICO-4F. Dabei konnten vielversprechende Werte für die gemittelte visuelle Transmission (AVT) erreicht werden, mit PCE10:IEICO-4F beispielsweise auf Anhieb gute 45%. Allerdings stellte sich heraus, dass die elektrischen Eigenschaften dieser Materialien ungenügend waren, um gleichzeitig gute bis sehr gute Wirkungsgrade zu erzielen. Dies lag zum einen an zu niedrigen Werten für die Ladungsträgermobilität, zum anderen gab es Hinweise auf die Ausbildung einer unvorteilhaften Morphologie. Schließlich führt beides zu einer merklichen Reduktion des Füllfaktors. Ein Beispiel dafür, wie stark der Einfluss der Morphologie sein kann, ist das ternäre System PTB7th:CoI8DFIC:PC70BM. Hier waren die Ergebnisse zunächst enttäuschend, da neben einem niedrigen Füllfaktor auch die Kurzschlussstromdichte J_{sc} deutlich unter den aus den optischen Simulationen zu erwartenden Werten lag. Nach einer Reihe von Experimenten stellte sich heraus, dass das Aufschleudern der Lösung auf ein auf 100°C vorgeheiztes Substrat zu erheblich verbesserten Resultaten führte. Tatsächlich konnte der Wert für J_{sc} dadurch verdoppelt werden und lag damit sehr nah an dem maximalen Wert, der sich aus den optischen Simulationen ergibt, wenn sämtliche in der photoaktiven Schicht absorbierte Photonen zu extrahierten Ladungsträgern führen. Der Grund für dieses bemerkenswerte Verhalten liegt in einer Aggregation des Akzeptors CoI8DFIC, welches dann wesentlich stärker absorbiert. Da aber auch mit diesen Solarzellen keine hohen Werte für den Füllfaktor und die offene Klemmenspannung erzielt werden

konnten, konzentrierten wir uns aus Ressourcengründen auf das Material PV-X plus. Mit diesem ternären Materialsystem hatten wir bereits Erfahrungen gesammelt; es erlaubt sehr gute Wirkungsgrade und lässt sich hervorragend aus nicht-chlorierten Lösemitteln prozessieren. Sein einziger Nachteil besteht darin, dass es relativ stark im Sichtbaren absorbiert. Dieser optische Nachteil kann aber zu einem guten Teil ausgeglichen werden, indem es als möglichst dünne Schicht in Verbindung mit einer stark im NIR-Bereich reflektierenden Rückelektrode verwendet wird. Dies ist im Projektverlauf auch in hervorragender Weise gelungen, wie weiter unten im Detail ausgeführt.

- Detaillierte optische Charakterisierung (zusammen mit dem Fraunhofer ISE) der Absorbermaterialien und aller anderen im Zellstapel eingesetzten Materialien (Elektronen- bzw. Löchertransportmaterialien und Elektrodenmaterialien): Bestimmung der n & k -Werte

Resultat: Dies wurde wie folgt durchgeführt: zunächst wurde jedes verwendete Material einzeln auf Glas abgeschieden und die wellenlängenabhängige Transmission und Reflexion vermessen. Diese Datensätze dienten dann als Input für die Software SCOUT, mittels derer die n & k -Werte bestimmt wurden. Anschließend können dann beliebige aus diesen Materialien bestehende Zellstapel mit dem Transfer-Matrix Verfahren optisch simuliert werden und die in Bezug auf visuelle Transmission und NIR-Reflexion optimalen Schichtdicken ermittelt werden.

- Vollständige elektrooptische Simulation zur Optimierung der Dicken der einzelnen Schichten im Zellstapel

Resultat: Die Ladungsträgergenerationsrate in der photoaktiven Schicht als Ergebnis der optischen Simulationen wurde für elektrische Simulationen von ausgewählten Zellstapeln verwendet. Dabei konnte erwartungsgemäß verifiziert werden, dass ausreichend hohe Ladungsträgermobilitäten nötig sind, um einen hohen Füllfaktor zu erreichen. Ferner ist es entscheidend, die Oberflächenrekombination stark zu begrenzen, um eine hohe offene Klemmenspannung zu gewährleisten.

- Experimentelle Realisierung und Optimierung der Solarzellen mit den (als Startpunkt) sich aus der Simulation ergebenden Schichtdicken

Resultat: Dies wurde direkt umgesetzt, und es hatte entscheidenden Anteil daran, dass die Anzahl der Experimente erheblich begrenzt werden konnte. Anschaulich gesprochen ist die Identifikation der optimalen Schichtdicken mit Hilfe von optischen Simulationen erheblich schneller zu bewerkstelligen als die Fertigung und Charakterisierung von kompletten Solarzellen. Dadurch konnten die Solarzellen entsprechend schneller experimentell optimiert werden.

- Testen neuartiger hochtransparenter aus Lösung prozessierbarer Elektroden auf der Basis von PEDOT:PSS (von Heraeus), detaillierte Charakterisierung und Verlustanalyse

Resultat: Hier konnten hervorragende Ergebnisse erzielt werden. Heraeus entwickelte verschiedene neue Formulierungen von PEDOT:PSS, welches als transparentes, leitfähiges Material in der Frontelektrode eingesetzt wird. Durch eine deutliche Steigerung der Leitfähigkeit bei gleichzeitig moderater Erhöhung der visuellen Transmission konnte eine innovative Neuerung vorgenommen werden; das Silbergitter in der Frontelektrode konnte komplett weggelassen werden. Dieser Punkt klingt trivialer als er ist, weshalb der Zusammenhang im Folgenden detaillierter dargestellt werden soll. Generell gilt, dass es sich bei den in der Frontelektrode eingesetzten Materialien immer um einen Kompromiss zwischen Leitfähigkeit und Transparenz handelt, da eine höhere Leitfähigkeit im Allgemeinen mit einer niedrigeren Transparenz einhergeht. Aufgrund der höheren Leitfähigkeit der neuen PEDOT:PSS Formulierung (SCA2003 R&D grade) konnten wir auch ohne Silbergitter in der Frontelektrode hohe Füllfaktoren erreichen. Dies führt zu einem doppelten Gewinn, weil zum einen jetzt auch dort, wo sich sonst das Silbergitter befunden hätte, Licht in die photoaktive Schicht eindringt und somit direkt zu einer Erhöhung der Ladungsträgergeneration und damit des Wirkungsgrads beiträgt. Darüber hinaus kann aber auch mehr sichtbares Licht hindurchgelassen werden, wodurch die AVT ansteigt. Bei der Hochskalierung von Einzelzellen zum serienverschalteten Modul kommt noch ein weiterer Kompromiss hinzu; hier führt die Strukturierung der verschiedenen Schichten mittels Laser zu einer inaktiven Fläche bei jeder Verschaltung zwischen zwei Zellen. Dies würde für einen großen Wert der Zellstreifenbreite sprechen, weil dann der sogenannte geometrische Füllfaktor, also das Verhältnis von aktiver zur Gesamtfläche, besser wird. Allerdings müssen die Ladungsträger dann auch eine weitere Strecke in der transparenten Elektrode (das ist die Elektrode mit der niedrigeren elektrischen Leitfähigkeit – die Rückelektrode weist eine

wesentlich höhere elektrische Leitfähigkeit auf) bis zur hochleitfähigen Verschaltung zurücklegen, was wiederum zu einer Reduktion des Füllfaktors führt. Eine geringe Zellstreifenbreite ist also vorteilhaft für das Erreichen von hohen Werten des Füllfaktors, führt aber auch – aufgrund der dann häufigeren Serienschaltung pro Breitereinheit – zu einem höheren Flächenverlust. Offensichtlich hat eine Frontelektrode, die nur aus PEDOT:PSS besteht, eine niedrigere elektrische Leitfähigkeit als eine, die mit einem Silbergitter versehen ist. Dies erfordert also eine geringe Zellstreifenbreite und somit mehr Serienschaltungen pro Breitereinheit. Da aber im Projekt auch der Laserprozess für die Strukturierung entsprechend optimiert worden ist, konnte die Verlustbreite sehr stark, auf deutlich unter 100 µm minimiert werden. Dies erlaubt nun, die innovative Neuerung der metallfreien Frontelektrode von der Ebene kleinflächiger Zellen auf (im Prinzip beliebig große) Module zu übertragen. Tatsächlich fanden wir durch numerische Simulationen heraus, dass das Optimum bei einer Zellstreifenbreite (inkl. Verschaltung) von nur 1,25 mm liegt. Aufgrund des hochpräzisen Laserprozesses konnte dennoch ein geometrischer Füllfaktor von über 95% realisiert werden. Diese Fortschritte konnten zum einen erzielt werden, weil Heraeus ein deutlich verbessertes Material entwickelte und in ausreichender Menge zur Verfügung stellte. Zum anderen bedurfte es einer intensiven Optimierung des Laserprozesses und einer präzisen Charakterisierung und numerischen Simulation in Bezug auf die elektrischen und optischen Eigenschaften der Materialien bzw. des gesamten Zellstapels.

- Herstellung und Charakterisierung von organischen Solarzellen mit den erwähnten Absorbermaterialien auf neuartigen, gesputterten Substrat-Elektrodensystemen mit hoher visueller Transmission und erhöhter Nahinfrarot-Reflexion sowie der neuartigen Topoelektrode auf Basis von PEDOT:PSS; Identifizierung des Optimierungspotenzials durch detaillierte Charakterisierung und elektro-optische Simulation

Resultat: Dies wurde ebenfalls mit großem Erfolg durchgeführt. Wie oben beschrieben, wurden zunächst die optimalen Schichtdicken durch optische Simulationen identifiziert und dann sämtliche Schichten in der entsprechenden Dicke abgeschieden. Obwohl die erreichten Werte bereits sehr gut waren in Bezug auf Wirkungsgrad und Transmission, stellten wir durch intensitätsabhängige Messungen fest, dass ein erheblicher Anteil der gefertigten kleinflächigen Solarzellen einen geringen Parallelwiderstand aufwies. Dies führt erfahrungsgemäß insbesondere bei der Hochskalierung zu Problemen, weil

beispielsweise bereits ein lokaler Kurzschluss pro Zelle ausreicht, die Leistung eines großflächigen Moduls stark zu begrenzen. Aus diesem Grund musste der Zellaufbau nochmals geändert werden, um einen hohen Parallelwiderstand sicherzustellen. Eine Reihe von Experimenten gab Aufschluss darüber, dass eine zusätzliche nasschemisch prozessierte, nanopartikuläre ZnO-Schicht, die direkt auf der Rückelektrode abgeschieden wird und auf die dann die photoaktive Schicht aufgebracht wird, den gewünschten Effekt zeigt. Da es sich bei dem gesamten Zellstapel aufgrund der geringen Schichtdicken um ein Dünnschicht-Interferenzsystem handelt, hatte das Einbringen der zusätzlichen ZnO-Schicht, wiewohl nur ca. 30 nm dick, eine erhebliche Verschlechterung der optischen Eigenschaften zur Folge. Dies drückte sich vor allem in einer deutlich verringerten Kurzschlussstromdichte als Konsequenz reduzierter NIR-Reflexion aus.

Nun musste der Zellstapel angepasst werden, um die vorteilhaften optischen Eigenschaften auch im Falle der zusätzlichen ZnO-Schicht zu erreichen. Dies war aufgrund der etablierten Prozessabfolge – Messung von Transmission und Reflexion (in dem Fall des ZnO, da es von allen anderen Materialien ja bereits geschehen war) – Ermittlung der n & k -Werte – optische Simulationen zur Optimierung des gesamten Zellstapels eine zügig zu erledigende Aufgabe. Ein weiterer Faktor war die Qualität der gesputterten Rückelektrode. Eine eingehende Analyse mittels mikroskopischer Aufnahmen der Elektroden sowie Suns- V_{OC} Messungen von Solarzellen ergab, dass die Elektroden Verunreinigungen aufwiesen, die zu Kurzschlüssen führen können. Deshalb wurde eine Box konstruiert, die die Gläser und Folien in der Vorkammer der Sputteranlage schützt und die dann mittels Magneten geöffnet werden kann, wenn sich die Proben in der Sputterkammer befinden. Dies stellte sich, zusammen mit der zusätzlichen ZnO-Schicht als effektive Maßnahme zur Unterdrückung bzw. starken Reduzierung der lokalen Kurzschlüsse heraus.

Anschließend konnte mit den durch optische Simulationen bestimmten Schichtdicken und den saubereren Rückelektroden die bisher höchsten Werte für die LUE erreicht werden. Konkret waren dies ein Wirkungsgrad von 8,79%, eine AVT von 51,9% und eine LUE von 4,56.

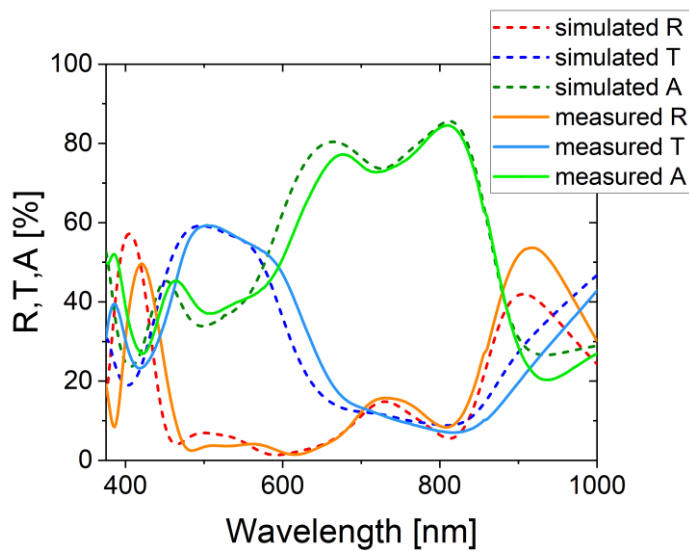
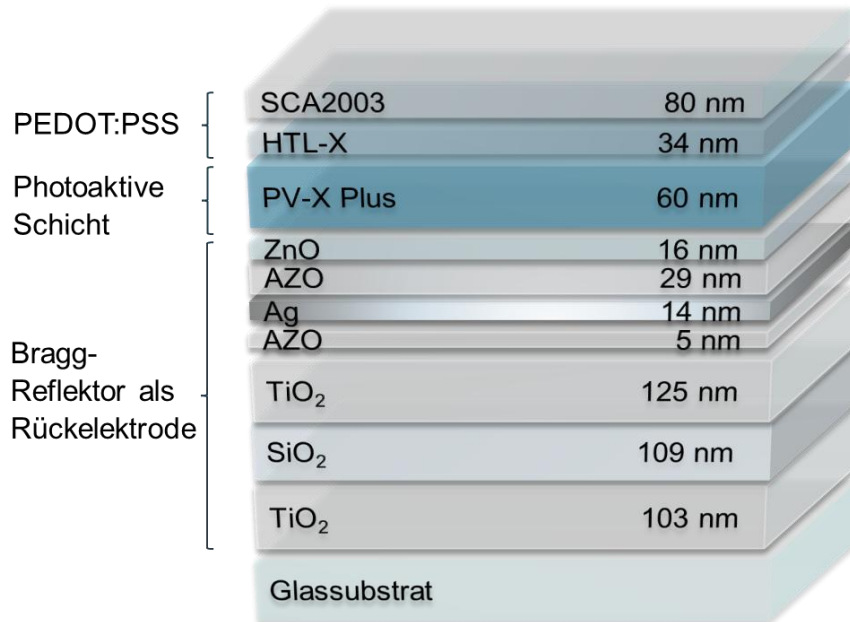


Abbildung 1: Oben: Optimierter Zellstapel, mit dem eine visuelle Transmission von 52 % und ein Wirkungsgrad von 8.79 % erreicht wurden. Unten: Reflexions-, Transmissions- und Absorptionsspektren (gestrichelt: optische Simulationen; durchgezogen: experimentelle Messungen).

In Abbildung 1 ist der finale Zellstapel zu sehen, die obere Elektrode aus 2 verschiedenen PEDOT:PSS Formulierungen ist insgesamt 114 nm dick, die organische Absorberschicht ist nur 60 nm dick. Unten ist der wellenlängenabhängige Verlauf von Reflexion, Transmission und Absorption zu sehen, wobei die gestrichelten Linien die Ergebnisse der optischen Simulationen und die durchgezogenen Linien die der experimentellen Messungen sind.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Insgesamt summierten sich die Ausgaben auf den Gesamtbetrag von 328.290,89 €. Davon beliefen sich 298.507,094 € auf Ausgaben für Personal. Für Materialien wurden insgesamt 29.782,95 € verausgabt. All diese Ausgaben waren notwendig, um das Projekt erfolgreich durchzuführen.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der kommerzielle Massenmarkt für Stromerzeugung ist für die organische Photovoltaik noch nicht zugänglich, dazu sind Photovoltaikmodule aus kristallinem Silizium (c-Si), die vor allem aus China stammen, noch zu weit weg in Bezug auf Wirkungsgrad und Langzeitstabilität. Inzwischen gibt es organische Solarzellen mit Wirkungsgraden jenseits der 20 %, aber noch nicht auf der Ebene von Rolle-zu-Rolle gefertigten Modulen mit großer Fläche. Es ist deshalb im Moment und für die nähere Zukunft davon auszugehen, dass der organischen Photovoltaik der Markteintritt zunächst in den Anwendungsfeldern gelingt, in denen sie ihre spezifischen Vorteile deutlich ausspielen kann. Für die Versorgung von elektronischen Bauelementen des sogenannten Internet-of-Things vor allem in Innenräumen unter Kunstlichtquellen ist das die im Vergleich zu c-Si größere, und zudem anpassbare Bandlücke. Hier ist der Markteintritt bereits Realität, und es zeichnet sich ab, dass der größte Konkurrent die Perowskit-Photovoltaik ist. Ein im Vergleich wesentlich größerer Markt ist jedoch der der „durchsichtigen“ Solarzellen, sei es im Bereich der gebäudeintegrierten Photovoltaik oder in der Landwirtschaft, der sogenannten Agri-Photovoltaik.

Die Arbeiten der Universität Freiburg im Verbund mit den Projektpartnern waren im Bereich der Entwicklung und Optimierung des gesamten Zellstapels von

semitransparenten organischen Solarzellen im vorliegenden Vorhaben DURCHBLICK-PV sehr erfolgreich. Dies lässt sich insbesondere klar erkennen an der deutlichen Steigerung der sogenannten „light utilization efficiency“ (kurz LUE, das Produkt aus Wirkungsgrad und gemittelter visueller Transmission) auf nun Werte jenseits von 4,5. Darüber hinaus konnte im Projekt, federführend durch das Fraunhofer ISE, gezeigt werden, dass der von der Universität Freiburg und dem Fraunhofer ISE gemeinsam entwickelte Zellstapel hervorragend für die Hochskalierung auf Modulebene geeignet ist.

Sämtliche von der Universität Freiburg im Vorhaben durchgeführten Arbeiten waren notwendig und der Einsatz der Ressourcen war angemessen. Die zielgerichtete Entwicklung hat die im Antrag gemachten Voraussagen klar übertroffen und konnte somit einen starken Beitrag zur Weiterentwicklung des Themenfelds der organischen Photovoltaik mit hoher visueller Transmission leisten. Dies kommt auch dem Verwertungsplan sehr zugute.

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die in diesem Vorhaben von der Universität Freiburg und dem Fraunhofer ISE in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern erreichten Ergebnisse haben national und international Beachtung gefunden. So konnte die Kombination von Wirkungsgrad und visueller Transmission deutlich gesteigert werden. Dabei ist zu betonen, dass diese sehr guten Ergebnisse auf einem Zellstapel beruhen, der sich hervorragend zur Hochskalierung eignet. Somit lässt sich in Folgeprojekten nahtlos an das hier Erreichte anknüpfen. Durch die Veröffentlichungen der Ergebnisse in renommierten Fachzeitschriften und auf internationalen Konferenzen konnte sich die Universität Freiburg im Feld der semitransparenten organischen Photovoltaik etablieren. Da es unter Betrachtung des Potenzials dieser Technologie und des erreichten Fortschritts sehr viel Sinn ergibt, diese weiter zu beforschen und die Entwicklung weiter voranzutreiben, ist die oben erwähnte Positionierung der Universität Freiburg von großer Bedeutung. Weiter ist zu betonen, dass sich potenzielle neuartige Absorbermaterialien – insbesondere solche mit geringerer Absorption im Sichtbaren und stärkerer im Nahinfraroten – sehr gut in den entwickelten Zellstapel integrieren lassen.

Selbstverständlich erfordert dies dann eine Anpassung der Dicken aller verschiedenen Schichten, aber dies lässt sich mit Hilfe zielgerichteter optischer Simulationen vergleichsweise schnell erreichen. Die Ergebnisse aus dem Projekt DURCHBLICK-PV lassen sich somit sehr gut in zukünftigen Aktivitäten verwenden.

5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Laufzeit des Vorhabens wurde auch andernorts an der Steigerung der Kombination aus Wirkungsgrad und visueller Transmission von organischen Solarzellen gearbeitet. Dabei entfällt, wie bereits in den letzten Jahren zu beobachten war, der größte Teil auf Arbeitsgruppen in China. So konnte die LUE auf Werte von über 6 gesteigert werden. Allerdings handelt es sich bei den für die hohen LUE-Werte verwendeten Zellstapel nicht um vielversprechende Kandidaten für eine Hochskalierung, sie sind schlicht zu komplex, bestehen aus zu vielen aufeinanderfolgenden Schichten. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt lässt sich deshalb festhalten, dass die im Projekt DURCHBLICK-PV erzielten Ergebnisse nicht die absolut höchsten LUE-Werte darstellen, sie sich aber positiv abheben, wenn man die Hochskalierbarkeit mit in die Betrachtung einschließt.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die Ergebnisse, die im Projekt DURCHBLICK-PV erzielt werden konnten, wurden in 3 Artikeln in renommierten wissenschaftlichen Fachzeitschriften publiziert. Dabei handelt es sich um die folgenden Veröffentlichungen:

- L. Pap, B. Schirmacher, E. Bloch, S. Bogati, P. Viehmann, A. Scheel, D. Müller, M. List, B. Zimmermann, and U. Würfel: “Improved Light Utilization Efficiency for an ITO-Free Semitransparent Organic Solar Cell Using a Multilayer Silver Back Electrode as Infrared Mirror“, *Solar RRL* **2023**, 7, 2300561
- L. Pap, B. Schirmacher, E. Bloch, C. Baretzky, B. Zimmermann, and U. Würfel: “Dielectric Bragg Reflector as Back Electrode for Semi-Transparent Organic Solar Cells with an Average Visible Transparency of 52%“, *Solar RRL* **2024**, 8, 2400399

- L. Pap, M. List, R. Haberstroh, L. Bienkowski, M. Mattenheimer, T. Kroyer, B. Zimmermann, and U. Würfel: “Metal-Less Top-Electrode Semi-Transparent Organic Solar Modules with an Average Visible Transmission of 51% and a Light Utilization Efficiency of 4%“, *Advanced Science* **2025**, 12, e07521

Eine weiteres Manuskript über Module auf Galssubstraten mit über 200 cm² Aperturfläche, bei denen bis auf die gesputterte Rückelektrode sämtliche Schichten mittels slot-die coating abgeschieden wurden, die Untersuchung ihrer Langzeitstabilität sowie flexible Module inkl. Biegetests ist nun fertiggestellt und wird eingereicht.

Darüber hinaus wurden die Ergebnisse auch in mehreren Vorträgen auf verschiedenen internationalen Konferenzen präsentiert.