

Abschlussbericht

zum Vorhaben

Easy Coat - Fertigung von Elektroden mit innovativen, transparent-leitfähigen Schichten als Grundlage für organische Solarfolien, KfW-Az NKa3-003443

Zuwendungsempfänger/-in

ROWO Coating Gesellschaft für Beschichtung mbH

Umweltbereich

Ressourcen, Klimaschutz

Laufzeit des Vorhabens

19.10.2021 – 31.07.2022

Autor/-en

Dr. Roland Müller

Gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Datum der Erstellung

11.11.2022

Berichts-Kennblatt

Aktenzeichen UBA: UIP-003443	Projekt-Nr.: NKa3-003443
Titel des Vorhabens: Easy Coat - Fertigung von Elektroden mit innovativen, transparent-leitfähigen Schichten als Grundlage für organische Solarfolien	
Autor/-en (Name, Vorname): Müller, Roland, Dr.	Vorhabenbeginn: 19.10.2021
	Vorhabenende: 31.07.2022
Zuwendungsempfänger/-in (Name, Anschrift): ROWO Coating Gesellschaft für Beschichtung mbH Allmendstraße 7 79336 Herbolzheim	Veröffentlichungsdatum: 11. November 2022
	Seitenzahl: 19
Gefördert im BMU-Umweltinnovationsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit	
Kurzfassung (max. 1.500 Zeichen): ROWO und seine Partner haben umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der organischen Photovoltaikzellen durchgeführt. Eines der wichtigsten Ergebnisse war die Substitution von Elektrodenschichten auf Indiumbasis durch Ag-dotiertes Aluminium-Zink-Oxid (AZO). Dieses Projekt ermöglichte zum ersten Mal eine großtechnische Anlage zur kontinuierlichen Produktion von AZO-basierten Elektroden für organische Photovoltaik-Folien. Insgesamt konnten durch das Projekt > 4050 t CO2 eingespart werden. Durch die Nutzung dieser Technologie wurden die Produktionskosten erheblich gesenkt und die Produktion organischer Photovoltaik auf den Weg gebracht, um mit den klassischen, auf Silizium basierenden Photovoltaikmaterialien zu konkurrieren.	
Schlagwörter: organische Photovoltaik (OPV), transparente Elektrode, Roll Coater	
Anzahl der gelieferten Berichte Papierform: 0 Elektronische Datenträger: 0	Sonstige Medien: Dateiformat: docx (1); Dateiformat .pdf (1) Veröffentlichung im Internet geplant auf der Webseite: 1

Report Coversheet

Reference-No. Federal Environment Agency: NKA3-003443	Project-No.: UIP-003443
Report Title: Easy Coat - Production of electrodes with innovative, transparent conductive layers as a basis for organic solar films	
Author/Authors (Family Name, First Name): Müller, Roland, Dr.	Start of project: 19.10.2021
	End of project: 31.07.2022
Performing Organisation (Name, Address): ROWO Coating Gesellschaft für Beschichtung mbH Allmendstraße 7 79336 Herbolzheim	Publication Date: 11 th November 2022
	No. of Pages: 19
Funded in the Environmental Innovation Programme of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety.	
ROWO and associates undertook extensive research and development in organic photovoltaic cells. One of the main outcomes was the substitution of indium-based electrode layers by Ag-doped Aluminium-Zinc-Oxide (AZO). For the first time ever, this project enabled large scale continuous production of AZO-based electrodes for organic photovoltaic films. In total, the project saved > 4050 t CO ₂ . Harnessing this technology greatly reduced production cost and put the production of organic photovoltaics on track to effectively compete with classic, silicon-based photovoltaic materials.	
Keywords: OPV, transparent electrode, roll coater	

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	4
1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens	4
1.2. Ausgangssituation	4
2. Vorhabenumsetzung	7
2.1. Ziel des Vorhabens	7
2.2. Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)	8
2.3. Umsetzung des Vorhabens	9
2.4. Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)	11
2.5. Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten	11
3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung	11
3.1. Bewertung der Vorhabendurchführung	11
3.2. Stoff- und Energiebilanz	12
3.3. Umweltbilanz	14
3.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse	15
3.5. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren	15
4. Übertragbarkeit	15
4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung	15
4.2. Modellcharakter/Übertragbarkeit (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens/der Anlage/des Produkts)	16
4.3. Kommunikation der Projektergebnisse	16
5. Zusammenfassung	17
6. Summary	17
7. Literatur	18

1. Einleitung

1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens

Das mit der Projektdurchführung betraute Unternehmen ROWO beschäftigt sich seit der Gründung 1991 mit der Beschichtung von flexiblen Substraten von Rolle zu Rolle mittels verschiedener Vakuumbeschichtungsverfahren. Abhängig von der geforderten Funktionalität kommen entweder thermisches Verdampfen oder Kathodenzerstäubung (Sputtern) als Beschichtungsverfahren zum Einsatz. Bislang können Rollen bis zu einer Breite von 1.650 mm und einem maximalen Rollendurchmesser von 1.200 mm beschichtet werden. Das Material kann auf Hülsen verschiedener Durchmesser (76 mm, 120 mm oder 152 mm) gewickelt werden. Die Plasmabehandlung von Polymeroberflächen im Vakuum kann ebenfalls in einer der Anlagen durchgeführt werden. Eine solche Oberflächenaktivierung verbessert die Haftung von Beschichtungen aller Art (bspw. Drucke, Lacke, Klebstoffe). Mit zwei modernen Rollenschneidern kann das beschichtete Material auf die gewünschte Breite und Länge konfektioniert werden. Darüber hinaus setzt ROWO Forschungs- und Entwicklungsprojekte um. Beispielsweise liegt ein Entwicklungsschwerpunkt vergangener Forschungsprojekte auf der Entwicklung transparent-leitfähiger Mehrschichtsysteme auf Basis von Metallen und Metalloxiden. Kundenanforderungen an Schichtsysteme sind dabei so vielfältig, dass neben konventioneller Aufdampftechnik u. a. auch plasmagestützte Verfahren kombiniert eingesetzt werden. Die Beschichtungen kommen insbesondere in den Bereichen Lebensmittelindustrie (Barriere- und Dekorationsbeschichtungen für Lebensmittelverpackungen), Bauindustrie (Dachunterspannbahnen für Wärmedämmung/Sonnenreflexion, diverse Wärmedämmmaterialien, Sonnenschutz wie Gewebe, Vliese, Rollos, Fenster, bis hin zu herbiziden Wurzelsperren auf Flachdächern) sowie der Medizintechnik (Wirkpflaster, transparente Elektroden für verschiedene Diagnosesysteme, Sensortechnik für die Biomedizin, bakterizide Wundauflagen) zum Einsatz. ROWO hat beispielsweise u. a. gemeinsam mit der Weberei Schilgen das Gewebe für die Reichstagsverhüllung des Künstlers Christo geliefert (1995). Die 140.000 m² Gewebe wurden von ROWO hierzu mit Aluminium beschichtet. ROWO erwirtschaftet einen Umsatz von 3,9 Mio. EUR bei 26 Mitarbeitern und einer Bilanzsumme von 3,424 Mio. EUR (Stand: 2020). Herr Dr. Roland Müller und Herr Dr. Wolfgang Siefert sind die Gesellschafter und Geschäftsführer des Unternehmens. Somit ist ROWO gemäß EU Verordnung Nr. 651/2014 vom 26.06.2014 ein eigenständiges Kleinunternehmen (KMU).

1.2. Ausgangssituation

Zum Zeitpunkt der Planung und zu Beginn des Vorhabens stellte sich die Situation wie folgt dar:

Organische Photovoltaikzellen (respektive OPV-Module) sind das weiterentwickelte Prinzip der klassischen und bekannten (anorganischen/Silizium-) Halbleiter Photovoltaikzellen, die bspw. auf Hausdächern installiert werden. OPV-Zellen basieren auf organischen Kohlenwasserstoffverbindungen mit einer speziellen Elektronenstruktur, dem konjugierten π -Elektronensystem, das den Materialien die wesentlichen Eigenschaften amorpher Halbleiter verleiht. Der wahrscheinlich bekannteste Unterschied zwischen der OPV-Technologie und anorganischen Zellen ist, dass sich die OPV-Chemikalien mittels herkömmlicher Polymer-Drucktechnik und Rolle zu Rolle Fertigungsanlagen auf eine Folie aufbringen lassen, wodurch eine biegsame Photovoltaikzelle entsteht (siehe Abbildung 1). Aus Sicht der Herstellung ergeben sich dadurch bereits weitreichende Vorteile gegenüber aus Quarzsand gewonnenen Wafern und daraus resultierenden Photovoltaikzellen. Aus Sicht des Produktes ist zudem eine deutlich bessere Biegebeanspruchung möglich, als es mit siliziumbasierten Photovoltaikzellen möglich ist. Dadurch erschließen sich wiederum zahlreiche neue Anwendungsmöglichkeiten.

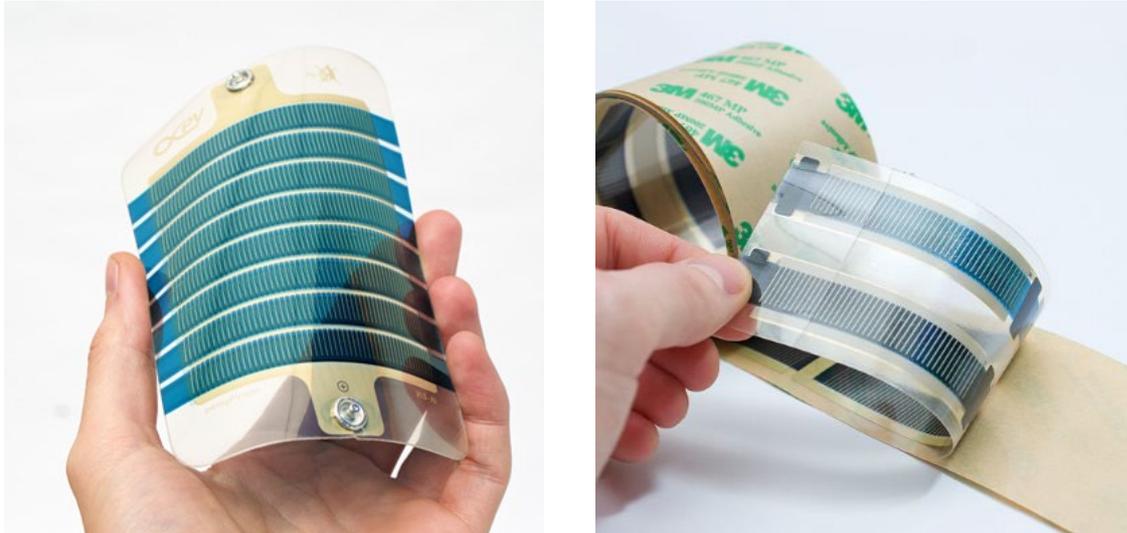
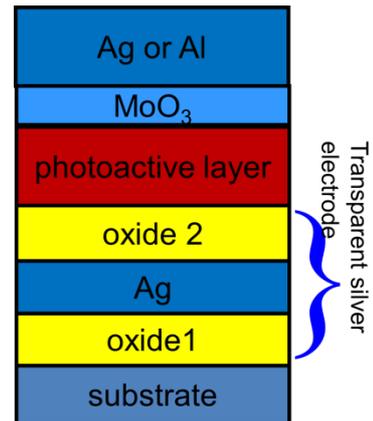


Abbildung 1: Beispiele biegsamer Photovoltaikzellen. Quelle: ROWO

Die OPV-Technologie stand somit zu Beginn des Vorhabens in technologischer Konkurrenz zu den siliziumbasierten Systemen und steht es auch weiterhin. Es existieren jedoch noch wenige Anwendungen für OPV-Module, was letztlich auf den in der Anfangsphase noch aufwendigeren und kostenintensiveren Herstellungsprozess im Verhältnis pro erzeugtem Watt Leistung zurückzuführen ist. Allerdings sind die Unterbaukosten klassischer PV-Systeme deutlich höher als die von OPV-Folien und machen bis zu 50 % der Installationskosten aus. Zudem liegt der Wirkungsgrad von OPV mit 8 % noch unter den ca. 20 % Wirkungsgrad siliziumbasierter Halbleiter, was die Kosten pro Leistungseinheit mit erklärt. Jedoch wurden in Laborversuchen bereits 20 % erzielt, was früher oder später auch in den industriellen Maßstab überführt werden wird. Wichtig hierbei ist, dass es klare physikalische Grenzen bei der Ausweitung des Wirkungsgrades von Silizium-Halbleitern gibt, die bei OPV noch nicht erreicht sind: *„Herkömmliche kristalline Siliziummodule, die gegenwärtig einen Wirkungsgrad von rund 20 Prozent erreichen, sind in ihrer Entwicklung beschränkt. Sie können aus physikalischen Gründen nur etwa 30 Prozent der einfallenden Sonneneinstrahlung nutzen, was dem möglichen Wirkungsgrad relativ enge Grenzen setzt. Eine solche obere Schranke existiert für organische Solarzellen nicht. Das liegt zunächst daran, dass ständig neue Materialien entwickelt werden, deren genaue Eigenschaften heute noch niemand kennen kann.“*^[1] Die Einsatzmöglichkeiten biegsamer OPV-Zellen sind im Vergleich zu den starren (bzw. teilbiegsamen) Silizium-Zellen darüber hinaus vielfältiger und werden im Falle der Beherrschung der bislang aufwendigen Produktion einen Paradigmenwechsel in der Photovoltaikindustrie einleiten, hin zu nahezu überall integrierbarer Photovoltaik auf Folien zu günstigen Preisen bei potentiell steigenden Wirkungsgraden und uneingeschränkter Integrierbarkeit in unterschiedlichste Anwendungen. Realistische Anwendungsgebiete sind beispielsweise in Fahrzeugkarosserien aufgebrachte OPV-Zellen, die zur Ladung der Batterie im Elektrofahrzeug genutzt werden können, „Gebäudeintegrierte Photovoltaik“ (GIPV), bis hin zu Stadionverkleidungen oder zwischen Fensterscheiben laminierte Photovoltaikmodule. Teilweise finden OPV auch hier schon in der Praxis Anwendung. Die Integration in Zeltplanen oder Kleidung sind ebenso denkbare Anwendungsgebiete, so dass auch der Consumer Sektor hiervon profitieren kann. Das wirtschaftliche Potential ist sehr groß, allerdings existieren aufgrund des beschränkten Produktangebots noch keine Studien hierzu. 2021 wurde in Deutschland 5 GW_p neue PV-Kraftwerkskapazität gemeldet. Um den Gesamtbedarf zu decken, müssten jedoch 215 – 515 GW_p installiert werden.^[2] Aufgrund der begrenzten Flächen in Deutschland sind daher neue Anwendungsmöglichkeiten unabdingbar. Ein zentraler Meilenstein für die gesamte Branche ist es, wenn sich die Kosten pro erzeugtem Watt zugunsten der OPV-Module ändern, trotz des noch geringeren Wirkungsgrades. Durch eine effiziente und kostengünstige Produktion wird eine Kettenreaktion ausgelöst werden, die zu zahlreichen neuen Anwendungen der OPV führt.

Eine OPV-Zelle besteht aus mehreren übereinanderliegenden Schichten (vgl. Abbildung 2). Zuoberst ist hinter einer Barrierschicht die transparente Elektrode angebracht (Polyesterfolie mit transparent-leitfähiger Beschichtung), die den erzeugten Strom ableitet. Darunter kommen photoaktive Schichten und eine weitere Barrierschicht, die im Wesentlichen die Zelle kapselt und vor Witterungseinflüssen schützt. ROWO stellt die transparent-leitfähige Elektrode her und liefert diese an Partnerfirmen zur Aufbringung der weiteren Schichten.



Elektrode im Stand der Technik: Für die Herstellung transparenter Elektroden, die u. a. auch in Flüssigkristallbildschirmen, organischen Leuchtdioden und Touchscreens benötigt werden, wird, aufgrund seiner Halbleitereigenschaft und Transparenz für sichtbares Licht, der Werkstoff ITO (Indiumzinnoxid) verwendet. Diese Eigenschaften machen ihn auch zum Kandidaten für die Herstellung organischer Photovoltaik, allerdings ist ITO in vielerlei Hinsicht problematisch. So hat sich sein Preis in den letzten Jahren vervielfacht und liegt heute auf dem Niveau von Silber. Weiter beschränkt seine geringe Verfügbarkeit mittelfristig die Verwendung für die Massenherstellung von Solarfolien.

Abbildung 2: Aufbau einer OPV-Solarzelle. Auf einer Polyesterfolie ("substrate") ist eine dünne Schicht aus Silber (~10 nm) zwischen zwei Oxidschichten angeordnet. Die Oxidschichten entspiegeln das Silber, um eine hohe Transmission zu erhalten. Eine weitere Herausforderung besteht darin, die Silberschicht zu stabilisieren und deren Agglomeration zu verhindern. Die darüber liegenden Schichten (photoactive layer, etc.) werden vom Kunden aufgebracht. Quelle: ROWO

Fertigungsverfahren im Stand der Technik: Der Herstellungsprozess ist ein Rolle-zu-Rolle-Verfahren (vgl. Abbildung 3). Letzteres bietet im Vergleich zur Herstellung klassischer PV erhebliche Vorteile in der Produktionstechnik (vereinfachtere, schnellere Fertigung):

Klassische PV-Produkte beginnen mit der Herstellung eines Silizium-Einkristalls, der aus einer Siliziumschmelze (Prozesstemperatur > 1.400 °C) gezogen wird. Im nächsten Schritt werden daraus hauchdünne Scheiben (Wafer) gesägt, dabei gehen bis zu 50 % des Materials als „Sägespäne“ verloren. Die Verarbeitung eines Siliziumwafers zu PV-Modulen führt über Ätzbäder, Texturierung, Phosphordotierung (bei 900 °C), Siliziumnitridbeschichtung (ca. 400 °C) und Siebdruck der elektrischen Kontaktstreifen (Einbrennen bei ca. 900 °C). Die so erzeugten einzelnen Zellen werden dann in Modulen verbaut. Zusammengefasst, es handelt sich um einen chemisch und energetisch extrem aufwändigen Prozess.

OPV-Produkte werden auf flexible Substrate aufgebracht. Das können Folien sein, für den Auftrag von Funktionalisierungen auf Folien haben sich Rolle-zu-Rolle Verfahren etabliert. Dabei wird eine Großrolle (log roll) innerhalb eines Coaters (Beschichters) abgewickelt, durchläuft die Anlage und wird wieder aufgerollt. Ausgangsmaterial und Produkt sind gewickelte Rollen, daher der Name. Abbildung 3 zeigt einen

typischen Rolle-zu-Rolle Prozess im Stand der Technik, die Folie wird mit über 200 m/min durch eine Anlage gefahren und mit Plasma behandelt (Oberflächenaktivierung) und wieder aufgerollt.

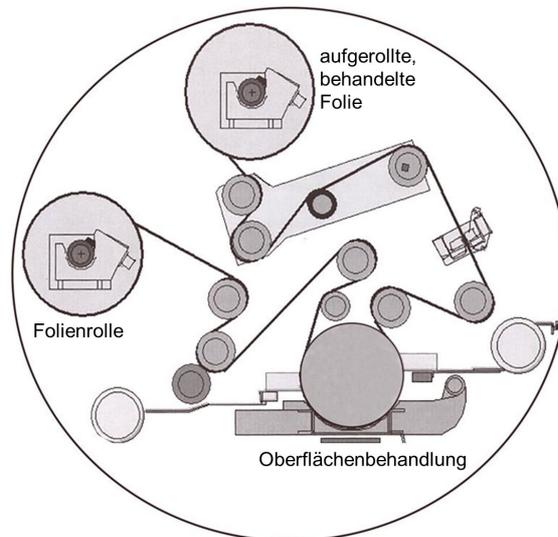


Abbildung 3: Rolle-zu-Rolle-Verfahren: Innerhalb der Beschichtungsanlage (Coater) wird eine Folienrolle abgerollt, behandelt und wieder aufgerollt. Quelle: ROWO

Neu erforschter Schichtaufbau: Vor dem Hintergrund der o. a. ITO-Problematik haben ROWO und weitere Partner in der Vergangenheit intensiv an der Entwicklung von organischen Solarfolien gearbeitet. In jahrelanger Forschungsarbeit wurde in vom BMWK und der EU geförderten Projekten das Ziel verfolgt, organische Solarfolien ohne die Verwendung von ITO zu entwickeln. Das alternative Elektrodenmaterial sollte kostengünstiger, leichter verfügbar und in seinen physikalischen Eigenschaften besser als ITO sein. Dieses Ziel wurde erreicht, indem zur Herstellung der transparent-leitfähigen Elektrode ein mehrlagiges Schichtsystem entwickelt wurde, bestehend aus einer Silberschicht, die in aluminiumdotierte-Zink-Oxid-Schichten (AZO) so eingebettet wurden, dass die für eine Elektrode notwendigen Eigenschaften bezüglich Transparenz und elektrischer Leitfähigkeit entstehen. Dabei ist die Leitfähigkeit bei gleich hoher Transmission um den Faktor 5 im Vergleich zu ITO besser und der Preis bis zu einem Faktor 2 günstiger. Der Nachweis des Verfahrens und die ökologische und ökonomische Vorteilhaftigkeit wurde als Ergebnis der Forschungsprojekte erbracht, wissenschaftlich veröffentlicht und in einer prototypischen Versuchsanlage nachgewiesen (Vgl. hierzu Abschnitt 2d). In der Serienproduktion wurde die AZO/Ag/AZO-Schicht bisher noch nicht eingesetzt.

Auf dem OPV Forschungs- und Technologiegebiet hatten zu Projektstart noch deutsche Firmen wie ROWO einen Know-how Vorsprung im Vergleich zu asiatischen Ländern. Die Wertschöpfungsketten klassischer siliziumbasierter Photovoltaiksysteme sind zwischenzeitlich vollständig nach China und in andere asiatische Länder abgewandert. Europäische und insbesondere deutsche Firmen spielen dabei international betrachtet in diesem Segment keine Rolle mehr. Der Schaden für die deutsche Volkswirtschaft war erheblich. OPV hingegen bot zu Beginn des Projekts erneut die Chance, aufgrund des technologischen Vorsprungs eine wichtige Wertschöpfungskette innerhalb Deutschlands zu begründen, auszubauen und international zu etablieren.

2. Vorhabenumsetzung

2.1. Ziel des Vorhabens

Das Ziel des Vorhabens war die Investition in einen serienmäßigen Sputter Rollcoater, um erstmals in Deutschland, auf Basis des von ROWO entwickelten AZO/Ag/AZO-Schichtsystems, transparent-leitfähige Elektroden in Serie zu fertigen, bei denen kein ITO eingesetzt wird. Die Anlage wurde am Standort in der Gemeinde Herbolzheim (PLZ 79336) in Baden-Württemberg installiert und in Betrieb genommen. An

diesem Standort ist im ländlichen Raum ein komplett neues, auf Hochtechnologie basierendes Werk für Photovoltaikvorprodukte entstanden.

Sputter Rollcoater waren grundsätzlich bekannt, allerdings konnte zu Beginn des Projektes die o. g. Schicht nicht in einer Serienproduktion gefertigt werden. Die genannte Schicht stellt einen wesentlichen Fortschritt gegenüber dem Stand der Technik, dem Einsatz von ITO (Indium-Tin-Oxide, Indium Zinn Oxid) dar. So hatte sich der Preis vor Projektbeginn vervielfacht und lag auf dem Niveau von Silber. Heute liegt der Indiumpreis bei ähnlichen Werten, Silber ist teurer geworden. Weiter beschränkt seine geringe Verfügbarkeit als Koppelprodukt der Blei- und Zinkverhüttung mittelfristig die Verwendung für die Massenherstellung von Solarfolien. Diese Technologie wurde mit dem Demonstrationsvorhaben angezielt. Ein weiteres Ziel war der Auftrag in nur einem Schritt statt in vier Durchgängen, was erhebliche Einsparungen im Energieverbrauch und in der Bearbeitungszeit mit sich bringt. Beide Faktoren sind essenziell, um eine wirtschaftliche Technologie zu etablieren.

2.2. Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)

Die technische Lösung des hier erstmals umgesetzten innovativen großtechnischen Produktionsverfahrens basiert auf der gleichzeitigen Aufbringung mehrerer Schichten. Die Überführung in die Serienproduktion der AZO/Ag/AZO-Schicht stellt gegenüber dem Stand der Technik zu Projektbeginn eine erhebliche Neuheit dar.

Die Schichtentwicklung wurde vor Projektbeginn auf einer von ROWO zur Hybridanlage umgebauten Folienbedampfungsanlage erprobt. Allerdings konnten die für den Elektrodenaufbau notwendigen Schichten auf der Altanlage nicht kosten- und prozessoptimal produziert werden, da das mehrlagige Schichtsystem nicht in einem Beschichtungszyklus aufgebracht werden konnte. Zu Projektbeginn waren für jede Lage ein bis zwei Beschichtungszyklen erforderlich. Damit fehlten, aufgrund der aufwendigen Prozessführung und dadurch eingeschränkten Ausbringungsmenge die Voraussetzungen, kundenindividuelle Produkte zu einem günstigen Preis herstellen zu können. Damals musste die Folie für jede Lage des Schichtsystems einmal komplett unter Vakuum ab- und aufgerollt werden. Im ersten Prozessschritt erfolgte eine Plasmavorbehandlung zur Aktivierung der Folienoberfläche für bessere Hafteigenschaften. Gleichzeitig wurde eine AZO-Lage abgeschieden. Dieser Prozess musste zweimal nacheinander wiederholt werden, da die erforderliche Schichtdicke nicht in einem Schritt erreicht werden konnte. Im dritten Schritt wurden AZO und Silber (Ag) abgeschieden, die eigentliche leitfähige Schicht der Elektrode. Abschließend musste in einem letzten Beschichtungszyklus nochmals eine AZO-Schicht aufgetragen werden, um die Elektrode fertigzustellen. Es waren also vier Beschichtungsdurchgänge notwendig, um eine Charge zu produzieren. Problematisch war, dass mit der alten Anlage keine Fertigung in nur einem Durchgang möglich war, und die für eine wirtschaftliche Weiterverarbeitung geforderte Rollenlänge von 2.000 m nicht beschichtet werden konnte. Maximal konnten Rollen mit einer Länge von nur 500 m beschichtet werden. Ein weiterer Nachteil war die geringe Materialausnutzung der eingesetzten Beschichtungswerkstoffe, da von den eingebauten Planarkathoden nur 12 % des eingesetzten Beschichtungsmaterials abgetragen werden konnten. Die restlichen 88 % waren tote Masse und mussten recycelt werden.

Die besondere Stärke der neuen Anlage besteht nicht nur in den wirtschaftlich darstellbaren Rollengeometrien (1,3 m breit, 2.600 m lang), sondern auch der Aufbringung eines funktionellen Schichtsystems in nur einem Durchgang und der wesentlichen Einsparung von Beschichtungswerkstoffen durch den Einsatz von Rohrkathoden anstelle von Planarkathoden. Es können bis zu 1.446.640 m² Folie pro Jahr beschichtet werden.

Der Produktionsablauf der neuen Anlage gestaltet sich wie folgt: Eine PET-Folie wird auf einer Rolle (1,3 m x 2.600 m) angeliefert und in die Anlage gespannt. Innerhalb der Anlage durchläuft die Folie zunächst eine Plasmabehandlung zur Oberflächenaktivierung, um die Haftung von Beschichtungen zu verbessern. Über ein physikalisches Gasphasenabscheidungsverfahren (Sputtern) eine AZO Schicht, eine Silberschicht und eine weitere AZO Schicht in einem Durchlauf aufgetragen und die beschichtete Folie

wieder aufgerollt. Die Folie durchläuft nacheinander vier Oberflächenbehandlungsprozesse (Plasmaaktivierung, AZO Auftrag, Silberauftrag, AZO Auftrag).

Da die bestehende Anlage aufgrund der aufgezeigten Nachteile und der geringen Ausnutzung der Beschichtungswerkstoffe (Targets) für eine industrielle Fertigung nicht geeignet ist, ist das Ziel des Vorhabens die Investition in einen serienmäßigen Sputter Rollcoater, um erstmals in Deutschland, auf Basis des entwickelten AZO/Ag/AZO-Schichtsystems, transparent-leitfähige Elektroden in Serie zu fertigen, bei dem kein ITO eingesetzt wird. Die Anlage wird am eingangs aufgeführten Standort installiert und betrieben. Sputter Rollcoater sind im Stand der Technik bekannt, allerdings konnte ROWO bislang nicht die o. g. Schicht in einer Serienproduktion fertigen, was mit diesem Demonstrationsvorhaben umgesetzt und aufgezeigt werden soll. Vorteilhaft ist, dass das Schichtsystem mit der neuen Anlage in nur einem Schritt statt in vier Durchgängen aufgebracht werden kann. Dadurch sinkt der Energiebedarf gemäß erster Auslegung um bis zu 60 %. Zudem kommen in der neuen Anlage Rohrkathoden zum Einsatz, die einen Abtrag von mindestens 80 % der eingesetzten Beschichtungswerkstoffe ermöglichen. Damit ist es möglich, für potentielle Kunden die gängigsten Rollenabmessungen (Breite 1.300 mm, Länge 2.000 m) zu konkurrenzfähigen Preisen zu beschichten. Bei entsprechenden Mengensteigerungen nähert sich der Herstellungspreis dem von klassischen Silizium-Modulen an mit dem Potential, ihn bei vergleichbaren Mengen merklich zu unterbieten. Wichtig hierbei ist, dass die Abhängigkeit von dem strategischen Werkstoff Indium reduziert wird. Die neue Anlage ist zudem effizienter und gewährleistet eine reproduzierbare Fertigung sowie exakte Einstellung des Prozessfensters, was mit der bisherigen laborhaften Anlage nicht der Fall war. Dadurch reduziert sich der Ausschuss.

ROWO kann mit der neuen Anlage transparente Elektroden auf Folie erzeugen, die dann von Firmen, wie zum Beispiel Heliatek GmbH, zu Zellen und Modulen weiterverarbeitet werden. Diese scheiden dann auf die von ROWO erzeugte transparente Elektrode die funktionalen Schichten ab, laminieren auf beide Seiten Barrierefolien zum Schutz vor äußeren Einflüssen und bringen die Anschlusskontakte ein, womit die OPV-Zelle betriebsbereit hergestellt ist.

2.3. Umsetzung des Vorhabens

Begleitung und Überwachung des Anlagenbaus:

Das Vorhaben wurde nach Erteilung des Zuwendungsbescheides am 19. Oktober 2021 begonnen. Die Beschichtungsanlage wurde nach Projektstart bestellt. Die Aufstellung der neuen Maschine in der dafür vorgesehenen Halle wurde daraufhin geplant und die Halle für die Installation der Beschichtungsanlage und der Anlagenperipherie durch entsprechende Umbaumaßnahmen vorbereitet. Die neue Anlage wurde von ROWO zunächst vor Ort beim Anlagenhersteller getestet. Nach diesem erfolgreichen Test wurde die Anlage im Februar 2022 geliefert und in der vorbereiteten Halle installiert und vom Anlagenhersteller und ROWO in Betrieb genommen. Die Abnahme erfolgte am 8. April 2022, woraufhin das neue Schichtsystem auf der neuen Anlage von ROWO abgebildet wurde und Testfolien für den vorgesehenen Abnehmer hergestellt wurden. Nach erfolgreicher Abschlussbewertung durch den vorgesehenen Abnehmer findet die Umstellung auf Serienbetrieb statt.

Nachfolgend zeigen einige Photographien den Anlagenaufbau in verschiedenen Stadien:



Abbildung 4: Fundamentarbeiten in der Halle zur Vorbereitung der Anlageninstallation (links), Vorbereitungsmaßnahmen der Aufstellung (rechts). Quelle: ROWO Dr. Müller



Abbildung 5: Einbringen der Anlagenteile (links) und des Kathodenstuhls (rechts) in die Anlagenhalle. Quelle: ROWO

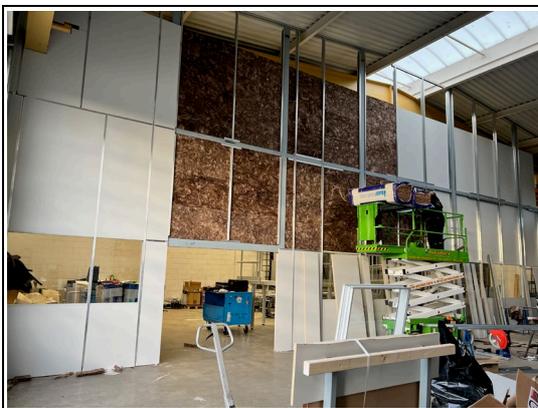


Abbildung 6: Aufbau der Anlageneinkapselung (links), Einweihung der vollständig installierten Anlage nach erfolgreichem Aufbau (rechts). Quelle: ROWO

2.4. Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)

Neben den zu beachtenden baurechtlichen Vorschriften waren folgende Anforderungen für die Genehmigung des Betriebs der Anlage zu erreichen:

Durch die Errichtung der Anlage in einer bestehenden Produktionshalle waren die zu erfüllenden behördlichen Anforderungen ein bekannter Teil der Inbetriebnahme eines neuen Coaters. Da ROWO am Standort bereits Coater betreibt, waren alle Anforderungen bekannt und wurden vollständig erfüllt.

2.5. Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten

Für die Erfassung des Stromsverbrauchs wird ein System installiert, das den Verbrauch über die Zeit festhält. Auch die Materialabtragung an den Kathoden wird erfasst.

Das im Rahmen der Überprüfung der Anlagenperformance durchgeführte Messprogramm umfasste:

- Erfassung der Leistungsaufnahme
- Erfassung der Ausbringungsmenge (Folienfläche)
- Erfassung des Targetverbrauchs (Ag-Target)
- Erfassung des Targetverbrauchs (AZO-Target)

Erfassung der Beschichtungsparameter

- Erfassung von Transmission, Reflexion und Absorption des transparenten AZO-Ag-AZO Schichtsystems
- Erfassung des Flächenwiderstandes des AZO-Ag-AZO Schichtsystems

3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung

3.1. Bewertung der Vorhabendurchführung

Die Durchführung des Vorhabens verlief weitestgehend wie ursprünglich geplant.

Das Projekt wurde direkt nach der Erteilung des Zuwendungsbescheides im Oktober 2021 begonnen. Die Beschichtungsanlage wurde nach Projektstart bestellt. Die Aufstellung der neuen Maschine in der dafür vorgesehenen Halle wurde daraufhin geplant und die Halle für die Installation der Beschichtungsanlage und der Anlagenperipherie durch entsprechende Umbaumaßnahmen vorbereitet. Die neue Anlage wurde von ROWO zunächst vor Ort beim Anlagenhersteller getestet. Nach diesem erfolgreichen Test wurde die Anlage im Februar 2022 geliefert und in der vorbereiteten Halle installiert und vom Anlagenhersteller und ROWO in Betrieb genommen. Die Abnahme erfolgte im April 2022 woraufhin das neue Schichtsystem auf der neuen Anlage von ROWO abgebildet wurde und Testfolien für den vorgesehenen Abnehmer hergestellt wurden. Nach erfolgreicher Abschlussbewertung durch den vorgesehenen Abnehmer findet die Umstellung auf Serienbetrieb statt. Im Rahmen des Probetriebes wurde das unter 2.6 beschriebene begleitende Messprogramm umgesetzt.

Die Durchführung des Projektes war erfolgreich. Es mussten einige technische Hürden im Rahmen der Prozessführung und der Vakuumerzeugung des Systems gelöst werden, was durch entsprechende Prozessoptimierungen auch erfolgte.

3.2. Stoff- und Energiebilanz

3.2.1. Energiebilanz

Durch die neue Anlage sank der Energiebedarf um bis zu 74,61 % im Vergleich zur Altanlage. Ein Vergleich der Anlagendaten zwischen alter und neuer Anlage ist in Tabelle 1 gegeben.

Tabelle 1: Übersicht allgemeine Anlagendaten.

	Alte Anlage	Neue Anlage	Einheit
<i>Rollenlänge</i>	500	2.600	m
<i>Rollenbreite</i>	1,2	1,3	m
<i>Ausbringungsmenge (Rollen)</i>	358	428	St.
<i>Entspricht Folienfläche</i>	214.800	1.446.640	m ²
<i>Stromverbrauch</i>	1.403.360	2.400.000	kWh
Stromverbrauch je m² absolut	6,53	1,66	kWh/m²
Stromeinsparung je m²		74,61	%

Mit Hinblick auf die gestiegenen Produktionskapazitäten sind die Energieeinsparungen enorm. Pro Jahr steigt durch die neue Anlage die verarbeitete Folienfläche auf das 6,7-fache, bei deutlich gesunkenem Energiebedarf um fast drei Viertel (74,61 %). Bei einer beschichteten Folienfläche von ca. 215.000 m² ergibt sich eine Energieeinsparung von ca. 540 t CO₂/Jahr. Bei voller theoretischer Auslastung der Anlage werden Einsparungen von ca. 3.600 t CO₂ Äq./Jahr gegenüber der Referenzanlage durch den Einsatz der neuen Beschichtungsanlage erreicht. Grundlage dieser Werte ist der Treibhauswert (Global Warming Potential für Strom) des Bundesministeriums für Umwelt von 519 g CO₂ Äquivalente/kWh. Zu berücksichtigen ist in diesem Kontext auch die angezielte Wirkung des Vorhabens durch die Produktion von Photovoltaika, denn der Betrieb der Anlage resultiert in der Schaffung der Grundlage für eine nachhaltige Stromerzeugung.

3.2.2. Stoffbilanz

Zusätzlich zu den genannten Energieeinsparungen setzt die neue Anlage die Verarbeitung von Ag+AZO um, was die Nutzung des kritischen Metalls Indium vermeidet. Silber, als bester elektrischer Leiter, und Aluminium-Zink-Oxid sind Rohstoffe, die besser recycelt werden können als Indium. Durch die Verwendung von Indium als ITO (Indium-Tin-Oxide) in extrem dünnen Schichten ist die Rückgewinnung von Indium dürftig, wohingegen sich 75 % des seit 1888 verhütteten Aluminiums noch immer im Kreislauf befinden. In der alten Anlage ergab sich eine sehr geringe Ausnutzung von AZO (12 %), mit der neuen Anlage kommen Rohrkathoden zum Einsatz, die einen Abtrag von 80 % des Materials ermöglichen. Dadurch sinkt in absoluten Zahlen der AZO Bedarf pro Jahr, trotz deutlich gesteigener Produktionskapazitäten (760 kg an der alten Anlage, 720,63 kg an der Neuinstallation). Auch in der effizienteren Nutzung von Metallen steckt eine deutliche Reduktion von Treibhauswerten, denn Bergbau, Mineralaufbereitung und Verhüttung sind energieaufwendige Prozesse. Die deutliche Verbesserung der AZO-Nutzung führt zu einer CO₂ Einsparung von 97 % auf der neuen Anlage, als Absolutwert entspräche dies bei identischer Produktionsleistung von ca. 215.000 m² etwa 2,22 t CO₂ Äq. pro Jahr (Tabelle 2). Berücksichtigt man die deutlich gesteigerten Produktionskapazitäten, resultiert die verbesserte AZO Nutzung in ~ 15 t CO₂ Äq./Jahr. Die Beschichtung ist eine Kombination aus AZO und Silber (Ag), und auch die Silbernutzung wurde mit Installation der neuen Anlage erheblich verbessert. Für die mit der Altanlage identischen Produktionsleistung von ~ 215.000 m² verringert sich der Silberverbrauch um 97 %, was sowohl an der besseren Materialnutzung durch Rohrkathoden im Gegensatz zu Planarkathoden liegt als auch an der Verbesserung des Vakuums in der neuen Anlage. Dadurch wird in der neuen Anlage pro m² weniger Silber benötigt, 0,168 g anstelle

von 0,179 g – etwa 6 % weniger durch die optimierte Prozessführung. Insgesamt entspricht dies 7,4 t CO₂ Äq./Jahr Einsparung allein durch die verbesserte Silbernutzung.

Die Angaben zu den Targetmaterialien beruhen auf den Kurzzeiterfahrungen. Zum jetzigen Zeitpunkt lässt sich sagen, dass die ursprünglichen Annahmen sehr gut geschätzt waren. Tatsächliche Angaben zur Nutzungsrate können erst nach Verbrauch der Targets getroffen werden. Dies wird voraussichtlich im Oktober 2023 der Fall sein.

Tabelle 2: Einsparung bei AZO und Ag Targets im Vergleich mit der alten Anlage, bezogen auf 215.000 m² beschichtete Fläche.

	Alte Anlage	Neue Anlage	Einheit
AZO Bedarf/Jahr (=Target Gewicht)	760	107	kg
Ag-Bedarf/Jahr (=Target Gewicht)	320	303,07	kg
AZO Materialausnutzung	12	80	%
Ag Materialausnutzung	12	80	%
AZO Ausnutzung max absolut (durch Sputtern abgeschieden)	91,2	85,6	kg
Ag Ausnutzung max absolut (durch Sputtern abgeschieden)	38,4	36	kg
Notw. Anteil AZO je m² Elektrode	~0,425	~0,399	g
Notw. Anteil Ag je m² Elektrode	0,179	0,168	g
Verschwendung durch schlechte Materialausnutzung AZO	668,8	21,4	kg
Verschwendung durch schlechte Materialausnutzung Ag	34,83	1,11	kg
GWP: Treibhauswert je Tonne AZO		3,43	t CO ₂ Äq.
GWP: Treibhauswert je Tonne Ag		123,70	t CO ₂ Äq.
CO₂ Ausstoss durch Einkauf des AZO-Materials	2,61	0,37	t CO ₂ Äq./Jahr
CO₂ Ausstoss durch Einkauf des Ag-Materials	39,58	5,57	t CO ₂ Äq./Jahr
Einsparung CO₂: AZO		2,22	t CO ₂ /Jahr
Einsparung CO₂: Ag		27,34	t CO ₂ /Jahr
Einsparung CO₂ relativ: AZO		97	%
Einsparung CO₂ relativ: Ag		97	%

Wichtig hierbei ist, dass die Abhängigkeit von dem strategischen Metall Indium reduziert wird. Wie auch aus den Gesamteinsparungen ersichtlich, wird dieser Posten vollständig eingespart. Die Vermeidung der Indiumnutzung überhaupt ist als positives Signal zu werten, somit wird der Import von 1.720,44 kg (pro 215.000 m² beschichteter Fläche) des kritischen Technologiemetalls vermieden, die zum Betrieb der Altanlage für ITO-basierte OPV-Vorprodukte benötigt werden würden. Die neue Anlage ist zudem effizienter und gewährleistet eine reproduzierbare Fertigung sowie exakte Einstellung des Prozessfensters, was mit der demonstratorischen Altanlage nicht der Fall war. Da die neue Anlage eine größere

Produktionsmenge erlaubt, wäre für die nun produzierte Fläche eine Indiummenge von 11.576 kg mit der Altanlage notwendig gewesen. Dies entspricht etwa 1,2 % der Weltproduktion (im Jahre 2021), die nur eine Anlage pro Jahr einspart. Innerhalb von 5,2 Jahren erreicht die Einsparung die Größenordnung der Jahresindiumproduktion von Kanada (~ 60.000 kg pro Jahr, 2021 drittgrößter Indiumproduzent der Welt).

3.3. Umweltbilanz

Die Umweltbilanz ergibt sich aus den Ergebnissen der Erfolgskontrollphase. So setzt sich die gesamte CO₂ Einsparung aus mehreren direkten und indirekten Effekten zusammen:

1. Einsparung durch die Fertigungsanlage (direkter Effekt): Gegenüber der prototypischen Anlage wird bei gleicher Ausbringungsmenge eine CO₂ Einsparung von 74,61 % (543,40 t CO₂) erreicht. Gleichzeitig vergrößert sich die ausgebrachte Elektrodenfläche um den Faktor 6,7, auf gut 1,4 Mio. m² pro Jahr. Damit entsteht eine tatsächliche CO₂ Einsparung von 6,7 mal der Einsparung für die gleiche Fläche, ca. 3641 t CO₂.

2. Einsparung an Target Werkstoff alte/neue Anlage beim Einsatz von Ag + AZO (direkter Effekt): Zur Vereinfachung wurde bei dieser Berechnung der GWP Wert des AZO stellvertretend mit den GWP Werten von Aluminium und Zink berechnet. Das Verhältnis beträgt 2 % Aluminium und 98 % Zink. Die Schichtdicke beträgt nur noch 90 nm, statt wie bei ITO 160 nm. Die neue Anlage arbeitet durch die Rohrkathoden effizienter, so dass sich die Abscheidungseffizienz beim **Ag Target** von 12 % auf 80 % pro Jahr erhöht. Dadurch sinkt die CO₂ Belastung von ursprünglich knapp 39,58 t CO₂ pro Jahr auf nur noch 5,57 t CO₂ (97 %/33,72 t CO₂), geht man von der gleichen Beschichtungsfläche aus. Beim **AZO-Target** ergeben sich ähnliche Verhältnisse, die Abscheidungseffizienz steigt von 12 % auf 80 % und die CO₂ Belastung von 2,61 auf 0,37 t/CO₂ pro Jahr bei gleicher Beschichtungsfläche.

Für beide Rohstoffe ergibt sich durch die neuen Kathoden und die bessere Ausnutzung eine Reduktion des Materialbedarfs um Faktor 7,1. Da die neue Anlage durch die verbesserte Vakuumprozessführung eine effizientere Materialnutzung (6 %) erlaubt, sind die absoluten Einsparungen an t CO₂ Äq. /Jahr deutlich höher: Insgesamt werden durch das neue Verfahren mit den Ag + AZO-Targets 257,33 t CO₂ pro Jahr eingespart.

Fazit 1: Zusammengefasst ergibt sich somit aus Einsparung 1 und 2 für den Austausch der Anlage eine absolute CO₂ Einsparung von ~ 784,2 t CO₂ pro Jahr (Summe aus Stromeinsparung des Anlagenbetriebs + Einsatz von Rohrkathoden mit Ag + AZO).

3. Substitution von Indiumzinnoxid = ITO durch die Ag+AZO Schicht (direkter Effekt): In diesem Abschnitt wird die Umweltauswirkung der ITO Schicht mit der Ag+AZO Schicht verglichen. Für die Berechnung der ITO Schicht wurde der GWP Wert (Treibhauseffekt) von Indium und Zinn angesetzt. Das Verhältnis beträgt 90 % Indium und 10 % Zinn. Die notwendigen Schichtdicken sind mit 160 nm deutlich höher als bei der Ag+AZO-Schicht. Es zeigt sich logischerweise bereits eine Verbesserung durch die Anwendung von ITO auf der alten und der neuen Anlage. Dieser ist aber nicht entscheidend. Entscheidend ist der Vergleich von ITO und der neuen Schicht auf der neuen Anlage: Durch Indium entsteht eine CO₂ Belastung von 159,71 t pro Jahr, während bei Ag + AZO lediglich 7,99 t CO₂ Äquivalente entstehen. Das entspricht einer absoluten Einsparung von 95 %/151,72 t CO₂/Jahr.

Fazit 2: Gegenüber klassischen indiumbasierten OPV-Schichten ergeben sich bereits unabhängig von der Produktionsanlage selbst große CO₂ Einsparpotentiale als direkte Folge. Werden die CO₂ Einsparungen aus Einsparung 1 - 3 addiert, ergibt sich eine absolute Einsparung von ca. 4.050 t CO₂ pro Jahr.

Sekundäreinsparung durch das Produkt/OPV-Modul (indirekter Effekt): Betrachtet man die 1.446.640 m² beschichtete Folie als Basis für OPV-Solarpanel mit 8 % Wirkungsgrad, so ergäbe das 116 MW_{peak} Leistung. Am Standort Freiburg entspräche dies 116 GWh elektrische Energie pro Jahr (Standort Freiburg: 1.000 kWh pro kW_{peak} Jahresertrag). Der mittlere CO₂ Fußabdruck der Solarenergie liegt in Deutschland bei ca. 15 g/kWh. Das ergibt eine Ersparnis von 561 g/kWh (576 - 15). Hochgerechnet auf 116 GWh sind das 65.034 t CO₂ Ersparnis im Jahr.

Fazit 3: Sowohl die direkten als auch die indirekten CO₂ Einsparpotentiale sind mit diesem Demonstrationsvorhaben gegeben, so dass ein wichtiges Zeichen zur Reduktion des CO₂ Ausstoßes bei der Herstellung einer Technologie zur Erzeugung erneuerbarer Energie gesetzt werden kann. Würde man das gesamte Verfahren mit der Herstellung von Silizium-Modulen vergleichen, würde es die Tragweite noch unterstreichen (keine Herstellung von Silizium-Wafern, keine komplizierten Unterbaukonstruktionen usw.).

Direkte Materialeinsparung:

Durch die neue Anlage würden für 215.000 m² beschichtete Folie (Kapazität der Altanlage) 1.720,44 kg Indium eingespart, weil kein Indium mehr verarbeitet wird – die neue Anlage verfügt aber mit 1.446.640 m² über deutlich gesteigerte Kapazitäten.

Analog würden für 215.000 m² 191 kg Zinn eingespart, weil kein Zinn (ITO: Indium Tin Oxide) verarbeitet wird. Bezogen auf die Kapazitäten der neuen Anlage betragen die Einsparungen pro Jahr 11.576 kg In und 1.285 kg Sn. Die verbesserte Anlageneffizienz spart zudem im Vergleich zur Altanlage Silber und AZO. Die neue Anlage benötigt 1.850 kg weniger Silber und 4.394 kg weniger AZO pro Jahr.

3.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse

ROI: Bezüglich der ursprünglich geplanten Maschinenauslastung ist mit einem Verzug von 9 Monaten zu rechnen. Geplant ist somit im ersten Jahr (2023) eine halbe Schicht ausgelastet (4 h/Tag). 2024 folgt dann die Auslastung einer vollen Schicht und in den Folgejahren kommt jeweils eine weitere Schicht hinzu. Somit ergibt sich ein zeitnaher ROI im 6. Jahr des Betriebs (unter Einbeziehung des Zuschusses, dessen tatsächlicher Zufluss für 2022 bisher berücksichtigt wurde).

3.5. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

Es ergeben sich mehrere Vergleichsdimensionen.

Gegenüber ITO ist die Herstellung der Ag + AZO Schicht um den Faktor 10 günstiger. Die Beschichtungskosten betragen nur noch 0,58 €/m², statt 5,38 €/m² (ITO). Folgende Werte wurden zu Grunde gelegt:

Energiekosten:

- Leistung während des Beschichtungsprozesses: 400 KW
- Leistung im Standby: 100 KW
- Zugrunde gelegter Preis: 0,06 €/kWh

Da die Betrachtung von der Beschichtung jeweils einer Rolle ausgeht, ist noch der Unterschied der Produktivität zu berücksichtigen:

- ITO: 198 m²/h
- AZO/Ag/AZO: 283 m²/h

4. Übertragbarkeit

4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Die Zeit seit Planungsbeginn Ende 2018 über die Abnahme am 08.04.2022 bis zum Abschluss der Erfolgskontrollphase Ende 2022 verlief, abgesehen von der zeitlichen Verzögerung um 9 Monate, weitgehend wie geplant. Die Anlageninvestition wurde aufgrund der im Rahmen mit zwei potenziellen Leitkunden geführten Gespräche nochmals anlagentechnisch aktualisiert. In den Gesprächen hat sich ergeben, dass an der Beschichtungsanlage eine wichtige Modifikation gegenüber der ursprünglich geplanten Anlage vorgenommen werden musste. Diese vom Markt geforderte Modifikation besteht in der Möglichkeit, das mehrlagige, innerhalb von einem Durchlauf aufgebrachte Multischichtsystem zur

Realisierung transparenter Elektroden innerhalb des Rolle-zu-Rolle-Durchlaufs noch mit einer zusätzlichen Schutzfolie zu versehen. Dies war mit der ursprünglich anvisierten Anlage nicht ohne weiteres möglich. Aus diesem Grund wurden mehrere Monate lang intensive Gespräche mit alternativen Anlagenherstellern geführt, was letztendlich zur Aktualisierung der Antragsunterlagen führte.

4.2. Modellcharakter/Übertragbarkeit (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens/der Anlage/des Produkts)

In Bezug auf die erreichbaren Eigenschaften und die Annäherung der Kosten pro Leistungseinheit zeigt das hier umgesetzte Vorhaben eine Ersparnis um den Faktor 10 (verglichen mit ITO-Elektrodenbeschichtung). Damit hat das Projekt starken Modellcharakter, besonders für innovative Anwendungen biegsamer OPV-Module. Zu beachten ist, dass die aktuellen Entwicklungen zeigen, dass OPV noch nicht ganz an die Wirkungsgrade herkömmlicher, anorganischer Photovoltaikzellen heranreichen. Im Januar 2021 ist es im Labor gelungen, den Wirkungsgrad von OPV auf 20 % zu steigern, was im Vergleich zu den 12 % Laborwirkungsgrad zu Beginn des Projektes eine deutliche Steigerung darstellt.

Gegenüber den 20 % Wirkungsgrad spröder, siliziumbasierter Photovoltaikmodule belegen diese Erkenntnisse die im Antrag prognostizierte Aufholjagd organischer Photovoltaika hinsichtlich der erreichbaren Wirkungsgrade. An dieser Stelle ist das Projekt ein sehr deutlicher Vorreiter, denn eine Umsetzung der im Labor erreichten Wirkungsgradsteigerungen trifft durch dieses Projekt auf eine erheblich effizienter gestaltete Serienproduktion. Gleichzeitig kann das Verfahren branchenübergreifend übertragen werden, so werden aktuell Flachbildschirme mit ITO beschichtet.

Trotz der positiven Technologieentwicklungen stellen Anlagen dieser Größenordnung eine erhebliche Investition dar, weswegen sich eine Abschätzung des derzeitigen Übertragungs- und Multiplikationspotenzials schwierig gestaltet. Mengenmäßig ist in Europa ein deutlicher Ausbau der Photovoltaikkapazitäten geplant, gerade in Anbetracht der aktuellen Energiesituation. Am 7. Oktober 2021 stimmte der Bundesrat einem Bündel an Änderungen im Energierecht abschließend zu, unter anderem passte die Bundesregierung das Erneuerbare-Energien-Gesetz dahingehend an, ein zusätzliches Volumen von 1.500 Megawatt Leistung über eine Krisensonderausschreibung zu fördern. Ein Bedarf an zusätzlichen Photovoltaikkapazitäten darf als gegeben angesehen werden. Somit ist der Modellcharakter und eine zukünftige Lizenzvergabe plausibel.

4.3. Kommunikation der Projektergebnisse

Das Projekt wurde von Beginn an kommuniziert, so berichtete die Badische Zeitung am 29. 11. 2021 von der Scheckübergabe der Fördersumme durch Staatssekretärin Schwarzlühr-Sutter.

Die Ergebnisse des vorliegenden Projektes sollen zum Wohle des Unternehmens ROWO sowie der Umwelt-, Rohstoff- und wirtschaftlichen Situation der Bundesrepublik Deutschland nach außen kommuniziert werden. Die angedachte branchenspezifische Kommunikation betrifft:

- die Mitarbeit in Branchenverbänden zur fortschreitenden Etablierung organischer Photovoltaik (über Kongresse der Bauindustrie oder im direkten Austausch mit Architekten sowie den weiterverarbeitenden Firmen, welche die Elektroden zu Endprodukten weiterverarbeiten)
- die gezielte Platzierung von Publikationen in einschlägigen Fachzeitschriften
- Veröffentlichung der Ergebnisse auf Messen, im direkten Vertrieb und gezielten Marketingaktionen.

5. Zusammenfassung

Die für die Projektdurchführung verantwortliche ROWO GmbH ist ein Unternehmen, welches Materialien von R2R beschichtet und konfektioniert. Dabei werden auch eigene Forschungs- und Entwicklungsprojekte umgesetzt und neben konventioneller Aufdampftechnik auch plasmagestützte Verfahren kombiniert eingesetzt. Eine besondere Stellung nimmt ROWO im Bereich der Entwicklung serienmäßiger Herstellung von organischen Solarfolien ein.

Das vorliegende Vorhaben wurde durchgeführt, um eine serienmäßige Beschichtung von AZO/Ag/AZO Schichten anstelle von ITO auf flexiblem Substrat zu ermöglichen. Damit wurde ein Meilenstein in der Entwicklung flexibler organischer Photovoltaik erreicht. Durch die Substitution von ITO durch AZO/Ag/AZO ergeben sich ökologische und ökonomische Vorteile, die in vorangegangenen Forschungsprojekten umfangreich dargestellt wurden.

Das durchgeführte Investitionsvorhaben hat die Errichtung eines Sputter-Rollcoaters ermöglicht, mit dem ROWO in der Lage ist, kontinuierlich und wirtschaftlich beschichtete flexible Substrate mit AZO/Ag/AZO Schichten herzustellen. Damit wurde die Überführung des Verfahrens von Forschung in die Serienproduktion erfolgreich bewerkstelligt. Zum Zeitpunkt der Projektbeantragung war es nicht möglich, die indiumfreie Elektrodenschicht wirtschaftlich auf Folien darzustellen und die durch das Projekt ermöglichten Quadratmeterzahlen zu erreichen.

Das Ziel des durchgeführten Investitionsvorhabens wurde vollumfänglich erreicht – die Errichtung, Inbetriebnahme und Verifikation eines hochmodernen Sputter-Rollcoaters, der AZO/Ag/AZO Schichten wirtschaftlich auf flexible Substrate aufträgt und somit OPV Produkte konkurrenzfähig herstellen kann. Das großtechnische Demonstrationsprojekt zeigt auf, wie viel Energie und Metallressourcen durch Hochtechnologie eingespart werden können.

Die wichtigsten Ergebnisse bestehen in der demonstrierten Einsparung von 74,61 % Energie im Vergleich zur Altanlage, und der Fähigkeit, bedeutend höhere Quadratmeterzahlen in der Beschichtung pro Jahr zu erreichen. Durch die Verarbeitung längerer und breiterer Rollen werden genau die von Kunden gewünschten Spezifikationen erreicht.

6. Summary

Within the market for coatings, ROWO is a highly sought-after partner for research and development as well as custom applications. Within the breadth of applications for coated substrates, ROWO is a specialist for vacuum coating of flexible substrates, converting, multilayer coatings, spooling etc. The project presented aimed at (and achieved) a sputter rollcoater capable of coating flexible substrates with AZO/Ag/AZO multilayer systems for flexible, organic photovoltaics.

The present project was carried out to enable industrial coating of AZO/Ag/AZO layers instead of ITO on flexible substrate. Thus, a milestone in the development of flexible organic photovoltaics was achieved. The substitution of ITO by AZO/Ag/AZO results in ecological and economic advantages, which have been extensively presented in previous research projects.

The investment project carried out has enabled the construction of a sputter roll coater, with which ROWO is able to continuously and economically produce coated flexible substrates with AZO/Ag/AZO layers. Thus, the transfer of the process from research to mass production was successfully accomplished. At the time of the project application, it was not possible to economically produce the indium-free electrode layer on films and to achieve the square meter numbers made possible by the project.

The objective of the investment project was fully achieved - the construction, commissioning and verification of a state-of-the-art sputter roll coater that economically deposits AZO/Ag/AZO layers on flexible substrates and thus manufactures OPV products competitively. The large-scale demonstration project shows how much energy and metal resources can be saved by high technology.

The key results are the demonstrated savings of 74.61 % energy compared to the legacy system, and the ability to achieve significantly higher square meterages in coating per year. By processing longer and wider rolls, the exact specifications required by customers are achieved.

7. Literatur

[1] <https://www.solaranlage.eu/photovoltaik/technik-komponenten/solarzellen/organische-solarzellen>

[2] <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>