

Schlussbericht

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zuwendungsempfänger:
SiLi Technologies GmbH

Förderkennzeichen:
03EE1046H

Ausführende Stelle:
SiLi Technologies GmbH

Vorhabenbezeichnung:
micro-CPV –Entwicklung eines hochkonzentrierenden CPV Moduls auf Basis modernster Micro-
Fertigungstechnologie

Teilvorhaben: Entwicklung und Herstellung von SOE für micro-CPV

Laufzeit des Vorhabens:
1. April 2020 bis 30. September 2023

Berichtszeitraum:
1. April 2020 bis 30. September 2023

Projektleitung: Dr. Alexander Wölfel

Projektbearbeitung: Dr.-Ing. Sebastian Lehmann

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

1. Entwicklung eines hochkonzentrierenden CPV Moduls auf Basis modernster Micro-Fertigungstechnologie

1.1 Aufgabenstellung

Mit der konzentrierenden Photovoltaik (CPV) werden die höchsten Wirkungsgrade¹ und niedrigsten Energierücklaufzeiten² aller Photovoltaik-Technologien erreicht. Die bis zu 1000-fache optische Konzentration erhöht den Wirkungsgrad und verringert die eingesetzte Solarzellenfläche. Hierdurch können teurere, aber besonders hocheffiziente III-V Mehrfachsolarzellen genutzt werden. Allerdings müssen die Modulkosten für die Wettbewerbsfähigkeit gesenkt werden. Hier setzt die im folgenden zusammengefasste Aufgabenstellung des Verbundprojekts micro-CPV an:

Entwicklung von hochkonzentrierenden, industriell wettbewerbsfähig zu fertigenden μ -CPV (Konzentratorphotovoltaik) Modulen mit zweistufiger Optik mit Wirkungsgraden $> 36\%$ und Zielkosten von 90 €/m^2 bzw. $0,25 \text{ €/Wp}$.

- Lichtbündelung durch Vollglaslinsearray auf Sekundäroptiken (Glaskugel) auf III-IV Konzentratorsolarzelle.
- Kostenreduktion durch neue Herstellungs- und Fertigungsmethoden (Mikropackaging, Selbstorganisation), effizienten Materialeinsatz und Einsatz von Sekundäroptiken (Erhöhung Konzentration der solaren Strahlung).

1.2 Voraussetzung des Projekts

Das von SiLi Technologies bearbeitete Teilprojekt umfasst zwei Aufgabenbereiche:

- A) Entwicklung einer Herstellungstechnologie von kleinen sekundäroptischen Elementen (SOE) aus speziellem (optischem) Glas und mit hoher Präzision.

Unter Berücksichtigung technischer und ökonomischer Gesichtspunkte soll zusammen mit den Projektpartnern zu verwendende Gläser ausgewählt werden. Darauf aufbauend soll eine Anwendung, ggf. Anpassung und Optimierung bekannter Herstellungstechnologien auf die projektspezifischen Gläser erfolgen. Von SiLi werden dann kleine Kugellinsen als SOE zur Bemusterung der Partner hergestellt. Die genaue Werte für Durchmesser, Formtreue und Oberflächenqualität werden im Projektverlauf spezifiziert.

- B) Entwicklung einer anwendungsgerechten Antireflexionsschicht für SOE

Unter Berücksichtigung technischer und ökonomischer Gesichtspunkte soll zusammen mit den Projektpartnern die Transmission der SOE durch die Entwicklung einer breitbandigen Antireflexionsschicht für den solaren Strahlungsbereich gesteigert werden. Dazu soll eine Technik zur Erzeugung homogener mikrostrukturierter AR-Schichten auf Kugeln entwickelt und erzeugte Schichten hinsichtlich ihrer AR-Wirkung bewertet werden

1.3 Planung und Ablauf

Der Arbeitsplan in Abbildung 1 umfasst den beantragten Projektzeitraum vom 08/2019 – 07/2022. Der ursprüngliche Projektstart wurde auf 04/2020 verschoben. Zudem wurde eine kostenneutrale Verlängerung für das Projekt um sechs Monate bis Ende September 2023 genehmigt.

¹ Green, Hishikawa, et al., Solar cell efficiency tables (version 51). Prog. Photovolt: Res. Appl. 26(1), 2018. DOI: 10.1002/pip.2978.

² Halasah, Pearlmutter, Feuermann, Field installation versus local integration of photovoltaic systems and their effect on energy evaluation metrics. Energy Policy 52, 2013. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.09.063.

| | 08/19 | 09/19 | 10/19 | 11/19 | 12/19 | 01/20 | 02/20 | 03/20 | 04/20 | 05/20 | 06/20 | 07/20 | 08/20 | 09/20 | 10/20 | 11/20 | 12/20 | 01/21 | 02/21 | 03/21 | 04/21 | 05/21 | 06/21 | 07/21 | 08/21 | 09/21 | 10/21 | 11/21 | 12/21 | 01/22 | 02/22 | 03/22 | 04/22 | 05/22 | 06/22 | 07/22 | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|---|
| Projektjahr | 1 | | | | | | | | | | | | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Projektquartal | 1 | | | 2 | | | 3 | | | 4 | | | 5 | | | 6 | | | 7 | | | 8 | | | 9 | | | 10 | | | 11 | | | 12 | | | | |
| Projektmonat | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | | |
| Projekttreffen | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| AP3: Optik | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.1 Primärlinsen-Platte | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.1.1 Geprägtes Glas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.1.2 Glasdruck | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.1.3 SoG Referenz | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.2 Sekundäroptik Kugellinse | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.2.1 Glasauswahl, Definition opt. Parameter | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.2.2 Musterkugelfertigung für 3.2.1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.2.3 Realisierung der geometr. Anforderungen | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.2.4 Musterkugelherstellung für 3.2.3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.2.5 Realisierung der AR-Eigenschaft des SOE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.2.6 Musterkugelfertigung für 3.2.5 und 5.4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.3 Optik Charakterisierung & Evaluierung | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Abbildung 1: Arbeitsplan SiLi Technologies GmbH über den beantragten Projektzeitraum 08/2019 – 07/2022

1.4 Stand der Technik

CPV allgemein:

Bis Ende 2017 wurden weltweit 388 MW an CPV-Systemen installiert³, größtenteils linsenbasierte Systeme mit Dreifach-Konzentratorsolarzellen auf Basis von GaInP/GaInAs/Ge (z.B. C3PV Module der Firma AZUR und FLATCON®-Modul von ISE bzw. Fa. Soitec). Die CPV stellt weltweit die bei weitem effizienteste PV-Technologie dar⁴. Um am Markt ggü. der etablierten Si-PV bestehen zu können, werden zur Kostensenkung gegenwärtig verschiedene Strategien verfolgt. Dazu zählen:

- Erhöhung der Konzentration (von etwa 350 auf 800-1000), z.B. durch Einsatz weiterer/anderer optischer Elemente⁵ (siehe z. B. BMBF Projekt „Konvotik“, Fkz 13N10930, und BMWi Projekt „CPVMagnus“, Fkz 0325485D), wodurch Halbleitermaterial eingespart werden kann
- Optimierungen in der Fertigungstechnik und Miniaturisierung⁶

Konzentratorsolarzelle:

Stand der Technik für Konzentration-PV-Anwendungen sind Dreifach-Halbleiterelemente⁷. Parallel zum beantragten Projekt werden Vier- und Fünffach-Solarzellen entwickelt und bei Verfügbarkeit auch im Projekt eingesetzt (vgl. z.B. BMWi Projekt „QuintUMM“).

³ Wiesenfarth, Philipps, Bett, Horowitz, Kurtz, *Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology (Version 1.3)*, Studie, Fraunhofer ISE/ NREL, April 2017: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/studie-current-status-of-concentrator-photovoltaic-cpv-technology.html> [letzter Zugriff: 11.03.2024]

⁴ Gemessen unter CSTC-Bedingungen. Siehe: Steiner, Bösch, Dilger, Dimroth, Dörsam, Muller, Hornung, Siefer, Wiesenfarth, Bett, *FLATCON®-CPV module with 36.7% efficiency equipped with four-junction solar cells*, Prog. Photovolt: Res. Appl., 2014. DOI: 10.1002/ppp.2568

⁵ Ghosal, Lilly, Gabriel, Whitehead, Seel, Fisher, Wilson, Burroughs, *Semprius Field Results and Progress in System Development*, IEEE J Photovoltaics 4(2), 2014. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2013.2288026

⁶ Domínguez, Jost, Askins, Victoria, Antón, *A review of the promises and challenges of micro-concentrator photovoltaics*. AIP Conf. Proc. 1881, 2017. DOI: 10.1063/1.5001441

⁷ <http://www.azurspace.com/index.php/en/products/products-cpv/cpv-solar-cells> [letzter Zugriff 11.03.2024]



Konzentratoroptik:

Aktuell umfasst der Stand der Technik für Primäroptiken Fresnel-Linsenarrays aus Silikon auf Glas oder Polymethylmethacrylat (PMMA). Einzelne Linsen werden im Array in großen Flächen parkettiert. Kostenbestimmend sind sowohl die Ausgangsmaterialien als auch der Herstellungsprozess. Prägeprozesse für Vollglaselemente und alternative Herstellungsrouten, z.B. via 3D-Druck sind Bestandteil aktueller Arbeiten⁸.

Sekundäroptiken für CPV wurden ebenfalls bereits in verschiedenen Materialien und Formen realisiert und eingesetzt (s.o). Ausführungsbeispiele sind z.B. reflektierende Trichter aus Metallspiegeln, aus Silikon oder aus Glas (Domlinsen oder totalreflektierend kaleidoskopisch). Vergleichsweise hohe Kosten für Herstellung und präzise Montage stehen dem Mehrwert im System jedoch entgegen. Als kostengünstige alternative Sekundäroptik werden im Projekt Glaskugeln evaluiert.

Packaging-Technologie:

In heutigen Konzentratormodulen sind zumeist auf Kühlkörper geklebte oder gelötete Solarzellen eingesetzt. Die Verschaltung und Kontaktierung erfolgt über eine Bypassdiode und einen Au Drahtbond. Einzelne solche Einheiten werden dann mit sehr hoher Setzgenauigkeit auf die Modulbodenplatte in den Fokuspunkt der Linsen geklebt und über weitere Dickdrahtbonds seriell bzw. parallel verschaltet. Mit zunehmender Miniaturisierung der Solarzellen steigt damit auch die Anzahl der Bauelemente, was sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.

Zur Reduktion der inneren Verschaltung werden CPV-Module bereits heute mit Leiterplatten versehen. Neben Standardmaterialien wie dem Verbundwerkstoff FR4 kommt auch Glas zum Einsatz, z.B. im FLATCON® CPV-Modul. Die Leiterplattentechnologie ermöglicht eine vordefinierte Verbindung zwischen den Zellen. Standardverfahren für deren Metallisierung ist das Aufbringen einer dünnen Kupferfolie (~ 17 – 35 µm) über eine flächige Verklebung. Leiterbahnen werden lithographisch durch Lackmaske vorgegeben und durch nasschemisches Entfernen des übrigen Kupfers subtraktiv erzeugt. Additive Verfahren wie das direkte Aufdrucken von Leiterbahnen sind Gegenstand aktueller Untersuchungen.

Auch bei der Positionierung von Bauteilen ist das subtraktive Verfahren Stand der Technik. Durch vorhergehende lithografische Strukturierung können Bauteile mit Genauigkeiten von etwa 50 – 100 µm positioniert werden. Höhere Genauigkeiten versprechen aktuelle in Entwicklung befindliche additive Verfahren, bei der u.a. digitale Inkjet-Drucktechnik zur Strukturierung zum Einsatz kommt.

Die Leiterplattenbestückung erfolgt gemäß dem Stand der Technik durch Pick&Place Bestückautomaten. Durch die Ausnutzung der Selbstausrichtung über die Oberflächenspannung flüssiger Lotdepots reduzieren sich die Anforderungen an die Setzgenauigkeit, da die Positioniergenauigkeit durch die Genauigkeit der Lötstopp-Barriere gegeben ist („Balling- Prozess“, z.B. bei Fa. Wagenbrett⁹) Grundsätzlich ist diese Technologie auch zur optischen Kopplung (Druck von Silikon statt Flussmittel) und Bestückung (Kugellinsen statt Lotkugeln) der Sekundäroptiken geeignet.

⁸ Kotz, Schneider, et al., *Glassomer-Processing Fused Silica Glass Like a Polymer*. Adv. Materials 30, 2018. DOI:

10.1002/adma.201707100 | Kotz, Arnold, et al., *Three-dimensional printing of transparent fused silica glass*. Nature 544(7650), 2017. DOI: 10.1038/nature22061

⁹ Mehrafsun, *Prozesssicheres Reballing*. Productronic 12, 2009, p. 33.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Rohglasscherben für die Herstellung der SOE wurden von SiLi extern zugekauft. Entsprechende Mittel waren im Projekt vorgesehen.

Für die AR-Funktionalisierung der SOE wurden neben eigenen auch externe Beschichtungsversuche durchgeführt. Extern gewonnene Ergebnisse, falls relevant, sind in Kapitel 2.1 als solche gekennzeichnet.

2. Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse im Berichtszeitraum

2.1 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Entwicklung bzw. Optimierung einer Herstellungstechnologie von kleinen sekundäroptischen Elementen (SOE) aus speziellem (optischem) Glas mit hoher Präzision und niedrigen Stückkosten:

Bei der Auswahl des Glases für die sekundäroptischen Elemente (SOE) wurde zunächst die optische Leistungsfähigkeit (z.B. gemessen an der solaren Transmission) des Glases herangezogen. Optische Spezialgläser bieten hier hervorragende Eigenschaften¹⁰. Gleichzeitig sind aber auch die Verarbeitbarkeit der Gläser und der damit verbundene (Kosten-)Aufwand wichtige Parameter, die in die Materialauswahl einfließen. Der sich ergebende Zielkonflikt ist schematisch in Abbildung 2 skizziert.

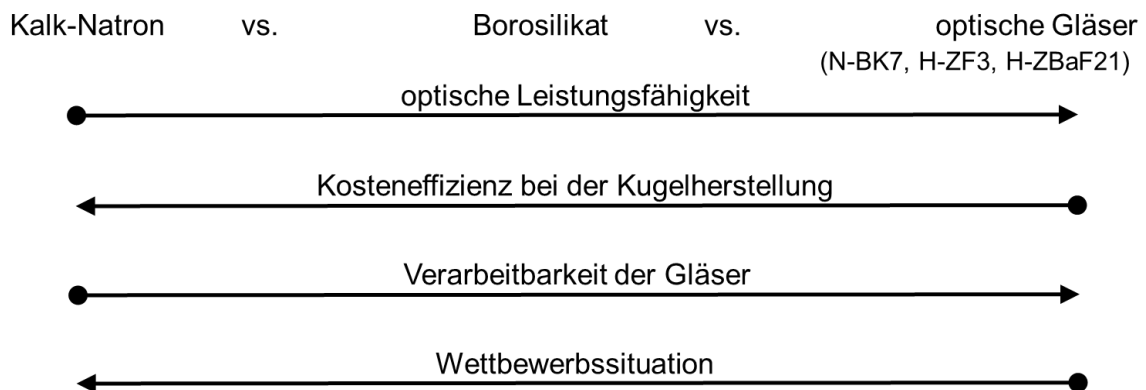


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Zielkonflikts bei der Materialauswahl. Eine Steigerung der optischen Leistungsfähigkeit geht z.B. mit einer deutlichen Erhöhung der Materialkosten einher.

Zusammen mit dem Partner ISE wurden durch Abschätzungen zu den Gesamtmodulkosten deshalb zunächst Standard-Kalk-Natron-Glas (KNG) als Material für die ersten SOE festgelegt. Um die nachteiligen Transmissionseigenschaften des Standard-KNG aufgrund des darin enthaltenen Eisenoxidanteils auszugleichen, wurde als zweites Glas bereits in der Photovoltaik eingesetztes, eisenarmes Kalk-Natron-Glas, sogenanntes „Solarglas“, ausgewählt¹¹.

Im Herstellungsprozess werden die Rohscherben der Gläser zunächst gebrochen und anschließend verrundet. In beiden Prozessschritten besteht die Möglichkeit einer Eiseneintragung, weshalb speziell die Zusammensetzung des Solarglases nach Brecher und Verrundungsprozess vergleichend

¹⁰ H. Bach und N. Neuroth, Hrsg., *The Properties of Optical Glass*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998

¹¹ M. R. Vogt u. a., „Measurement of the Optical Constants of Soda-Lime Glasses in Dependence of Iron Content and Modeling of Iron-Related Power Losses in Crystalline Si Solar Cell Modules“, *IEEE J. Photovolt.*, Bd. 6, Nr. 1, S. 111–118, Jan. 2016, doi: 10.1109/JPHOTOV.2015.2498043.

mittels RFA-Analyse bestimmt wurde. Es konnte gezeigt werden, dass nach allen Prozessschritten der Unterschied im Eisenanteil mit $\pm 0,01$ Ma-% im Bereich der Messunsicherheit liegt. Von einem Eiseneintrag im Bearbeitungsprozess wird somit nicht ausgegangen.

Gemäß obiger Beschreibung wurden sekundäroptische Elemente (SOE) sowohl aus Standard-Kalk-Natron-Glas (KNG) als auch aus Solarglas hergestellt. Für letztere wurde ein möglicher Lieferant identifiziert sowie 11 t Solarglasscherben aus Projektmitteln bezogen und verrundet.

Optische Untersuchungen an den Kugeln durch die Projektpartner zeigten anfänglich teilweise sehr große Oberflächenfehler (vgl. Abbildung 3, links). Diese konnten durch eine Parameteranpassung im Verrundungsprozess behoben werden. Ein vollständiges Vermeiden von kleinen Oberflächendefekten ist jedoch prozessbedingt nicht möglich (vgl. Abbildung 3, rechts). Eine weitere Optimierung der Kugeloberflächen ist jedoch durch zusätzliche Prozessschritte erreichbar. Deshalb wurden in Abstimmung mit dem Projektpartner ISE zusätzliche Polierschritte an den eisenarmen Typ S-Kugeln durchgeführt. Dazu wurden die Kugeln mit einer angepassten Melasse in einer Trommel rotiert. Zudem wurden Möglichkeiten einer optischen Oberflächenqualitätskontrolle evaluiert. Den Projektpartnern wurden Muster mit unterschiedlichen Nachbehandlungsschritten sowie eine Übersicht der damit verbundenen Kostensteigerungen übergeben, um ein optimales Kosten-Nutzen-Verhältnis abzuschätzen.

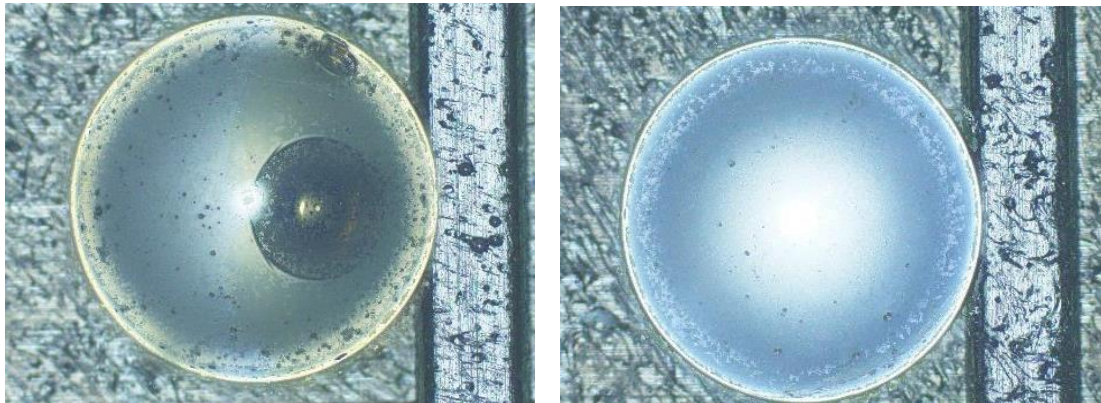


Abbildung 3: Durch Parameteranpassung vermeidbarer großflächiger Oberflächenfehler auf SOE (links) gegenüber kleineren prozessbedingten Oberflächendefekten (rechts, nicht vermeidbar)

Neben dem eingesetzten Glas spielen auch die geometrischen Parameter der SOE eine wichtige Rolle für die allgemeine Performance der micro-CPV-Module. Belegt durch ausführliche Berechnungen des Partners ISE zur Optik und Modulgeometrie sowie unter Berücksichtigung möglicher Kombinationen verschiedener Toleranzen wurden folgende grundlegende Geometrie bzw. Eigenschaften der SOE als Design-Fall definiert:

- Durchmesser: $d = 1,6$ mm
- Durchmessertoleranz < 50 μm
- Rundheitstoleranz (Unterschied längste / kürzeste Achse) < 100 μm .

Um die definierte Zielverteilung und Toleranzen zu erreichen, wurden die verrundeten Kugeln verschiedenen Nachbearbeitungsschritten unterzogen (vgl. Abbildung 4). Die sich in der Massenproduktion der Glaskugeln prozessbedingt ergebenden Größenverteilungen werden zunächst durch Siebung eingegrenzt. Da Rundheitsabweichungen nicht sicher durch Sieben eingegrenzt werden können - ellipsoide Kugeln können mit dem kleinen Durchmesser durchs Siebgewebe rutschen.- erfolgt eine Weiterbehandlung auf firmeneigenen Ablauftellern. Kugeln mit hoher Rundheit laufen auf der rotierenden, schräggestellten Scheibe nach unten ab. Ellipsoide

„Kugeln“ werden hingegen mitgeführt und somit aussortiert. Abschließend erfolgt eine Feineinstellung der Durchmesserverteilung mittels Walzensortieranlage.

Kugeln aus den verschiedenen Prozessschritten wurden den Projektpartnern als Muster zur Verfügung gestellt, u.a. für Setzttests. Eine Übersicht der mit den einzelnen Schritten verbundenen Kosten wurde übergeben, um ein optimales Kosten-Nutzen-Verhältnis abschätzen zu können.

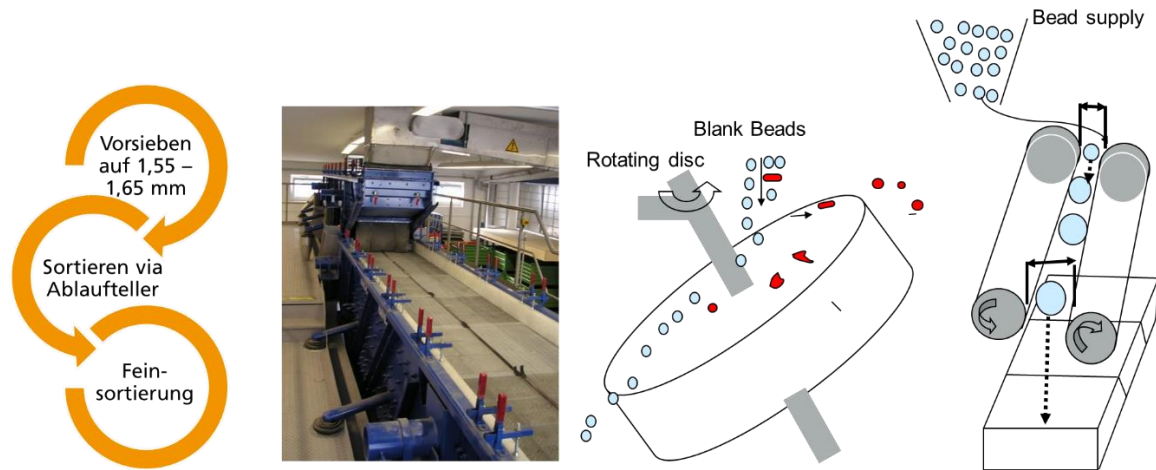


Abbildung 4: Übersicht der Prozessschritte zum Erreichen der im Design-Fall spezifizierten Toleranzen (von links: Sieben, Ablaufteller, Walzensortieranlage)

Entwicklung einer anwendungsgerechten Antireflexions-(AR)schicht für Kugeln zur Steigerung der Transmission:

Ein weiteres Projektziel ist die Steigerung der Moduleffizienz durch eine breitbandige AR-Beschichtung der SOE. Angesichts der Vielzahl an Möglichkeiten, Oberflächen mit einer AR-Wirkung zu versehen¹² wurden von Seiten SiLi Technologies eine Auswahl im Projektrahmen sinnvoller Beschichtungstechnologien unternommen. Der Fokus wurde dabei auf Massenproduktionstauglichkeit gelegt, um die Kosten sowie den prozesstechnischen Aufwand in akzeptablen Grenzen halten. Ziel ist es, sogenannte Mottenaugstrukturbeschichtungen über einen Sol-Gel-Prozess zu erzielen. Deren gradueller Übergang im Brechungsindex ermöglicht eine transmissionssteigernde Wirkung über einen großen Bereich des solaren Spektrums¹³.

Zur Erzeugung der AR-Schichten wurden drei Verfahren angewendet (Tauch-, Vibrations- und Spraybeschichtung), diese sind exemplarisch in Abbildung 5 dargestellt.

¹² H. K. Raut, V. A. Ganesh, A. S. Nair, und S. Ramakrishna, „Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review“, *Energy Environ. Sci.*, Bd. 4, Nr. 10, S. 3779–3804, 2011, doi: 10.1039/C1EE01297E.

¹³ A. Gombert, „Mikrooptik im großen Stil“, *Phys. J.*, Nr. September 2002, 2002, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.physik.de/physik-journal/mikrooptik-im-grossen-stil>



Abbildung 5: Übersicht der untersuchten Beschichtungstechnologien zum Erzeugen dünner Antireflexions-(AR)-Schichten. Von links: Tauchbeschichtung, Vibrationsbeschichtung und Spraybeschichtung (extern durchgeführt).

Der Fokus wurde dabei zunächst auf Tauchbeschichtungsverfahren gelegt, da diese Massenproduktionstauglichkeit besitzen und sich deren Kosten sowie der prozesstechnische Aufwand in akzeptablen Grenzen halten. Jedoch sind die Kugeln während des Beschichtungsvorgangs ständig miteinander in Kontakt und kleben nach Beenden des Beschichtungsprozesses entweder zusammen oder weisen inhomogen beschichtete Oberflächen auf. Verschiedene Konzepte zur Verbesserung der Beschichtungsgüte, z.B. Verdünnen der Beschichtungslösung, verschiedenen Geometrien und Rotation der Tauchbehälter wurden verfolgt, führten aber zu keinem deutlich verbesserten Ergebnis.

Im Weiteren wurden die Kugeln deshalb nicht mehr in die Beschichtungslösung getaucht, sondern die Beschichtungslösung auf rotierende oder durch Vibration fluidisierte Kugelbatches aufgebracht. Mit Hilfe dieser Techniken konnte die Beschichtungsgüte gesteigert werden, jedoch war auch hier keine vollständig homogene Oberflächenbeschichtung erzeugbar (vgl. Abbildung 6). Ergänzende zum Vergleich extern durchgeführte Versuche in einer Beschichtungsspraytrommel lieferten ähnliche Ergebnisse in der Schichthomogenität wie das Vibrationsverfahren und wurden deshalb aufgrund der damit verbundenen Kosten nicht weiterverfolgt.

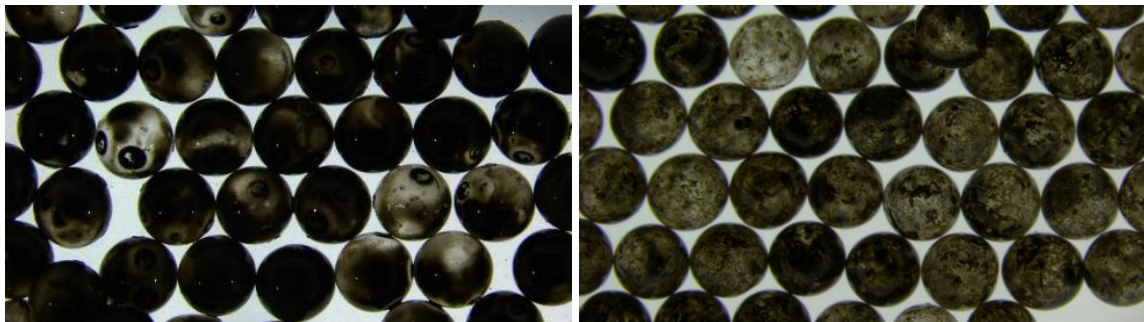


Abbildung 6: Lichtmikroskopische Aufnahmen beschichteter Kugeln. Links: stark inhomogen verteilte Beschichtungslösung nach Tauchbeschichtung. Rechts: Homogener verteilte Beschichtung der Kugeln mit Vibrationsverfahren.

Nach Festlegung der einzusetzenden Beschichtungsverfahren wurden zusammen mit ISE anhand der definierten Kugelgeometrie und der in den Modulen eingesetzten PV-Zellen mit fünf Halbleitern Berechnungen zur optimalen Schichtdicke der AR-Schicht angestellt. Da ein Modul durch die Teilzelle limitiert wird, die den niedrigsten Teilzellenstrom liefert, wurden die Teilzellenströme J1 – J5 des Design-Falls in Verbindung mit Interferenzeigenschaften verschieden dicker AR-Schicht theoretisch bestimmt. Als theoretisch optimale Schichtdickenwerte wurden 170 nm, 500 nm oder 850 nm für das AR-Coating errechnet (vgl. Abbildung 7).

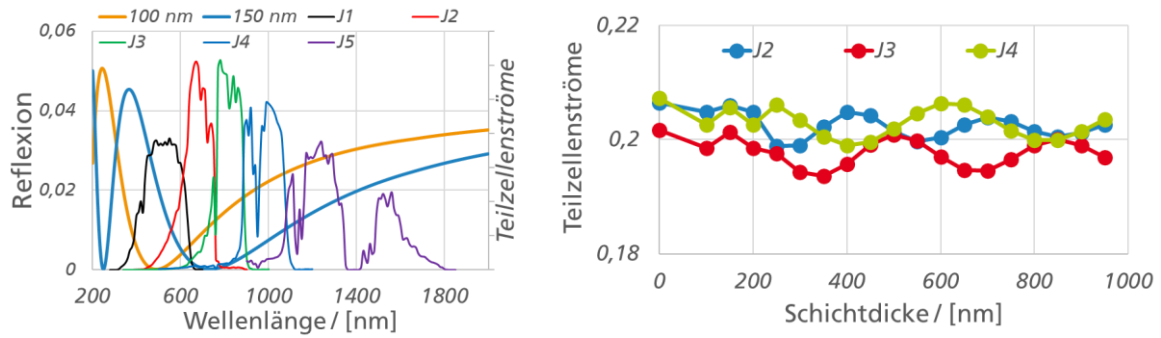


Abbildung 7: Ermittlung der „optimalen“ Schichtdicke durch Gewichtung der Teilzellenströme mit den theoretischen Transmissionswerten für verschiedene Schichtdicken.

Entsprechende Beschichtungen zum Erzielen dieser Schichtdicken wurden mittels Vibrationsverfahren durchgeführt. Zur Bewertung der erzeugten Schichten wurde neben der optischen Erscheinung im lichtmikroskopischen Bild punktuell die Schichtdicke und das Reflexionsvermögen einzelner Kugeln mittels eines aus Projektmitteln angeschafften Schichtdickenmessgeräts F40 bestimmt. Anhand größerer Abweichungen bei den größeren Schichtdicken wurden SOE für den Moduleinsatz, mit der kleinsten ermittelten Schichtdicken versehen. Wie Abbildung 8 links exemplarisch zu entnehmen ist, wurden im Mittel die gewünschte Schichtdicke von 170 nm reproduzierbar erreicht. Die Abweichungen ergeben sich aus der nicht homogenen Verteilung der Beschichtungslösung auf der Oberfläche der Kugeln und deuten darauf hin, dass die Mottenaugenstruktur nicht wie beabsichtigt erzielt werden konnte. Dennoch konnten mit dem F40 punktuell der zu erreichende breitbandige AR-Effekt im sichtbaren und nahinfraroten Bereich des Spektrums nachgewiesen werden (Abbildung 8 rechts).

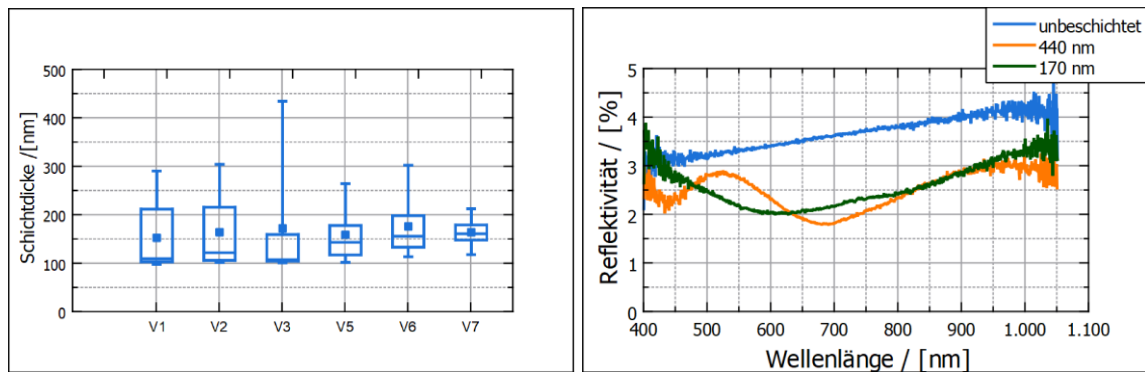


Abbildung 8: Mittels Schichtdickenmessgerät F40 punktuell ermittelte Schichtdicken (links) und breitbandige AR-Wirkung für verschiedene mittlere Schichtdicken (rechts).

Die Projektpartner wurden mit AR-beschichteten Kugeln aus Standard-KNG und aus eisenarmen KNG bemustert. Ergänzend zu den eigenen Messungen mit dem F40 wurden vom Partner ISE Messungen der (mittleren) Transmission an planaren Kugelgittern im Fourierspektrometer durchgeführt. Diese bestätigten, dass im Mittel eine Reflexionsminderung im Bereich von $\sim 2\%$ mit den beschichteten Kugeln erreicht wurde. Weitere Untersuchungen des ISE an unbeschichteten, aber polierten Kugeln (s.o.) ergaben, dass eine Transmissionsverbesserung auch durch die Politur und die damit verbundene Reduzierung der kleinen Oberflächenfehler erzielt werden kann.

Gegenüberstellung mit vorgegebenen Zielen:

Zusammenfassend waren im Teilvorhaben „Entwicklung und Herstellung von SOE für micro-CPV“ zwei Aufgabenbereiche für die SiLi Technologies GmbH abgesteckt:

Entwicklung bzw. Optimierung einer Herstellungstechnologie von kleinen sekundäroptischen Elementen (SOE) aus speziellem (optischem) Glas mit hoher Präzision und niedrigen Stückkosten:

- Unter Berücksichtigung technischer und ökonomischer Gesichtspunkte wurde zusammen mit den Partnern eisenarmes Kalk-Natronglas als zu verwendendes Glas festgelegt. ✓
- Die Designanforderungen an die Kugeln (Oberflächenqualität, Toleranzen, Blaseneinschlüsse) wurden unter Berücksichtigung der geforderten Minimierung der Kosten eingehalten ✓
- Mit der Fertigung mehrerer Prototypen und dem Einsatz verschiedener Nachbearbeitungsschritte wurden die Prozessgrenzen hinsichtlich Formtreue, optischer Güte und Toleranzen sowie Kostenminimierung festgelegt. ✓
- Die Projektpartner wurden für Packaging- und Testmodulentwicklung gemäß spezifizierten Parametern beliefert (unbeschichtete Kugeln) ✓

Anwendungsgerechte Antireflexionsschicht für Kugeln entwickeln:

- Eine Beschichtungstechnik zur Erzeugung mikrostrukturierter AR-Schichten auf Kugeln wurde im Projektverlauf entwickelt. Vollständig homogene Schichten konnten nicht erzielt werden, erweisen sich im Projektverlauf aber als nicht zwingend notwendig. ✓
- Breitbandige Antireflexionsschichten (VIS/NIR) wurden unter Berücksichtigung der geforderten Minimierung der Kosten hergestellt und bewertet, eine Steigerung der Transmission wurde erzielt ✓
- Die Projektpartner wurden für Packaging- und Testmodulentwicklung gemäß spezifizierten Parametern beliefert (AR-beschichtete Kugeln) ✓

2.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Tabelle 1: Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

| Ausgabenart | Nachgewiesen / [€] | Budget / [€] |
|--|------------------------|--------------|
| Personal * | 112.521,64 + 20.704,81 | 224.672,00 |
| Materialkosten | 5.490,00 | 79.002,00 |
| Vorhabenspezifische Abschreibungen | 24.127,92 | 21.797,00 |
| sonstige unmittelbare Vorhabenkosten | 0,00 | 6.000,00 |
| Dienstreisen * | 0,00 + 845,20 | 6.000,00 |
| Gesamt * | 142.139,56 + 21.550,01 | 337.471,00 |
| *: offene Kosten noch mit Abschlussrechnung anzufordern (s. Verwendungsnachweis) | | |

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Durch die Festlegung auf eisenarmes Solarglas in Verbindung mit den in Kapitel 2.1 beschriebenen Nachbearbeitungsschritten ist es möglich, Glaskugeln mit sehr enger Größenverteilung und guter

Oberflächenqualität als SOE für micro-CPV Module zu erzeugen. Dadurch kann die Transmission des Sonnenlichts auf den Halbleiterchip gesteigert und die Moduleffizienz erhöht werden.

Die Anschaffung des F40-Systems war unumgänglich, da bei der SiLi Technologies GmbH bis dato keine Möglichkeit zur Bestimmung der Reflexion und Schichtdicke an beschichteten Kugeloberflächen zur Verfügung stand. Anhand der mit dem Messgerät ermittelten Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass die entwickelte Beschichtungstechnologie die angestrebten Ergebnisse punktuell erfüllen konnte.

2.4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes

- Die Herstellung der SOE, sowie die Einstellung der notwendigen Parameter zur Erzielung der relevanten Durchmesserbereiche und Oberflächenqualitäten erweiterte sowohl das Prozessverständnis als auch die Anpassung der Prozessführung auf den Einsatz eisenarmen Solarglases als zukünftiges neues Produkt.
- Durch die Beschichtungsversuche konnte das firmeneigene Beschichtungs-Knowhow erweitert werden, insbesondere durch die Vibrationsbeschichtung
- Zudem erlaubt die Anschaffung des Schichtdickenmessgeräts zukünftig die Messung dünner Schichten und damit die Bewertung der Funktionalisierung von Glaskugeln für die SiLi Technologies GmbH.

2.5 Ergebnisse bei dritten Stellen

Es sind keine neuen Ergebnisse bekannt, die für dieses Vorhaben eine Relevanz hätten

2.6 Veröffentlichung der Projektergebnisse

- Hakan Okan - Charakterisierung und Optimierung der Reflexionseigenschaften von (Mikro-) Glaskugeln - Bachelorarbeit, TH Nürnberg, 30.04.2021
- Das Projekt wurde zudem in Vorträgen am 07.10.2021 bzw. 25.09.2023 auf dem sechsten und siebten CPV Forum am Fraunhofer ISE in Freiburg vorgestellt (online und in Präsenz)

3. Erfolgskontrollbericht

3.1 Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen

Das FuE Vorhaben orientiert sich an der Förderbekanntmachung Angewandte nichtnukleare Forschungsförderung im 7. Energieforschungsprogramm „Innovationen für die Energiewende“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie vom 1. Okt. 2018, in welcher unter §3.5.3 zur Weiterentwicklung alternativer PV-Materialien und Konzepte Schwerpunkte bei verringertem Materialeinsatz, effizienter Herstellung sowie Verarbeitung oder höchsten Wirkungsgraden und damit Kostenreduktionen auf Systemebene genannt sind.

Durch den Einsatz von Kugellinsen als Sekundäroptik werden ggü. dem Stand der Technik im Modul hohe Konzentrationsfaktoren (800-1000) erreicht, zudem der Akzeptanzwinkel und der Systemwirkungsgrad verbessert. Dies erlaubt eine weitere Miniaturisierung und damit beispielsweise Materialersparnis bei den eingesetzten Halbleitermaterialien. Durch die Beschichtung der Oberfläche, als auch durch die Steigerung der Oberflächengüte wird zudem die Transmission des solaren Lichts verbessert und Verluste entsprechend reduziert. Hierdurch sinkt auch die Energierückgewinnungszeit der CPV Module, entsprechend steigt die Nachhaltigkeit der CPV Systeme.

3.2 Wissenschaftliche Ergebnisse des Projekts

Im Rahmen des Projekts entstand zusammen mit der TH Nürnberg eine Bachelorarbeit, bei der grundlegende Ergebnisse zum Verhalten der AR-Beschichtungslösung bei der Tauchbeschichtung von planaren Gläsern und SOE gewonnen wurden.

3.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Aus dem Teilvorhaben haben sich keine Entwicklungen mit Erfindungshöhe ergeben. Somit sind keine schutzrechtlichen Anmeldungen im Projektzeitraum erfolgt. Zukünftig können SOE aus eisenarmen Solarglas mit und ohne AR-Beschichtung das firmeneigene Produktportfolio erweitern.

3.4 Arbeiten ohne Lösung

Bis auf die Erzeugung einer homogenen Mottenaugestruktur auf den SOE konnten alle Arbeitspakete erfolgreich bearbeitet werden

3.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Einige kg der projektspezifischen Kugeln sind bei SiLi auf Lager, die Prozessparameter für eine weitere Herstellung und Beschichtung, sowie mindestens ein möglicher Lieferant für eisenarmes Solarglas und die Beschichtungslösung sind bekannt

3.6 Einhaltung Kosten- und Zeitplan

Der Zeitplan konnte eingehalten werden. Durch die fördermittelneutrale Verlängerung um sechs Monate konnten ergänzende Untersuchungen zur Optimierung der Transmission der SOE durchgeführt werden.

Die Abweichungen beim Kostenplan ergaben sich aus der früh im Projekt festgelegten Abkehr von teuren optischen Spezialgläsern hin zu wesentlich günstigerem, eisenarmen Kalknatronglas.

4. Kurzfassung

Berichtsblatt

| | |
|---|---|
| 1. ISBN oder ISSN | 2. Berichtsart Schlussbericht |
| 3. Titel micro-CPV – Entwicklung eines hochkonzentrierenden CPV-Moduls auf Basis modernster Micro-Fertigungstechnologie Teilvorhaben: Entwicklung und Herstellung von SOE für micro-CPV | |
| 4. Autor(en) Dr.-Ing Sebastian Lehmann Dr. Alexander Wölfel | 5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2023 |
| | 6. Veröffentlichungsdatum |
| | 7. Form der Publikation |
| 8. Durchführende Institution(en) SiLi Technologies Oberwarmensteinacher Str. 38 95485 Warmensteinach | 9. Ber. Nr. Durchführende Institution |
| | 10. Förderkennzeichen 03EE1046H |
| | 11. Seitenzahl 12 |
| 12. Fördernde Institution Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 11019 Berlin | 13. Literaturangaben 13 |
| | 14. Tabellen 1 |
| | 15. Abbildungen 8 |
| 16. Zusätzliche Angaben Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor | |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) | |
| 18. Kurzfassung | |

Die bis zu 1000-fache optische Konzentration von Solarlicht in der konzentrierenden Photovoltaik (CPV) erhöht den Wirkungsgrad und verringert die eingesetzte Solarzellenfläche in CPV-Modulen. Hierdurch können teurere, aber besonders hocheffiziente III-V Mehrfachsolarzellen genutzt werden. Um Wettbewerbsfähigkeit mit herkömmlichen PV-Modulen zu erreichen, müssen jedoch die Modulkosten gesenkt werden. Als Zielsetzung des Verbundprojekts micro-CPV ergibt sich somit die Entwicklung von hochkonzentrierenden, industriell wettbewerbsfähig zu fertigenden μ -CPV (Konzentratorphotovoltaik) Modulen mit zweistufiger Optik mit Wirkungsgraden $> 36\%$ und Zielkosten von 90 €/m^2 bzw. $0,25 \text{ €/Wp}$. Dies soll durch die Lichtbündelung durch Vollglaslinsenarray auf Sekundäroptiken (Glaskugel) auf III-IV Konzentratorsolarzelle, sowie neue Herstellungs- und Fertigungsmethoden (Mikropackaging, Selbstorganisation), effizienten Materialeinsatz und Einsatz von Sekundäroptiken (Erhöhung Konzentration der solaren Strahlung) erreicht werden.

Im Projektzeitraum konnten durch die SiLi Technologies GmbH aus einer Massenfertigung heraus günstige SOE mit enger Durchmesserverteilung, hoher Rundheit und guter Oberflächenqualität erzeugt werden. Durch den Einsatz eisenarmen Solarglases wurde die inhärente Transmission der SOE bereits verbessert. Weiter Nachbearbeitungsschritte, die eine Polierung, als auch die Beschichtung der Kugeln mit einer breitbandigen Antireflexionsschicht umfassten, führten zu einer weiter gesteigerten Transmission der SOE. Insgesamt konnte die Modulleistung durch den Einsatz der SOE gesteigert werden. Durch eine Untersuchung des Einflusses der jeweiligen (Nach-) Bearbeitungsschritte auf die Modulleistung in Verbindung mit einer Aufstellung der pro Schritt verbundenen Kosten kann ein optimaler Kosten-Nutzenfaktor bestimmt werden.

19. Schlagwörter

CPV, micro-CPV, SOE, Glaskugel, Transmissionssteigerung, Antireflexionsbeschichtung

20. Verlag

21. Preis

Document Control Sheet

| | |
|--|-------------------------------------|
| 1. ISBN oder ISSN | 2. Type of document Final report |
| 3. Title micro-CPV – Entwicklung eines hochkonzentrierenden CPV-Moduls auf Basis modernster Micro-Fertigungstechnologie Teilvorhaben: Entwicklung und Herstellung von SOE für micro-CPV | |
| 4. Author(s) Dr.-Ing Sebastian Lehmann Dr. Alexander Wölfel | 5. End of project 30.09.2023 |
| | 6. Publication date |
| | 7. Form of publication |
| 8. performing organization(s) SiLi Technologies Oberwarmensteinacher Str. 38 95485 Warmensteinach | 9. Originator's report no. |
| | 10. Reference no. 03EE1046H |
| | 11. No. of pages 12 |
| 12. Sponsoring agency Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 11019 Berlin | 13. No. of references 13 |
| | 14 No. of tables 1 |
| | 15. No. of figures 8 |
| 16. Supplementary notes Responsibility for the content of this publication lies with the author | |
| 17. Presented at (titel, place, date) | |
| 18. abstract The 1000-fold optical concentration of solar light in concentrated photovoltaics (CPV) not only increases the efficiency but also reduces the necessary area of solar cells in CPV modules. Thus, expensive but particularly efficient III-IV multi-junction solar cells can be employed. To achieve competitiveness, the module cost must | |

be reduced. Therefore, the objective of the micro-CPV joint project is to develop highly concentrating μ -CPV (concentrator photovoltaics) modules with two-stage optics with efficiencies $> 36\%$ and target costs of 90 €/m^2 or 0.25 €/Wp that can be produced competitively on an industrial scale. This can be achieved by bundling light using a full glass lens array on secondary optics (glass sphere) on III-IV multi junction solar cells, as well as new manufacturing and production methods (micro-packaging, self-organisation), efficient use of materials and employment of secondary optics (increasing the concentration of solar radiation).

During the project period, SiLi Technologies GmbH was able to produce rather cheap SOE with a narrow diameter distribution, high roundness as well as good surface quality in a mass production process. The use of low-iron solar glass already improved the inherent transmission of the SOE. Further post-processing steps, which included polishing and coating the spheres with a broadband anti-reflective coating, led to further improvement in the transmission of the SOE. Overall, the module performance was increased by employing SOE. By analysing the influence of the respective (post) processing steps on the module performance in conjunction with a list of the costs associated with each step, an optimum cost-benefit factor can be determined.

19. keywords

CPV, micro-CPV, SOE, glass ball, increase of transmission, anti-reflectance coating

20. publisher

21. price