

micro-CPV Schlussbericht

Förderkennzeichen: 03EE1046A

Danksagung

Das Forschungsprojekt „micro-CPV“ wurde in der Zeit vom 01.04.2020 bis zum 31.12.2024 durch den Projektträger Jülich (PtJ) unter dem Förderkennzeichen 03EE1046A betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, wofür wir uns herzlich bedanken.

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (ISE), Freiburg, und Technische Universität Berlin (TUB), EVYTRA GmbH (vormals FELA GmbH) (EVYTRA), AZUR SPACE Solar Power GmbH (AZUR), DISCO HI-TEC EUROPE GmbH (DISCO), SiLi Technologies GmbH (SILI), Wagenbrett GmbH & Co. KG (WAG) und Fuchs Design GmbH (FUCHS) gemeinsam durchgeführt. Das Fraunhofer ISE hat das Projekt koordiniert. Dieser Bericht beinhaltet eine Beschreibung der Arbeiten und Ergebnisse des Verbundpartners Fraunhofer ISE im Teilprojekt 03EE1046A. Für die Arbeiten in den angeschlossenen Teilprojekten werden separate Abschlussberichte (Fkz.: 03EE1046-B bis H) durch die Verbundpartner eingereicht.

Gefördert durch:



**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

micro-CPV

Entwicklung eines hochkonzentrierenden CPV Moduls auf Basis modernster Micro- Fertigungstechnologie

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
in Freiburg

Förderkennzeichen: 03EE1046A
Berichtszeitraum: 01.04.2020 – 31.12.2024

Projektleitung **Dr. Henning Helmers**
henning.helmers@ise.fraunhofer.de

Mitarbeit
(in alphabetischer
Reihenfolge)

Khasan Abrorov, Aya Abd Alahi, Eduardo Ignacio Alvarez Brito, Dr. Jonas Bartsch, Armin Bösch, Dr. Gregor Bern, Andreas Brand, Benjamin Brehm, Alexander Dilger, Dr. Frank Dimroth, Tobias Dörsam, Elvira Fehrenbacher, Maitane Ferreres Eceiza, Rene Haberstroh, Homeira Hasheimi, Dr. Henning Helmers, Dimitre Iankov, Elisa Kaiser, Christoph Kudla, Dr. David Lackner, Dr. Juan Francisco Martinez Sanchez, Lucia Mehlhart, Gabriele Mikolasch, Hanan Mir, Dr. Peter Nitz, Michael Schachtner, Manuela Scheer, Thomas Schmidt, Dr. Jale Schneider, Dr. Peter Schöttl, Dr. Patrick Schygulla, Dr. Gerald Siefer, Urala Kalasi Gayashan Silva, Dr. Marc Steiner, Lysander Treumann, Alexander Wekkeli, Maike Wiesenfarth, Michaela Winterhalder, Nepomuk Zieske.

Juli 2025

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

Inhalt

Zusammenfassung.....	5
1. Ausgangssituation des Vorhabens.....	7
1.1 Aufgabenstellung.....	7
Übergeordnetes Gesamtziel.....	7
Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele	7
1.2 Voraussetzungen	7
Ausstattung und technische Voraussetzungen	8
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	12
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	14
Konzentratorsolarzelle	14
Konzentratoroptik	15
Packaging-Technologie	16
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	17
2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens	18
2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse	18
2.1.1 AP1 Modul- und Fertigungskonzept (Leitung: ISE).....	18
2.1.2 AP2 Micro-Konzentratorsolarzelle (Leitung: AZUR).....	30
2.1.3 AP3 Optik (Leitung: SILI)	39
2.1.4 AP4 Packaging Modul-Bodenplatte (Leitung: EVYTRA).....	48
2.1.5 AP5: Platzierung der Kugellinse (Leitung: WAGENBRETT)	55
2.1.6 AP6: Micro-CPV Modul (Leitung: ISE).....	60
2.2 Notwendigkeit der Arbeit.....	73
2.3 Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	73
2.4 Relevante Ergebnisse von dritter Seite	74
2.5 Schutzrechte und Veröffentlichungen	76
Referenzen	80

Zusammenfassung

Im Verbundprojekt „micro-CPV“ wurde unter der Koordination des Fraunhofer ISE ein neuartiges Konzentratorphotovoltaik (CPV)-Modulkonzept entwickelt, das durch Miniaturisierung von Solarzellen und Optiken die Übernahme kostengünstiger Fertigungsmethoden aus der LED- und Displayindustrie ermöglicht. Ziel war die Entwicklung eines wettbewerbsfähigen, industriell skalierbaren CPV-Moduls mit geringen Herstellungskosten. Für die Durchführung des Projekts wurde ein starkes Konsortium gebildet aus Industriepartnern (AZUR SPACE Solar Power, SiLi Technologies, EVYTRA, DISCO, FUCHS und Wagenbrett) für die Entwicklung der Komponenten und Prozesse, sowie dem Forschungspartner TU Berlin, mit wertvoller Erfahrung aus dem Bereich der Elektronikindustrie. Das Projekt gliederte sich in sechs Arbeitspakete, in denen alle wesentlichen Komponenten und Prozesse iterativ entwickelt, optimiert und zusammengeführt wurden.

Modul- und Fertigungskonzept (AP1): Das micro-CPV Moduldesign sowie die zugehörige Fertigungskette wurden iterativ unter Einbezug optischer, thermischer und elektrischer Aspekte entwickelt. Verschiedene Modulgrößen – von Einzelzellen bis zu Panel- und Wing-Formaten – wurden konzipiert. Einflüsse von Fertigungstoleranzen wurden mit Hilfe eines neu entwickelten statistischen Modells erstmalig quantitativ untersucht. Den größten Einfluss haben die Positionen von Solarzelle und Kugellinse. Thermo-mechanische Simulationen zeigten, dass thermische Ausdehnungen auch bei großflächigen Modulen keine signifikanten Leistungsverluste verursachen. Eine umfassende Kostenanalyse wurde durchgeführt.

Micro-Konzentratorsolarzelle (AP2): Es wurden verschiedene Micro-Solarzellendesigns (C500, C650, C1000) entwickelt und gefertigt. Die Charakterisierung zeigte, dass sowohl Perimeter-Rekombination als auch metallisierte Dunkelflächen relevante Spannungsverluste verursachen. Wafergebondete Vierfachzellen mit hohem Effizienzpotenzial wurden angepasst, konnten aber im Projektzeitraum noch nicht vollständig evaluiert werden. Für die Charakterisierung der Zellen und Module wurden neue Messmethoden entwickelt; zudem wurden laserbasierte, verlustarme Trennverfahren getestet.

Optik (AP3): Primär- und Sekundäroptiken wurden entwickelt und qualifiziert. Verlustanalysen des optischen Systems wurden durchgeführt. Silikon-auf-Glas-Linsen (SoG) erwiesen sich als optimale Primäroptik hinsichtlich optischer Effizienz und Herstellbarkeit. Fresnel-Linsen bieten ein hohes Kostensenkungspotenzial bei akzeptabler optischer Güte. Für die Sekundäroptik wurden Glaskugeln mit optimierter Antireflexbeschichtung und Nachpolitur eingesetzt, was die Transmission signifikant verbesserte. Eine neue Messmethode zur Charakterisierung der Kugellinsen wurde etabliert.

Packaging und Bodenplatte (AP4): Die Leiterplattenfertigung auf Glas wurde sowohl subtraktiv als auch additiv untersucht. Die Selbstausrichtung der Micro-Solarzellen mittels Lotpaste und Reflow-Prozess wurde erfolgreich umgesetzt und detailliert untersucht. Eine anfängliche

ebenso wie der Drahtbondprozess. Alterungstests bestätigten die Zuverlässigkeit der entwickelten Prozesse. Alle Fertigungsprozesse wurden auf die Panelgröße skaliert.

Platzierung der Kugellinse (AP5): Für die präzise Platzierung der Kugellinsen als Sekundäroptik wurde ein Schablonendruck- und Vakuum-Setzverfahren entwickelt und patentiert. Alterungs- und Klimatests zeigten, dass das eingesetzte thermisch härtende Silikon stabil und optisch geeignet ist. Die neue Anlagentechnik ermöglichte das parallelisierte Platzieren aller Kugellinsen auf einer Panel-formatigen Bodenplatte in hoher Präzision.

Micro-CPV Modulbau und Demonstration (AP6): Alle Komponenten und Prozesse wurden zunächst in Test- und Demonstrator-Modulen zusammengeführt. Das Demonstratormodul (6×10 Einheiten) erreichte einen Wirkungsgrad von 36.0% (CSTC) bzw. 33.0% (CSOC). Langzeitmessungen über zwei Jahre zeigten keine relevante Degradation. Die Modultechnologie wurde erfolgreich auf das Panel-Format (18"×24")

skaliert; erste Panel-Module erreichten unter Betriebsbedingungen bis zu 31.4% Wirkungsgrad. Akzeptanzwinkelmessungen bestätigten die hohe Toleranz gegenüber Fehlausrichtung.

Fazit: Das Projekt demonstriert die erfolgreiche Entwicklung eines skalierbaren, hochkonzentrierenden micro-CPV-Moduls mit hoher Effizienz. Die entwickelten Prozesse und Komponenten bilden die Grundlage für eine zukünftige industrielle Umsetzung. Die wichtigsten Herausforderungen für die nächste Entwicklungsstufe liegen in der weiteren Prozessoptimierung, Skalierung und Kostenreduktion. Neben den technischen Innovationen entstanden zahlreiche wissenschaftliche Veröffentlichungen, sowie Dissertationen und studentische Arbeiten, die die Projektergebnisse dokumentieren und weiterverbreiten.

1. Ausgangssituation des Vorhabens

1.1 Aufgabenstellung

Mit der konzentrierenden Photovoltaik (CPV) werden die höchsten Wirkungsgrade und niedrigsten Energierücklaufzeiten aller Photovoltaik-Technologien erreicht. Durch eine optische Konzentration des Sonnenlichts von bis zu 1000-fach wird der Wirkungsgrad erhöht und die erforderliche Fläche der Solarzellen reduziert. Dadurch können teurere, aber besonders hocheffiziente III-V Mehrfachsolarzellen genutzt werden. Die industrielle Umsetzung der CPV-Technologie wurde bereits in zahlreichen Multi-MW Kraftwerksinstallationen nachgewiesen. Um die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern, müssen allerdings die Modulkosten weiter gesenkt werden. Das Verbundprojekt „micro-CPV“ hatte zum Ziel ein neuartiges CPV-Modulkonzept zu entwickeln, welches geringere Herstellungskosten verspricht und die Wettbewerbsfähigkeit der CPV-Technologie steigert.

Übergeordnetes Gesamtziel

Das zentrale Projektziel ist die Entwicklung eines hocheffizienten Micro-Konzentratorphotovoltaik (micro-CPV)-Moduls mit einem Wirkungsgrad von mindestens 36% und Zielkosten von 90 €/m² bzw. 0.25 €/Wp.

Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

Das übergeordnete Gesamtziel des Projekts soll durch ein Design erreicht werden, das auf innovative Herstellungs- und Fertigungsmethoden sowie auf einen effizienten Materialeinsatz setzt. Dabei wird ein Miniaturisierungsansatz für die Solarzellen und damit auch für die Symmetrieeinheiten des optischen Systems implementiert. Dadurch sinkt der Wärmeeintrag pro Solarzelle, sodass die submillimeter-großen Micro-Solarzellen direkt auf Leiterplatten-basierte Bodenplatten montiert werden können (chip-on-board Technologie). Da die Solarzellkosten den wesentlichen Beitrag der Modulkosten ausmachen, ist ein wesentlicher Faktor zur Kostenreduktion der hohe Konzentrationsfaktor von bis zu 1000. Als optisches Konzept wird dafür ein zweistufiges System aus Primärlinsen-Array zur Sammlung des Lichts, sowie im Fokus befindlichen Glaskugellinsen als Sekundäroptiken direkt über den Micro-Solarzellen verfolgt. Das Ziel ist dabei sowohl hohe Konzentration als auch einen hohen Akzeptanzwinkel zu gewährleisten, so dass hohe Performanz auch bei unvermeidlich vorliegenden Prozesstoleranzen erreicht wird. Darüber hinaus werden Trennverfahren mit geringerem Schnittverlust beim Vereinzeln der Solarzellen entwickelt, sowie neue Verfahren bei der Herstellung der Leiterbahnstrukturen. Durch die Verwendung moderner Leiterplatten- und Packaging-Technologien werden die Micro-Konzentratorsolarzellen direkt auf das Panel montiert und verschaltet. Das „micro-CPV“ Modul wird auf Basis von optischen, elektrischen und thermischen Simulationen ausgelegt und konzeptioniert. Dabei werden Fertigungstechnologien und mechanische Aspekte berücksichtigt. Ziel ist die Demonstration der Technologie, zunächst auf sogenannter Sub-Modul Ebene (>200 cm²), dann auf der Zielmodulgröße im sogenannten Panel-Format, welche dem Industriestandard der Leiterplattentechnologie von 18" x 24" bzw. etwa 46x61 cm² entspricht.

Insgesamt stärkt das Projekt den Hochtechnologie-Standort Deutschland und unterstützt die Innovationsfähigkeit kleiner und mittelständischer Unternehmen, indem es technologische Risiken reduziert und neue Lösungen evaluiert.

1.2 Voraussetzungen

Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg ist das größte Solarforschungsinstitut Europas. Unsere rund 1400 Mitarbeitenden arbeiten für ein nachhaltiges, wirtschaftliches, sicheres und sozial gerechtes Energieversorgungssystem auf Basis erneuerbarer Energien. Dazu tragen wir mit unseren Forschungsschwerpunkten Energiebereitstellung, Energieverteilung, Energiespeicherung und Energie-

nutzung bei. Durch herausragende Forschungsergebnisse, erfolgreiche Industrieprojekte, Firmenausgründungen und globale Kooperationen gestalten wir die nachhaltige Transformation des Energiesystems.

In seinen marktorientierten Geschäftsfeldern Photovoltaik- Materialien, Zellen und Module, Photovoltaik-Produktionstechnologie und Transfer, Solarkraftwerke und Integrierte Photovoltaik, Leistungselektronik und Stromnetze, Elektrische Energiespeicher, Klimaneutrale Wärme und Gebäude, Wasserstofftechnologien sowie Systemintegration entwickelt das Institut Materialien, Komponenten, Systeme und Verfahren. Dafür steht uns eine hervorragende Laborinfrastruktur zur Verfügung. Zudem führen wir Analysen, Studien und Beratungen durch. Wir bieten unseren Kunden auch Prüf- und Zertifizierungsverfahren an. Das Fraunhofer ISE ist nach der Qualitätsmanagementnorm DIN EN ISO 9001:2015 zertifiziert.

Ein Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten am Fraunhofer ISE liegt im Bereich der Photovoltaik. Ziel ist dabei die anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung und der Transfer neuer Technologien in marktfähige Produkte. Neben konventionellen Si-basierten Solarzellen und Modulen werden auch neue Technologien wie die Konzentratorphotovoltaik entwickelt. Im Laufe der letzten 20 Jahre wurde in diesem Feld am ISE eine weltweit einmalige Expertise aufgebaut, welche von höchsteffizienten Mehrfach-solarzellen über Optiken, theoretische Modellbildung bis hin zur Modulfertigung und Systemanalyse reicht. Die Exzellenz der Forschung im Bereich Konzentratorphotovoltaik lässt sich an zahlreichen Rekorden festmachen. So hält das Institut den Weltrekord für die effizienteste Solarzelle unter konzentriertem Licht mit 47.6% [1,2] und den Rekord für das effizienteste CPV Minimodul mit 43.4% [1,3]. Auch wurde die FLATCON® Modultechnologie am Institut entwickelt mit Wirkungsgraden bis 36.7% (CSTC¹) und gemeinsam mit Concentrix Solar und später Soitec kommerzialisiert.

Im Folgenden werden die verschiedenen für das Projekt relevanten technischen Gegebenheiten am Fraunhofer ISE detaillierter beschrieben.

Ausstattung und technische Voraussetzungen

Durch die Jahrzehnte lange Erfahrung in der Entwicklung der Konzentratorphotovoltaik, wurde herausragendes Know-how gewonnen. Voraussetzungen für die Entwicklungen sind sowohl das vorhandene Verständnis der wesentlichen Zusammenhänge im System und dazu passende Simulationsmodelle (elektrisch, thermisch und optisch) als auch die sehr guten Laboreinrichtungen, die für die experimentelle Untersuchung und Prozessentwicklung am Fraunhofer ISE zur Verfügung standen.

Für die CPV-Modulentwicklung wurde die einzigartige Infrastruktur des Con-TEC (Concentrator Technology Evaluation Center)² (siehe Abbildung 1) genutzt. Im Labor können sowohl manuell als auch mit automatisierten Prozessen CPV-Module hergestellt werden. Damit können Prototypen realisiert werden, aber auch die Überführung in eine industrielle Produktionsumgebung oder Kleinserienfertigung ist möglich. Wichtig sind dabei hohe Präzision bei der Bestückung von kleinen Solarzellen oder Dioden. Die Bauteile werden durch Löten oder Kleben auf der Rückseite und mit Drahtbonds auf der Vorderseite elektrisch kontaktiert. Für den Vorderseitenkontakt stehen zudem verschiedene Schweißverbindungsprozesse zur Verfügung, und können für die elektrische Kontaktierung von kleinen Kontaktflächen angepasst werden, um einen geringen Spannungsabfall beim Stromtransport zu gewährleisten. Die Prozesse werden durch Scher- und Abzugstests, durch Geometrie- und Positionsvermessungen als auch durch Test der elektrischen Funktion überwacht. Für die Untersuchung neuer Module stehen Klimakammern zur Untersuchung der Alterungsbeständigkeit von Verbindungstechnologien zur Verfügung. Neben den Montageprozessen der Halbleiterbauelemente, können am Fraunhofer ISE auch Silikone als Linsen oder Verkapselungsmaterial verarbeitet werden. Dazu steht ein separater Laborbereich zur Verfügung. Die räumliche Trennung ist wichtig, um Kontamination für die Klebe- und Lötprozesse durch Ablagerung von flüchtigen Verbindungen auf den Oberflächen zu vermeiden. Die Ausstattung und

¹ „Concentrator Standard Test Conditions“ gemäß IEC 62670-3 [4].

² <http://s.fhg.de/con-tec>

Erfahrung mit den Montageprozessen bildete die Basis für die Entwicklungen im Projekt zum neuen micro-CPV Modulkonzept hinsichtlich Miniaturisierung von Komponenten, der damit einhergehenden Verarbeitung sehr kleiner Bauteile und entsprechenden Anforderungen an die Genauigkeiten.



Abbildung 1: Concentrator Technology Evaluation Center (Con-TEC) am Fraunhofer ISE. Im Con-TEC werden Modulkonzepte und Fertigungstechnologien für die Konzentratorphotovoltaik untersucht und evaluiert. Bilder von links nach rechts: Dickdrahtbondprozess für die Verschaltung von Solarzellenbaugruppen für die FLATCON®Technologie, Bestückung von Solarzellenbaugruppen auf Bodenplatte, und Testbereich Umweltsimulation mit Klimakammern. Bilder: © Fraunhofer ISE

Zur elektrischen Charakterisierung von CPV-Modulen sowohl im Labor als auch unter Außenbedingungen stehen Messplätze zur Verfügung. Der Außenmessplatz mit Nachführeinheit, automatisierter Datenerfassung und vielfältiger Sensorik der Umgebungs- und Einstrahlungsbedingungen erlaubt die normgerechte Bestimmung von kalibrierten Wirkungsgraden gemäß IEC 62670-3 [4] nach sogenannten Konzentrator-Standardtestbedingungen (engl. Concentrator Standard Test Conditions, CSTC). In Abbildung 2 ist links die Nachführeinheit des Außenmessplatzes bestückt mit unterschiedlichen CPV Modulen auf dem Dach des Fraunhofer ISE gezeigt. Für die Bewertung der Leistung werden hier auch die relevanten Umgebungsbedingungen (Einstrahlung, Temperatur, Spektrum) gemessen und aufgezeichnet.

Durch langjährige Aktivitäten im Bereich Design und Charakterisierung von CPV-Optiken verfügt das Fraunhofer ISE über umfangreiche Simulations- und Designwerkzeuge sowie Charakterisierungs- und Qualifizierungsmethoden für refraktive Optiken. Schwerpunkte liegen dabei auf Silikon-auf-Glas (SoG) Fresnellinsen sowie Sekundäroptiken aus Glas oder Silikon. Mit verschiedenen Messplätzen kann am ISE ermittelt werden, wie die Bestrahlungsstärke auf der Solarzelle eines konzentrierenden PV-Systems verteilt ist. Für Fresnel-Linsen-basierte Konzentratoren steht ein Linsenmessplatz Verfügung (siehe Abbildung 2 rechts). Ebenso ist ein Messplatz zur Messung der Bestrahlungsstärke an der Austrittsapertur von Sekundäroptiken für linsenbasierte Konzentratorsysteme vorhanden. Für optische Simulationen steht das intern stetig weiter entwickelte Simulationswerkzeug „Raytrace3D“³ auf Basis eines Monte Carlo Forward-Strahlverfolgungsmodells zur Verfügung. Dies wurde speziell für solare Anwendungen entwickelt, insbesondere für die konzentrierende Photovoltaik und konzentrierende solarthermische Systeme. Thermische Verformungen von optischen Elementen können mithilfe von FEM-Softwarepaketen durchgeführt und in die optische Simulation überführt werden.

Neben den optischen Prüfmethoden können auch Materialprüfungen (Temperaturstabilität, Alterung, Gebrauchsdauerabschätzung) an Reflektormaterialien durchgeführt werden. Dabei kann auf Knowhow aus der institutseigenen PVD (physical vapor deposition)-Schichtentwicklung zurückgegriffen werden.

³ <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/raytrace3d.pdf>

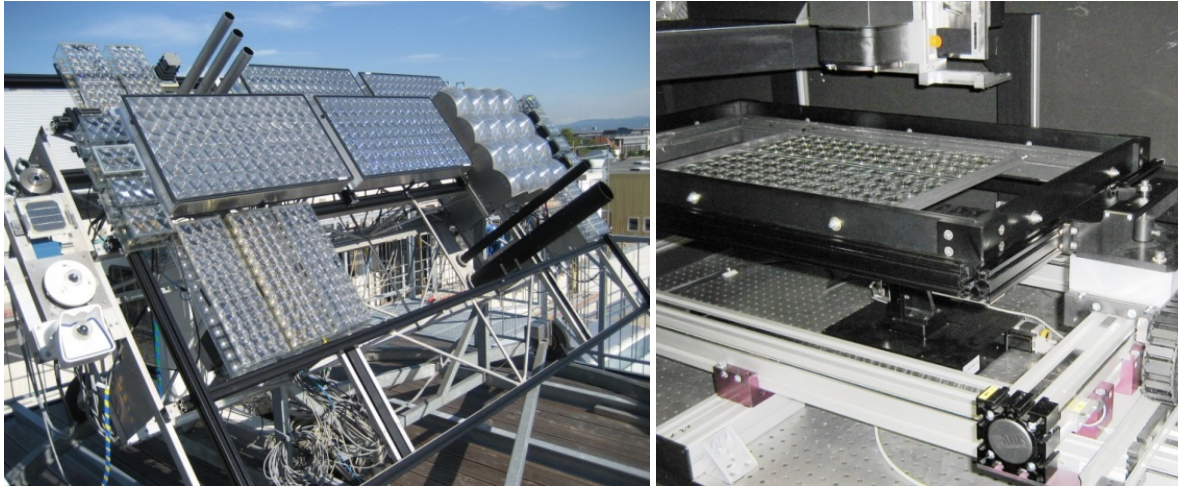


Abbildung 2: Links: Außenmessplatz des Fraunhofer ISE zur elektrischen Vermessung von CPV-Modulen. Rechts: Aufbau zur Messung der Lichtverteilung in der Brennebene von Silikon-auf-Glas Primärlinsenplatten. Zu sehen ist eine auf der Verfahrachse montierte Linsenplatte. Über der Linsenplatte befindet sich die Lichtquelle, unterhalb des Linsenarrays ist eine Kamera zur Aufnahme der Bestrahlungsverteilung integriert. Bilder: © Fraunhofer ISE

Im Bereich der Entwicklung hocheffizienter Solarzellen für die CPV, werden komplexe III-V Halbleiterschichtstrukturen epitaktisch auf Wafersubstraten gewachsen. Dazu wird das Verfahren der metallorganischen Gasphasenepitaxie (engl. metal organic vapor phase epitaxy, MOVPE) genutzt. Hierzu stehen zwei produktionstaugliche Anlagen der Firma Aixtron aus Aachen zur Verfügung (siehe Abbildung 3).

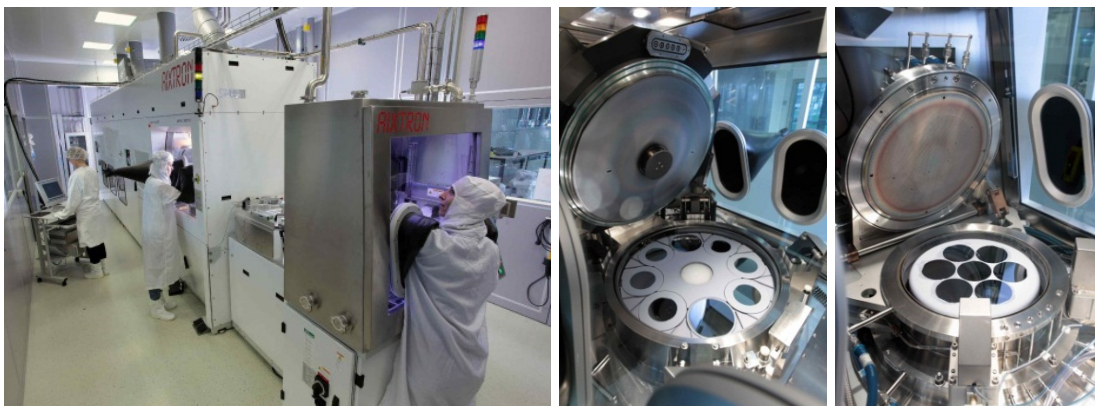


Abbildung 3: Links: Industrietaugliche MOVPE-Anlage am Fraunhofer ISE. Rechts: Blick in die Reaktorkammer der AIX2800-G4-R Anlage (mit 8x6" Konfiguration) sowie in die Reaktorkammer der CRIUS CCS Anlage (7x4" Konfiguration). Bilder: © Fraunhofer ISE

Die Epitaxiestrukturen werden im Reinraumlabor im „Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen (ZHS)“ des Fraunhofer ISE zu Solarzellen prozessiert (siehe Abbildung 4). Unter anderem steht hier ein eigenes Labor für das Wafer-Bonden zur Verfügung, welches zwei Maschinen für das Wafer-Bonden, eine Substratreinigungsanlage, eine Anlage zum chemisch-mechanischen Polieren, sowie Charakterisierungsgeräte für Partikel auf Oberflächen sowie Bond-Fehlstellen beherbergt.



Abbildung 4: Reinraumlabor des Fraunhofer ISE mit Bond-Labor und Bond-Kammer (oben), sowie Nasschemie (mitte) und Photolithographie (unten). Siehe auch <https://www.ise.fraunhofer.de/de/fue-infrastruktur/center/zentrum-fuer-hoechsteffiziente-solarzellen.html> Bilder: © Fraunhofer ISE

Neben den Laboren für die Epitaxie und Prozessierung der Solarzellen, stehen am Fraunhofer ISE zahlreiche Charakterisierungsgeräte für Halbleiterschichten, wie die Röntgendiffraktometrie, Photolumineszenz, ECV Profiling, Rasterkraftmikroskopie, Hall van-der-Pauw Messungen usw. zur Verfügung. Die hervorragende Laborinfrastruktur ist eine wesentliche Grundlage dafür, dass die Prozesse eingehend verstanden und optimiert werden können.

Die kalibrierte Charakterisierung von Solarzellen am Fraunhofer ISE wird im Kalibrierlabor „ISE CalLab PV Cells“ durchgeführt. Das Labor ist für die Leistungsvermessung von Standard Silicium Solarzellen gemäß ISO/IEC 17025 beim Deutschen Kalibrierdienst DKD als Kalibrierlabor akkreditiert. Zusätzlich ist das „ISE CalLab PV Cells“ eines der wenigen Prüfzentren weltweit, die die kalibrierte Vermessung von III-V Mehrfachkonzentratorsolarzellen mit mehreren pn-Übergängen durchführen können. Die Rückkopplung durch die schnelle und präzise Vermessung der hergestellten Konzentratorzellen ist ein wesentlicher Grund für die hervorragende Stellung des Fraunhofer ISE auf dem Gebiet der Herstellung und Entwicklung von III-V Mehrfachkonzentratorsolarzellen.

Neben der präzisen Vermessung steht mit dem I-V MAPCON auch ein Messplatz zur automatisierten Messung von vielen Konzentratorsolarzellen auf Wafer-Ebene zur Verfügung. Die Vereinzelung und Montage der Zellen ist also nicht erforderlich. Für die Fertigung von CPV Modulen ist zudem die Bestimmung der Zellparameter einer größeren Anzahl von Zellen erforderlich, was im Einzelverfahren sehr aufwändig wäre. Beleuchtet werden die Zellen dazu mit einer einzelnen Blitzlampe mit Intensitäten bis über 1000-facher Sonnenkonzentration. Dies erlaubt statistische Auswertungen von Hunderten oder Tausenden auf einem Wafer befindlichen Konzentratorsolarzellen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Gesamtvorhaben ist in sechs Arbeitspakete (AP) gegliedert und wurde im Verbund mit acht Partnern durchgeführt (mehr zu den Partnern in Abschnitt 1.5). Die Aufgaben in den einzelnen AP wurden in den Teilvorhaben der Partner bearbeitet, wobei mehrere Partner in mehreren AP mitarbeiten. Hier wird daher auch auf die Abschlussberichte der Teilvorhaben der Partner verwiesen. Im Folgenden wird eine kurze Zusammenfassung der AP gegeben, gefolgt von einer tabellarischen Auflistung der AP und Aufgaben darin mit Stichworten zu den Forschungs- und Entwicklungsinhalten.

In AP1 wird das Modul- und Fertigungskonzept erarbeitet, unter Berücksichtigung des Inputs aller Partner zu Komponenten und Prozessen, sowie geleitet von und begleitet durch thermische, optische, und elektrische Modellierung. Parallel zur technischen Entwicklung werden in AP1 technologische Fortschritte auf relevanten Themengebieten verfolgt und die Entwicklung mit einer techno-ökonomischen Analyse begleitet. AP2 umfasst die Entwicklung und Charakterisierung der Micro-Konzentratorsolarzellen. Dazu werden sowohl marktverfügbare III-V/Ge Mehrfachsolarzellen an das notwendige Design angepasst, als auch ein wafergebondeter Ansatz, der höhere Wirkungsgrade verspricht, verfolgt. Zudem werden Trennverfahren entwickelt, die den Sägeverschnitt (engl. kerf loss) bei der Vereinzelung Tausender Micro-Solarzellen auf einem Wafer reduzieren. In AP3 werden die eingesetzten Primär- und Sekundäroptiken entwickelt und qualifiziert. Dazu werden verschiedene technologische Ansätze zur Herstellung der Komponenten betrachtet und evaluiert. Eingebettet sind die Entwicklungen durch optische Simulationen und die Montagetechnologie zum Setzen der Kugellinsen. In AP4 werden die Fertigungsverfahren zur Herstellung der Modul-Bodenplatten entwickelt und bewertet. Schwerpunkte sind dabei die Leiterplattentechnik und Definition der Leiterbahnstrukturen, das präzise Setzen der Micro-Konzentratorsolarzellen, sowie deren elektrische Kontaktierung und Verschaltung. Neben der direkten Chip-on-Board Montage der Konzentratorzellen wird eine Variante mit vormontierter Konzentratorzelle und Bypassdiode in einem integrierten Chip Scale Package als Studie betrachtet und bewertet. In AP5 werden die Prozesse zur präzisen Platzierung und optischen Anbindung der Kugellinse als Sekundäroptik auf den mit Solarzellen bestückten Leiterplatten entwickelt. Dabei wird ein aus der Mikroelektronik bekanntes Schablonendruck-Verfahren für Lotkugeln für die Glaskugeloptiken adaptiert und Prozesse für den Silikondruck sowie die Anlagentechnik und Prozesse zur Kugelbestückung entwickelt. Im letzten AP6 wird schließlich die Modulaufbautechnologie entwickelt, sowie alle Komponenten und Fertigungsverfahren zusammengebracht. Zur Beantwortung spezifischer Entwicklungsfragen werden geeignete Testmodule definiert, hergestellt, und charakterisiert. Messergebnisse werden zudem zur iterativen Verbesserung und Validierung der thermischen, optischen, und elektrischen Simulationen in AP1 genutzt. Das micro-CPV Modulkonzept wird zunächst anhand eines Demonstratormoduls der Sub-Modul Klasse (Aperturfläche $A_{ap} > 200 \text{ cm}^2$) demonstriert. Im Rahmen einer Projektaufstockung und -verlängerung werden die Prozesse

und Komponenten für das 24"x18" Panel-Format demonstriert und ein Panel-formatiges Modul gefertigt und charakterisiert.

Das Vorhaben wurde insgesamt im Zeitraum 01.04.2020 bis 30.12.2024 durchgeführt.

Arbeitspaket (AP)	F&E Aufgaben (Leitung unterstrichen)
AP1 Modul- und Fertigungskonzept (Leitung: ISE)	1.1 Modul- & Fertigungskonzept (<u>ISE</u> , TUB, EVYTRA, SILI, WAG, FUCHS) 1.2 Thermisches Design (<u>ISE</u> , EVYTRA) 1.3 Optisches Design (<u>ISE</u> , FUCHS, TUB, SILI, WAG) 1.4 Elektrische Verschaltung (<u>ISE</u>) 1.5 Technologieüberwachung (<u>ISE</u> , TUB, EVYTRA, AZUR, DISCO, SILI, WAG, FUCHS) 1.6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Kostenstudie (<u>TUB</u> , ISE, EVYTRA, AZUR, DISCO, SILI, WAG, FUCHS)
AP2 Micro-Konzentratorsolarzelle (Leitung: AZUR)	2.1 Zelldesign (<u>ISE</u> , AZUR) 2.2 III-V/Germanium-basierte Solarzellen (<u>AZUR</u>) 2.3 Wafer-gebundene Mehrfach-Solarzellen (<u>ISE</u>) 2.4 Charakterisierung & Evaluierung (<u>ISE</u> , AZUR) 2.5 Verlustfreies Trennverfahren (<u>DISCO</u> , ISE)
AP3 Optik (Leitung: SILI)	AP3.1 Primäroptik Linsenplatte (<u>FUCHS</u> , ISE) AP3.2 Sekundäroptik (<u>SILI</u> , ISE) AP3.3 Optik Charakterisierung & Evaluierung (<u>ISE</u> , SILI)
AP4 Leiterplatte und Packaging (Leitung: EVYTRA)	4.1 Gedruckte Metallisierung (<u>EVYTRA</u> , ISE) 4.2 Gedruckte Isolation (<u>EVYTRA</u> , ISE) 4.3 Leiterplatte (<u>EVYTRA</u> , ISE) 4.4 Lötstoppbarriere (<u>EVYTRA</u> , ISE) 4.5 Lotauftrag (<u>WAG</u> , ISE) 4.6 Bestückung Halbleiterchips (<u>ISE</u>) 4.7 Vorderseitenkontaktierung (<u>EVYTRA</u> , ISE) 4.8 Chip Scale Package Studie (<u>TUB</u>)
AP5 Montage der Sekundäroptik (Leitung: WAG)	5.1 Anlagen-Konfiguration (<u>WAG</u> , TUB) 5.2 Prozessentwicklung Silikon-Depot (<u>TUB</u> , ISE) 5.3 Prozessentwicklung Glaskugelpplatzierung (<u>TUB</u> , WAG, ISE) 5.4 Entwicklung Printing & Balling Station (<u>WAG</u> , ISE)
AP6 Micro-CPV Modul	6.1 Entwicklung Modulaufbau (<u>ISE</u>) 6.2 Fertigung Testmodule (<u>ISE</u>)

(Leitung: ISE)	6.3 Modulcharakterisierung und -evaluierung (ISE) 6.4 Micro-CPV Demonstratormodul (ISE, TUB, EVYTRA, SILI, WAG, FUCHS)
----------------	---

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Bei Projektbeginn waren weltweit mehrere 100 MW an CPV installiert [5], die teilweise über mehrere Jahre ohne signifikante Degradation in Betrieb waren. Mit Wirkungsgraden bis 38.9 % bei Konzentrador-Standard-Testbedingungen stellt die CPV-Technologie weltweit die effizienteste PV-Technologie dar [6]. Die Kosten müssen jedoch weiter gesenkt werden, um am Markt gegenüber der etablierten Silizium-Photovoltaik und deren um Größenordnungen höheren Produktionsvolumina erfolgreich sein zu können.

Am Fraunhofer ISE wurde seit Anfang der 0er Jahre die FLATCON®-Modultechnologie entwickelt, welche von der Firma Soitec, vormals Concentrix Solar, kommerzialisiert wurde [7,8]. In dieser Technologie wurden üblicherweise Konzentrationsfaktoren von wenigen Hundert bis etwa 640 realisiert. Da die Solarzelle die teuerste Komponente im Modul darstellt, können durch eine Erhöhung des Konzentrationsfaktors die Kosten direkt reduziert werden. Im „micro-CPV“ Projekt wird daher der Konzentrationsfaktor durch Einsatz einer zweiten optischen Stufe (Sekundäroptik) auf 1000 erhöht.

Neben der Erhöhung der Konzentration liegt ein hohes Potenzial zur Kostensenkung in der Fertigungstechnologie und hier insbesondere in dem Ansatz der Miniaturisierung [9] und dem Einsatz Sub-Millimeter-kleiner Solarzellen. Solche micro-CPV Module wurden beispielsweise von der US-amerikanischen Firma Semprius entwickelt. Auch hier wurden Micro-Konzentratorsolarzellen (Kantenlänge 600 µm) und Kugellinsen-Sekundäroptiken eingesetzt. Die Micro-Zellen wurden in einem speziellen Druckprozess („Transfer Printing“) parallelisiert verarbeitet [10]. In der Produktion wurden durchschnittliche Wirkungsgrade von 35 % für Module mit Konzentrationsfaktoren über 1000 berichtet [11]. Die Firma ist allerdings seit 2017 nicht mehr am Markt aktiv. Ebenfalls entwickelte die japanische Firma Panasonic Prototypen für ein CPV-Modul mit Micro-Solarzelle (Kantenlänge 970 µm), wobei PMMA-basierte Primär- und Sekundäroptiken eingesetzt werden [12]. Die Micro-Zellen wurden dabei mit einem Lötprozess unter Ausnutzung des Selbstausrichtungseffekts direkt auf eine Leiterplatte aufgebracht. In den USA wurden zudem weitere Technologien für die Mikromontage von CPV-Modulen im Rahmen des Projekts MOSAIC durch das ARPA-E gefördert.⁴ Wesentliche Vorteile der Miniaturisierung sind, die thermische Leistung pro Zelle zu verringern und damit die Anforderung an das thermische Management deutlich zu vereinfachen, die Konzentration zu erhöhen und ebenso die Module sehr dünn zu bauen. Gleichzeitig entstehen Herausforderungen durch das Verarbeiten und die Verschaltung einer sehr großen Anzahl von kleinen Bauelementen. Der Ansatz profitiert von Synergien zu anderen Industriezweigen, in welchen ebenfalls eine Miniaturisierung erfolgt. Dies gilt beispielsweise für die Displayindustrie. Insbesondere für µ-LEDs werden Hunderttausende optoelektronische Bauelemente kostengünstig auf große Flächen im Bereich mehrerer Quadratmeter assembliert und verschaltet. Hier sind namhafte Firmen wie Apple, Samsung und LG involviert, welche ein hohes Entwicklungstempo vorlegen und die Kosten schnell senken.

Im Folgenden wird in Kürze der Stand-der-Technik zu Projektbeginn für wichtige Modulkomponenten bzw. Herstellungsprozesse zusammengefasst, welche im Rahmen des micro-CPV Projekts weiterentwickelt wurden.

Konzentratorsolarzelle

Die Firma AZUR SPACE Solar Power in Heilbronn ist weltweit führend in der Produktion kommerzieller Solarzellen für die Konzentrationanwendung. Unter dem Namen 3C44 wurde eine metamorphe

⁴ <https://arpa-e.energy.gov/programs-and-initiatives/view-all-programs/mosaic> [letzter Zugriff: 25.06.2025]

GalnP/GalnAs/Ge Dreifachsolarzelle mit einem Wirkungsgrad von bis zu 44% unter konzentriertem Licht (Konzentrationsfaktor $C=250$) angeboten⁵ und in zahlreichen CPV-Kraftwerken eingesetzt. Bei diesem sogenannten metamorphen Konzept wird auf dem Germaniumsubstrat mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie (metal organic vapor phase epitaxy, MOVPE) zunächst eine Pufferschicht gewachsen, welche die Gitterkonstante des Kristalls erhöht und dabei zwingend auftretende Versetzungen einfängt. Auf der erhöhten Gitterkonstante werden dann die oberen beiden Teilzellen gewachsen. Zu Projektbeginn wurde außerdem eine Fünffachsolarzelle [13] mit einem Zielwirkungsgrad von über 45 % eingeführt und im Rahmen des Projektes für die micro-CPV Anwendung getestet.

Der höchste Wirkungsgrade zur Wandlung von solar Strahlungs- in elektrische Leistung wurden mit Vierfachsolarzellen aus GalnP/AlGaAs/GalnAsP/GalnAs [14,15] erreicht. Dazu werden jeweils gitterangepasst und somit versetzungsfrei zwei Zweifachsolarzellen auf verschiedenen Substraten mittels MOVPE gewachsen: eine invertierte GalnP/AlGaAs Zelle auf Galliumarsenid, sowie eine GalnAsP/GalnAs Zelle auf Indiumphosphid (bzw. sogenannten kostengünstigeren „engineered substrates“ mit der gleichen Gitterkonstante wie Indiumphosphid). Zur Realisierung der Vierfachzellstruktur wird die invertierte GalnP/AlGaAs Zweifachzelle mittels Halbleiter-Waferbonding auf die GalnAsP/GalnAs Zweifachzelle übertragen und im Anschluss das Galliumarsenidsubstrat entfernt. Solche Solarzellen wurden insbesondere im BMWK geförderten Projekt „50PROZENT“ (Fkz.: 03EE1060) entwickelt und im Rahmen des Projekts „micro-CPV“ für die Anwendung in der micro-CPV untersucht.

Bisherige Konzentratorsolarzellen hatten typischerweise Flächen im Bereich weniger mm^2 bis cm^2 . Die pn-Übergänge der Zellen werden üblicherweise zunächst über eine sogenannte Mesa-Ätze nasschemisch getrennt (Grabenbreite $\geq 70\text{--}200\text{ }\mu\text{m}$) und im Anschluss werden die Bauteile mit einer Präzisionssäge ($\sim 15\text{--}30\text{ }\mu\text{m}$ Sägeblatt) separiert. Dabei entstehen Verluste an Halbleitermaterial, welche bei sehr kleinen Bauteilen einen signifikanten Anteil des Wafers ausmachen.⁶ Im Bereich der Mikroelektronik wurde ein neues unter dem Namen „Scribe&Break“ bekanntes Trennverfahren für Silizium-Bauelemente entwickelt. Hierbei wird der Wafer zunächst nur wenige Mikrometer angeritzt (mechanisch mit konventionellem Sägeblatt oder mittels Laserablation). Im Anschluss wird er dann entlang dieser Linie definiert entlang des Kristallgitters gespalten. Durch anschließendes Expandieren können die kleinen Chips dann gepickt werden. Dieses Verfahren wurde noch nicht auf Germanium-basierte III-V Bauelemente und Solarzellen angewendet, zeigte aber das Potenzial sowohl den Mesa-Ätzprozess, als auch den Sägeprozess zu ersetzen und gleichzeitig den Sägeverlust von Halbleitermaterial zu verhindern.

Konzentratoroptik

Bei Projektbeginn war der Stand der Technik für Primäroptiken Fresnel-Linsenarrays aus Silikon auf Glas oder Polymethylmethacrylat (PMMA). Dabei werden einzelne Linsen im Array in großen Flächen parkettiert. Sowohl die Ausgangsmaterialien als auch der Herstellungsprozess dominieren die Kosten. Im micro-CPV Projekt wurden alternative und kostengünstigere Verfahren zur Herstellung von Vollglaslinsen untersucht. Objekte aus Glas mittlerer Größe (Glasbausteine oder -dachziegel wie z.B. von Partner FUCHS gefertigt) können kostengünstig über Prägeprozesse hergestellt werden. Die Güte war allerdings noch begrenzt und musste für die Konzentratoroptiken weiter verbessert werden. Als völlig neuartiges Herstellungsverfahren für kleine Optiken wurde außerdem der 3D-Druck von Glas bzw. analoge replikative Verfahren aus entsprechenden Ausgangsmaterialien bewertet. Solche Optiken wurden von der Forschungsgruppe von Prof. Rapp (Institut für Mikrosystemtechnik IMTEK, Universität Freiburg) bereits vielversprechend demonstriert [16].

Sekundäroptiken für die CPV-Anwendung wurden bereits in verschiedenen Materialien und Formen realisiert, z.B. als reflektierende Trichter aus Metallspiegeln, aus Silikon oder aus Glas (Domlinsen oder totalreflektierend kaleidoskopisch). Allerdings standen dem Mehrwert im System die vergleichsweise

⁵ <http://www.azurspace.com/index.php/en/products/products-cpv/cpv-solar-cells> [letzter Zugriff 25.06.2025]

⁶ Beispiel: Werden $600 \times 600\text{ }\mu\text{m}^2$ Chips mit $70\text{ }\mu\text{m}$ breiten Mesagräben/Sägestraßen vereinzelt, entspricht dies einem Flächenverlust von 20%. Bei $200\text{ }\mu\text{m}$ Mesagräben machen diese sogar 44% der Waferfläche aus.

hohen Kosten für Herstellung und präzise Montage entgegen. Eine kostengünstige Sekundäroptik bilden Glaskugeln. Die Herausforderung liegt hier in der Herstellung von kleinen Glaskugeln (typischerweise Durchmesser von wenigen mm) mit entsprechender Formtreue und Oberflächenqualität, sowie einer präzisen aber kostengünstigen Montage. Partner SILI produzierte solche Glaskugeln als Sekundäroptik aus unterschiedlichen Gläsern und mit verschiedenen Durchmessern. Unter anderem wurden solche Kugeloptiken für die micro-CPV Module von Semprius hergestellt [17]. Um zusätzliche optische Verluste durch die Glaskugeln zu vermeiden, wurde im Projekt eine kostengünstige Antireflex-Beschichtung entwickelt.

Packaging-Technologie

Bisherige Konzentratormodule nutzen meist Solarzellen, welche zunächst auf einen Kühlkörper geklebt bzw. gelötet, und dort mit einer Bypassdiode über einen Au Drahtbond verschaltet und kontaktiert wurden. Diese Einheiten wurden dann mit sehr hoher Setzgenauigkeit auf die Modulbodenplatte in den Fokuspunkt der Linsen geklebt und über weitere Dickdrahtbonds seriell bzw. parallel verschaltet (siehe Abbildung 1). Bei der im Projekt entwickelten Miniaturisierung der Solarzellen steigt die Anzahl der Bauelemente, welche pro Quadratmeter verarbeitet werden müssen, und damit sind diese bisherigen Fertigungsmethoden im Mikrometer-Bereich aus wirtschaftlicher Sicht nicht zielführend. Ziel musste es daher sein, in Zukunft schnellere und kostengünstigere Verfahren für das Packaging der Konzentratorsolarzellen und die Integration auf der Modulbodenplatte zu entwickeln. Angelehnt an Ansätze aus der Mikroelektronik bzw. Displayfertigung wurden neue Ansätze untersucht. Zunächst konnte über den Einsatz von Leiterplatten die Möglichkeit auf eine individuelle Verschaltung der Solarzellen verzichtet werden. Die Verbindungen zwischen den Zellen sind durch die Leiterbahnstrukturen bereits vordefiniert. Als Substratmaterial wird standardmäßig der Verbundwerkstoff FR4 eingesetzt. Eine interessante Alternative bietet Glas, dessen geringer thermischer Ausdehnungskoeffizient zur Linsenplatte aus Glas passt und somit vorteilhaft im Hinblick auf thermische Ausdehnung und die Zellposition relativ zur Linsenposition im Betrieb bei Erwärmung des Moduls ist. Aus eben diesen Gründen dient Glas auch als Bodenplatte im FLATCON® CPV-Modul. EVYTRA setzte bereits seit Jahren auch Glas als Schaltungsträger ein und verfügt über eine eigene Glasmanufaktur für die mechanische und optische Bearbeitung. Solche Leiterplatten auf Glas wurden bisher für die CPV-Anwendung noch nicht eingesetzt und wurden in dem Projekt micro-CPV erstmals erprobt. Das Standardverfahren für die Metallisierung der Leiterplatte (für FR4 wie Glas) ist das Aufbringen einer dünnen Kupferfolie (typische Stärken sind 17 µm und 35 µm) über eine flächige Verklebung mit einer dünnen Schicht Epoxidharz. Zur Definition der Leiterbahnen wird dann lithographisch eine Lackmaske aufgebracht und anschließend das Kupfer überall dort nasschemisch entfernt, wo später keine Leiterbahnen vorliegen sollen (subtraktives Herstellungsverfahren). Als Alternative zum subtraktiven Herstellungsverfahren wurde im Projekt die Herstellung von gedruckten Leiterbahnstrukturen mittels Inkjet beim Projektpartner FEVYTRA untersucht. Dieses additive Verfahren mit Metalltinten und -pasten wurden bisher noch nicht für die Herstellung von Leiterbahnen eingesetzt, verspricht jedoch Vorteile bezüglich der Kosten- und Ressourceneffizienz.

Die Montage von Halbleiterbauelementen auf der Leiterplatte erfolgt typischerweise in einem Lötprozess. In der Halbleiterindustrie werden zunehmend Flip-Chip Prozesse eingesetzt, welche das Setzen einzelner Drahtbonds vermeiden und eine gute thermische und elektrische Anbindung an das Substrat erlauben. Alle Kontakte des Bauteils müssen hierzu auf der Rückseite angeordnet sein. Im sogenannten Fan-Out Wafer-Level Packaging für z.B. Chip Scale Packages in der Optoelektronik werden die aktiven Komponenten auf Wafer-Ebene in Polymer eingebettet, kontaktiert und verschaltet, zudem kann z.B. eine Optik aufgebracht werden.⁷ Um Kosten zu reduzieren, werden die Formate kontinuierlich vergrößert, so dass nicht mehr im Waferformat, sondern großformatige Panels (bis 24"×18") verwendet wurden [18]. Diese Technologie ist u.a. getrieben von der Displayfertigung und Leiterplattentechnologie und wurde von Firmen wie PowerTech in Taiwan, Nepes und Samsung in Korea vorangebracht. Die Leiterplattenbestückung erfolgt gemäß des Stands-der-Technik mittels Pick&Place Bestückautomaten. Um die Anforderungen an die Setzgenauigkeit auf der Leiterplatte zu reduzieren, eignen sich Prozesse der

⁷ Embedded Die Packaging: Technology and Market Trends 2017 report – Yole Développement – December 2016

Selbstausrichtung (Nutzung der Rückstellkraft der Oberflächenspannung des flüssigen Lotes). Diese Prozesse sind dazu geeignet ein ungenau gesetztes Bauelement in ein mittels Lötstopp-Barriere definiertes Kontaktpad auf der Leiterplatte zu ziehen und dort durch das Lot zu fixieren. Die Positionsgenauigkeit wird also durch die Genauigkeit der Lötstopp-Barriere bzw. der Leiterbahnstruktur und nicht durch die Bestückgenauigkeit definiert. Entsprechend sinken die Anforderungen an die Bestückung, was eine schnellere und kostengünstigere Fertigung erlaubt. Beim Wafer-level Packaging wird das erforderliche Lot dabei z.B. in Form vorgeformter Lotkugeln auf der Rückseite der Bauelemente aufgebracht. Für diesen auch „Balling“ genannten Prozess entwickelte die Firma Wagenbrett Anlagen bis 12"/300 mm Wafer für die parallelisierte, massenfertigungs-taugliche Lotkugelplatzierung („Printing & Balling Station“). Als erstes wird dabei ein adhäsives Flussmitteldepot im Schablonendruck aufgebracht. Im Anschluss werden die Lotkugeln ebenfalls über eine Schablone auf diese Flussmitteldepots in Position gebracht (Gravitationsprinzip), wo sie aufgrund der Adhäsionseigenschaften auch bei anschließendem Waferhandling exakt verbleiben. Bei Wagenbrett beträgt die Prozesszeit einer solchen Lotkugelplatzierung unter 3 Minuten pro Wafer. Die Fehlerrate liegt bei nur 2 Fehlstellen bei 52'000 platzierten Lotkugeln pro Wafer, was einer Ausbeute von 99,996% entspricht. Für Prozesse, die eine höhere Ausbeute erfordern, kann eine Mehrfach-Lotkugelplatzierung durchgeführt und damit die Ausbeute praktisch auf 100% werden.⁸ Im Projekt „micro-CPV“ wurde diese Technologie erstmalig auch zur optischen Kopplung (Druck von Silikon statt Flussmittel) und Bestückung der Sekundäroptiken (Kugellinsen statt Lotkugeln) getestet und evaluiert.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das „micro-CPV“ Projekt wurde als Verbundprojekt durchgeführt. Acht Partner mit unterschiedlichem Hintergrund, darunter kleine und mittlere Unternehmen (KMU), Industrieunternehmen, eine Universität und ein Fraunhofer-Institut, arbeiteten erfolgreich zusammen. Das Fraunhofer ISE übernahm im Vorhaben die Rolle des Projektkoordinators und war neben den technischen Entwicklungsaufgaben auch für die Abstimmung zwischen den Partnern und hinsichtlich der Komponenten und Prozessschritte verantwortlich. Das Konsortium war so zusammengestellt, dass neben den CPV erfahrenen Partnern AZUR SPACE Solar Power, SiLi Technologies und Fraunhofer ISE auch die CPV-Neulinge EVYTRA, DISCO, FUCHS, Wagenbrett, und TU Berlin ihr jeweiliges Spezialwissen und -knowhow sowie innovative Prozesse und Erfahrung aus anderen Bereichen mit einbringen konnten.

Ein enger Austausch zwischen den Partnern fand in regelmäßigen Projekttreffen statt. Neben dem intensiven inhaltlichen Austausch dienten diese Treffen auch dazu die Labore, Fertigungslinien und Prozesse aller Partner kennen zu lernen.

Als universitärer Forschungspartner beteiligt war:

Technische Universität Berlin (TUB) (Fkz: 03EE1046F Teilprojekt), Schwerpunkte: Entwicklung des Prozesses zur Montage der Sekundäroptik, Anfertigen einer Studie zum Einsatz einer Chip Scale Package Lösung, Kostenstudie

Darüber hinaus waren folgende Firmen aktiv und involviert:

AZUR SPACE Solar Power GmbH (AZUR) (Fkz: 03EE1046E Teilprojekt), Schwerpunkt: Entwicklung von III-V/Ge basierten Micro-Konzentratorsolarzellen als 3-fach und 5-fach Struktur, Anpassung an für das micro-CPV Modul geforderte Zelldesign

SiLi Technologies GmbH (SILI) (Fkz: 03EE1046H Teilprojekt), Schwerpunkt: Entwicklung und Fertigung von Kugellinsen zum Einsatz als Sekundäroptiken, Evaluierung von Antireflexbeschichtungen

⁸ Mehrafsun, *Prozesssicheres Reballing*. Productronic 12, 2009, p. 33.

FELA GmbH (EVYTRA), während der Laufzeit umbenannt in Evytra GmbH (Fkz: 03EE1046B Teilprojekt), Schwerpunkt: Entwicklung von Leiterbahnstrukturen und Evaluierung von additiven Fertigungsverfahren für gedruckte Metallisierungs- und Isolatorschichten

DISCO HI-TEC EUROPE GmbH (DISCO) (Fkz: 03EE1046C Teilprojekt), Schwerpunkt: Test und Evaluierung von verlustfreien Trennverfahren zur Vereinzelung von III-V/Ge basierten Micro-Solarzellen

Fuchs Design GmbH (FUCHS) (Fkz: 03EE1046G Teilprojekt), Schwerpunkt: Übertragung von kostengünstiger Prägetechnik zur Glasbearbeitung in den Bereich Linsenoptiken zur Fertigung von Vollglaslinsen als Primäroptiken

Wagenbrett GmbH & Co. KG (WAGENBRETT) (Fkz: 03EE1046D und 03EE1046I Teilprojekt), Schwerpunkt: Entwicklung innovativer Anlagentechnik zur präzisen Montage von Glaskugellinsen auf Panel-formatigen Bodenplatten

2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

2.1.1 AP1 Modul- und Fertigungskonzept (Leitung: ISE)

Im ersten Arbeitspaket wurde das micro-CPV Moduldesign und Fertigungskonzept entwickelt und fortlaufend in enger Abstimmung zwischen Modellierungen und experimentellen Ergebnissen an Solarzellen (AP2), zur Optik (AP3), der Leiterplatte und Bestückung (AP4), Platzierung der Kugellinse (AP5), sowie an Testmodulen (AP6) iterativ verfeinert. Dabei wurden optische, thermische und elektrische Einflüsse ganzheitlich betrachtet. Zentrale Ziele waren die Realisierung eines hohen Konzentrationsfaktors bei moderater Zellerwärmung. Zudem wurde die Sensitivität gegenüber Fertigungstoleranzen und Fehlausrichtung des Modules untersucht.

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Status
M1a	Modul- und Fertigungskonzept finalisiert (ISE)	erreicht
M1b	„Lastenheft“ erstellt für Komponenten und Prozesse für die Modulfertigung (ALLE, Leitung ISE)	erreicht
M1d	Kostenanalyse für Komponenten und Prozessschritte abgeschlossen (ALLE, Leitung TUB))	erreicht

Modul- & Fertigungskonzept

Zu Beginn des Vorhabens wurde das mit der Projektskizze konzeptionierte Moduldesign weiter ausgearbeitet und verschiedene Ansätze möglicher Prozessketten für die Montage erstellt. Eine Übersicht der finalen Prozesskette ist in Abbildung 5 gezeigt. Eine Leiterbahnstruktur auf Glas bildet die Bodenplatte und den Startpunkt der Fertigung. Zur Bestückung der Micro-Solarzellen werden zunächst im Schablonendruck Pasten-basierte Lotdepots auf die gesamte Bodenplatte appliziert, darauf werden dann die Solarzellen im Hochdurchsatzverfahren seriell bestückt, eine geringe Bestückgenauigkeit ist dabei akzeptabel. Das Lot wird in einem Reflow-Prozess aufgeschmolzen. Aufgrund der Oberflächenspannung des flüssigen Lots werden die zunächst ungenau bestückten Micro-Chips auf den Kontaktpads der Leiterbahnstruktur zentriert. Durch Drahtbonden wird die Vorderseite elektrisch kontaktiert. Mit einem weiteren Schablonendruckschritt werden die Solarzellen samt Drahtbonds in Silikon eingekapselt. Dieses dient zudem der optischen Anbindung und mechanischen Befestigung der nun folgenden Kugellinsen als Sekundäroptiken. Die Kugellinsen werden mit einem Bekugelungsverfahren parallelisiert bestückt und das Silikon

ausgehärtet. Abschließend wird die Bodenplatte zu einer Linsenplatte mit einem Array von Primäroptiken ausgerichtet und über einen Rahmen miteinander verklebt.

Im Projekt wurden unterschiedliche Modulgrößen betrachtet:

- Für Forschungs- und Entwicklungsfragen wurden sowohl einzelne Zell-Linsen-Einheiten als kleinste Symmetrieelemente des Modulkonzepts untersucht, als auch kleine Testmodule aus 3×3 Einheiten.
- Zur Demonstration der Technologie wurde ein Array aus 6×10 Einheiten entwickelt, welches mit einer Aperturfläche von 205 cm² in der Kategorisierung von Solarmodulen der „Submodul“-Klasse entspricht [19].
- Die Zielgröße für Module ist das sogenannte Panel-Format, ein typisches in verschiedenen Industrien genutztes Format von 24"×18" (etwa 61×46 cm²).
- Für die Systemintegration wurde darüber hinaus ein größeres Modulformat in der Größenordnung konventioneller Silizium-Flachmodule betrachtet. Solche sogenannten Wing-Module bestehen aus mehreren Panel-Modulen und vereinfachen die Integration und Justage auf der Nachführeinheit (siehe Abbildung 6).

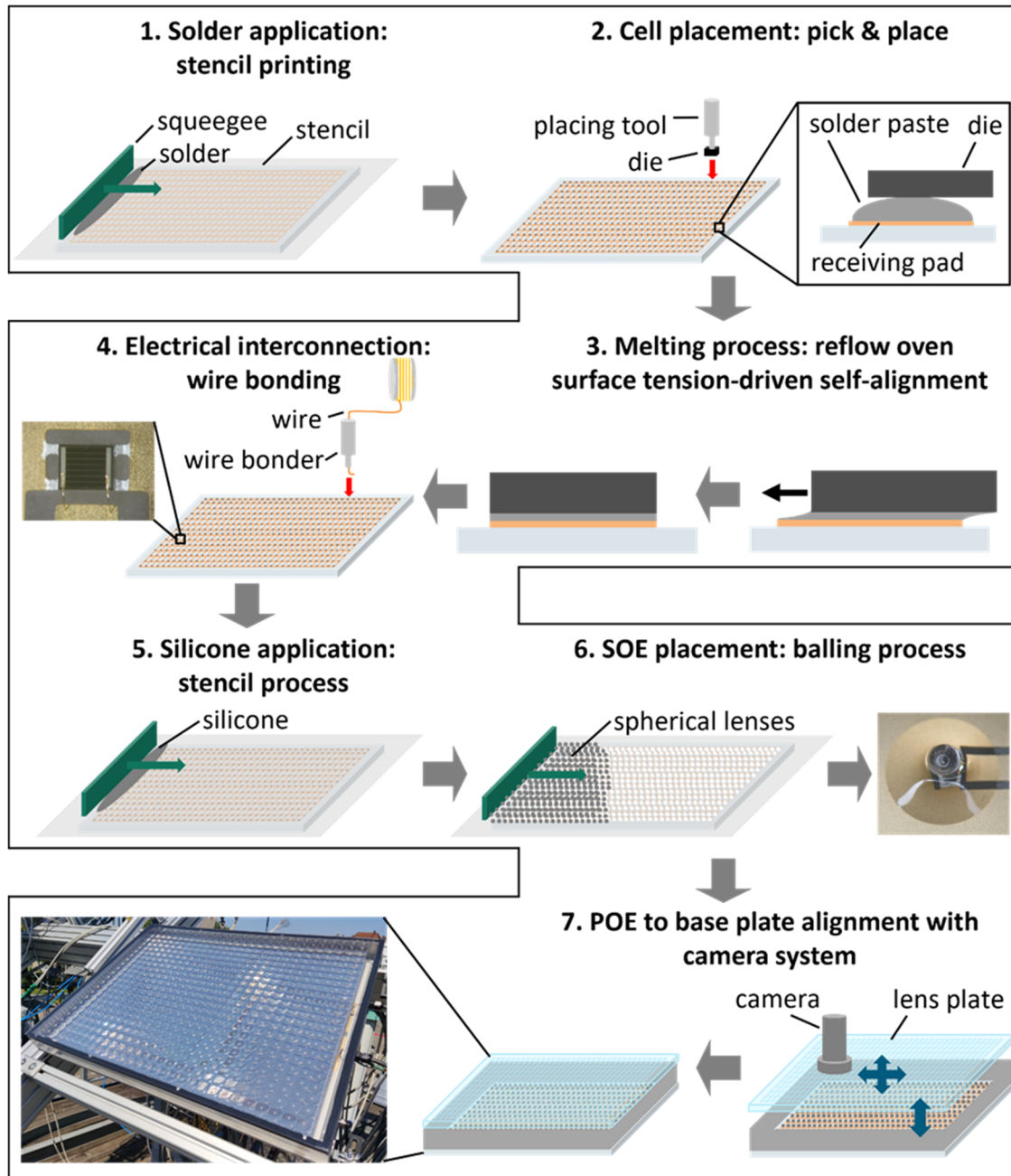


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Prozessflusses zur Fertigung eines Panel-formatigen micro-CPV Moduls. Ausgangspunkt ist eine Leiterbahnstruktur auf Glas als Bodenplatte. 1. Lotpastenauftrag mittels Schablonendruck-Verfahrens, 2. Solarzellplatzierung mittels Hochdurchsatz-Pick-and-Place-Verfahren. 3. Aufschmelzen der Lotpaste im Reflow-Ofen, Selbstausrichtung der Solarzellchips aufgrund von Rückstellkräften, die durch Oberflächenspannungen induziert werden. 4. Elektrische Verschaltung der Vorderseitenkontakte der Solarzellen mit der Leiterbahn mittels Drahtbonds. 5. Silikonantrag mittels Schablonendruckverfahren. 6. Bestückung jeder Solarzelle mit einer Kugellinse als Sekundäroptik. Silikondepots dienen als optische und mechanische Verbinder, und gleichzeitig der Einkapselung der Solarzellen. 7. Verbindung von Bodenplatte mit Primärlinsenarray über Modulrahmen. 8. Fertiges Panel-Modul montiert auf zweiachsiger Nachführeinheit am Fraunhofer ISE. Grafik aus [20]



Abbildung 6: Illustration des micro-CPV-Systems, das für die Stromerzeugung in Ländern mit hoher direkter Sonneneinstrahlung entwickelt wird. Sogenannte Wing-Module werden mit Hilfe einer zweiachsigen Nachführeinheit im Tilt-and-Roll Verfahren dem Sonnenstand nachgeführt. Grafik: © Fraunhofer ISE. Aus ⁹

Thermisches Design und Verhalten des Moduls

Im CPV-Modul definiert die Apertur der Primäroptik den Wärmeeintrag in eine Solarzelle. Im micro-CPV-Modul fungiert die Leiterbahnstruktur sowohl als elektrische Verbindung zwischen den Solarzellen, als auch für die Verteilung der Wärme. Ein Vorteil der Miniaturisierung ist, dass die Wärmelast bei Reduktion der Solarzellenfläche abnimmt. Allerdings bedeutet eine Verkleinerung der Solarzelle eine Zunahme der Bauteile im Modul. Außerdem nimmt der Anteil der Rekombinationsverluste an den Rändern der Solarzelle und durch anteilig höhere Dunkelflächen zu. Im Projekt wurde die gewählte Primäroptikapertur von $18.5 \times 18.5 \text{ mm}^2$ und der aktiven Solarzellenfläche von $0.585 \times 0.585 \text{ mm}^2$ durch eine detaillierte Optimierungsstudie zwischen den thermischen Verlusten durch erhöhte Solarzellentemperatur zu den Rekombinationsverlusten festgelegt. Die Ergebnisse wurden in einem wissenschaftlichen Fachjournal [21] und einem Konferenzbeitrag [22] veröffentlicht.

- M. Wiesenfarth, M. Steiner, H. Helmers, A.W. Bett, *Voltage losses due to the perimeter and dark area in micro-concentrator solar cells*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 2021. 219: 110791. DOI: [10.1016/j.solmat.2020.110791](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110791)
- Maike Wiesenfarth, Juan F. Martinez, Marc Steiner, Dimitre Iankov, Peter Nitz, Frank Dimroth, Henning Helmers, *Technical Boundaries of Micro-CPV Module Components: How Small Is Enough?*, in: Proceedings of the 17th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-17), 2021. Virtual conference hosted in Freiburg, Germany. AIP 2550, 030008. DOI: [10.1063/5.0099878](https://doi.org/10.1063/5.0099878)

Thermische Ausdehnung der Modulkomponenten im Panel-Format im Betrieb

Ein wichtiger Punkt für die Skalierung der micro-CPV Technologie auf das Panel-Format (24"x18", 690 Zell-Linsen-Einheiten) ist die Frage inwiefern thermische Ausdehnungen der Komponenten im Betrieb und eine damit einhergehende räumliche Verschiebung der Komponenten zueinander Einfluss auf die Leistungsfähigkeit haben. Dies wurde mittels einer Finite Elemente Simulation untersucht.

Abbildung 7a zeigt ein Schema des simulierten Symmetrieelements. Das im Modell untersuchte Modul besteht aus einer $610 \times 455 \times 4 \text{ mm}^3$ messenden Bodenplatte aus Glas mit einer $30 \text{ }\mu\text{m}$ dicken Kupfer-Leiterbahnstruktur. Zur Vereinfachung des Modells wurden die einzelnen Solarzellen, Bonddrähte, Silikondepots und Kugellinsen in der thermo-mechanischen Analyse vernachlässigt. Die Linsenplatte wird ebenfalls vereinfacht modelliert als 3 mm dicke Glasplatte ohne Silikon. Die Verbindung der beiden Platten

⁹ <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/news/2024/prototype-for-next-generation-concentrating-photovoltaics.html> [letzter Zugriff 25.6.2025]

erfolgt über einen Edelstahlrahmen. Aufgrund der vorliegenden Symmetrie ist es ausreichend nur ein Viertel des Moduls zu simulieren.

Die thermische Ausdehnung wird für eine Umgebungstemperatur von 27.7 °C angenommen. Damit ergibt sich eine Linsentemperatur von 30.5 °C. Die Spitzentemperaturen auf der Bodenplatte an den Zellpositionen betragen max. 70.3 °C. Abbildung 7b zeigt das Ergebnis der modellierten thermische Ausdehnung in x-Richtung U_x (lange Seite des Moduls). Die Bodenplatte dehnt sich um bis zu 65 μm aus, während sich die Linsenplatte um bis zu 24 μm ausdehnt. Die relative Verschiebung von Linsen- zu Bodenplatte beträgt daher maximal 41 μm . In Richtung der kurzen Seite des Moduls beträgt diese maximal 33 μm . Die vertikale Verschiebung, also die Änderung des Abstandes zwischen Linsen- und Bodenplatte, beträgt bis zu 218 μm .

Die Auswirkungen solcher Verschiebungen zwischen den Positionen der Primärlinse und der Solarzelle wurden mittels Raytracing Simulationen untersucht.¹⁰ Die Verschiebung resultiert in optischen Verlusten, also einfallenden Strahlen die nicht auf die Solarzelle treffen und daher den Strom reduzieren. Abbildung 8a zeigt die simulierte Auswirkung einer Verschiebung von Linsen- zu Bodenplatte auf den Strom für eine einzelne Zell-Linsen-Einheit. Für die maximal durch Ausdehnung erwartete laterale Verschiebung um 41 μm (grau eingefärbter Bereich) wird gemäß Modell keine wesentliche Stromabnahme erwartet. Selbst für eine Verschiebung um ca. 350 μm beträgt die erwartete relative Stromabnahme lediglich 0.5%. Dieses Verhalten zeigt eindrücklich den Nutzen der Kugellinse als zweite optische Stufe, welche das Licht auch bei leicht versetzt einfallendem Brennfleck noch effektiv auf die Solarzelle bündelt. Auch eine vertikale Verschiebung um 218 μm hat keinen nennenswerten Einfluss auf den Strom (vgl. grauer Bereich in Abbildung 8b). Erst eine Verringerung des Abstands um 1350 μm würde zu einer relativen Reduktion des Stroms um 0.5% führen. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass keine wesentliche Auswirkung der thermischen Ausdehnung auf die Leistungsfähigkeit eines Panel-formartigen Moduls zu erwarten ist.

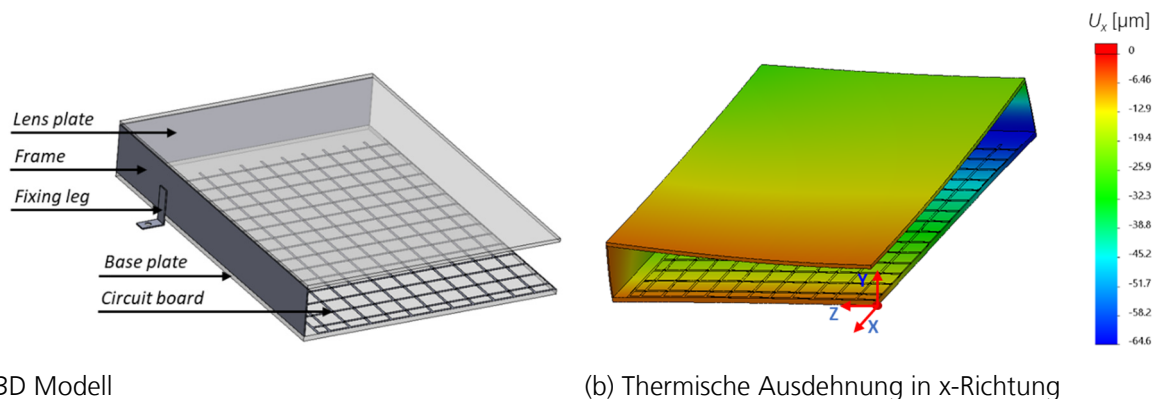
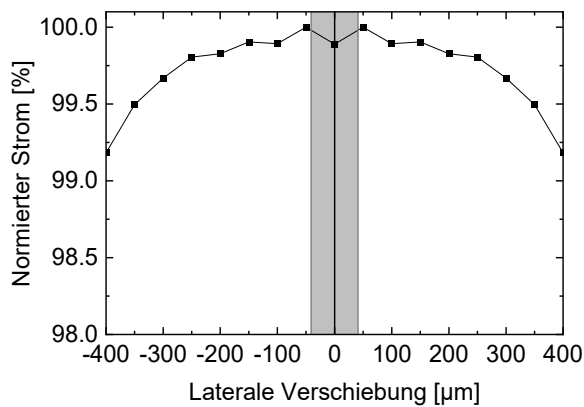
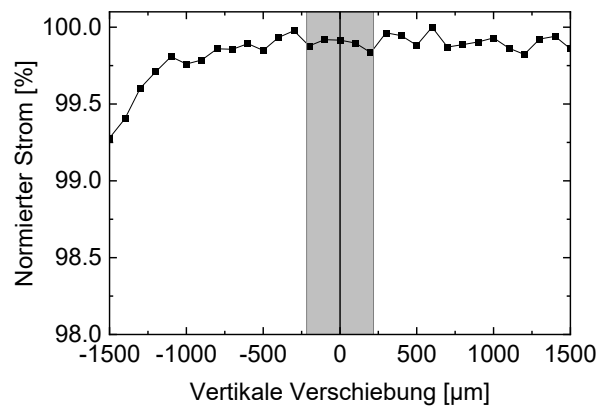


Abbildung 7. Thermo-mechanische Simulation des Panelmoduls. Aufgrund von Symmetriebedingungen wird nur ein Viertel des Moduls simuliert. (a) Das Modul wird vereinfacht durch Glasplatte, Leiterbahnstruktur, Linsenplatte, Rahmen und Rahmenhalterung im 3D Modell repräsentiert. (b) Ergebnis der Simulation: Die Ausdehnung der Linsenplatte in x-Richtung U_x beträgt max. 65 μm (blau), die der Bodenplatte max. 24 μm (grün).

¹⁰ Durchgeführt mit der am Fraunhofer ISE entwickelten Software „Raytrace3D“.



(a) Laterale Verschiebung der Linse zur Bodenplatte.



(b) Vertikale Verschiebung der Linse zur Bodenplatte

Abbildung 8. Einfluss einer Verschiebung auf den Strom einer einzelnen Zell-Linsen Einheit. Modelliert wurde mittels Strahlverfolgungsmodell Raytrace3D in spektraler Auflösung der Einfluss auf das optische System (unter der Annahme von ansonsten idealer Ausrichtung aller Komponenten). Der Strom wurde ermittelt durch räumliche Integration über der Empfängerfläche und Faltung mit der spektralen Empfindlichkeit der Teilzellen der Mehrfachsolarzelle. Dargestellt ist der Strom der limitierenden Teilzelle. Die grauen Bereiche markieren die erwarteten maximalen Verschiebungen aufgrund thermischer Ausdehnung aus dem FEM Modell. In diesen Bereichen ist keine signifikante Abnahme erkennbar.

Thermische Ausdehnung der Modulkomponenten im Wing-Format

Die thermische Ausdehnung wurde auch für größere Bodenplatten im Wing-Design simuliert und in vergleichbarer Weise die Auswirkung auf den elektrischen Strom berechnet.

Betrachtet dazu drei verbundene Boden- und Linsenplatten mit einer Länge x Breite von jeweils $1.3 \times 0.579 \text{ m}^2$, sodass die Gesamtfläche $1.3 \times 1.74 \text{ m}^2$ beträgt. Im Finite-Elemente-Modell (FEM)-wurde dann der Einfluss der thermischen Ausdehnung und Gravitation simuliert. Angenommen wurde eine homogene Linsen- und Rahmentemperatur von 35°C und eine Bodenplattentemperatur von 65°C . Abbildung 9 zeigt die thermo-mechanische Verschiebung der Linsen- zur Bodenplatte in (a) x-Richtung und (b) y-Richtung. Die maximalen relativen Verschiebungen von Linsenplatte zu Bodenplatte, entsprechend dem maximalen Versatz zwischen Brennpunkt der Optik und Solarzelle, betragen 183 μm in x-Richtung und 220 μm in y-Richtung. Gemäß der folgenden optisch-elektrischen Simulation (unter der Annahme ansonsten idealer Ausrichtungen aller Komponenten) führen diese Verschiebungen zu einer maximalen Stromreduktion der betroffenen Solarzellen um lediglich 0.4%, da die im Vergleich zu Solarzelle deutlich größere Sekundäroptik das Licht auch trotz Verschiebung einfängt und auf die Zelle lenkt.

Als Fazit ist festzuhalten, dass auch bei einer deutlichen Vergrößerung der Modulfläche auf $1.3 \times 1.74 \text{ m}^2$ keine signifikanten Verluste durch thermo-mechanische Verschiebung erwartet werden.

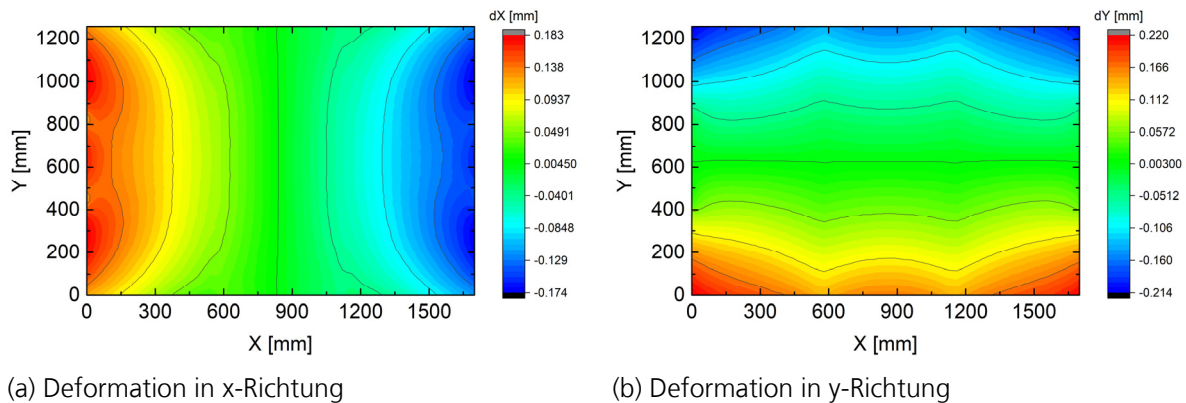


Abbildung 9: Thermo-mechanische Deformation der Linsen- zur Bodenplatte aufgrund von thermischer Ausdehnung und Gravitation bei einer homogen angenommenen Linsen- und Rahmentemperatur von 35°C und Bodenplattentemperatur von 65°C.

Optisches Design und Modellierung

Das optische Design wurde in einem iterativen, modellgestützten Ansatz entwickelt und die wesentlichen Parameter Primäroptikapertur und Glaskugeldurchmesser festgelegt. Dazu wurde ein Strahlverfolgungsmodell in der am Fraunhofer ISE entwickelten Simulationsumgebung Raytrace 3D entwickelt und untersucht. Bei der Optimierung berücksichtigt wurden dabei sowohl die optische Effizienz, die Homogenität der Einstrahlung auf der Solarzellenoberfläche sowie der Akzeptanzwinkel gegenüber Fehljustage. Das Vorgehen wurde auch in Ref. [22] veröffentlicht.

- Maik Wiesenfarth, Juan F. Martinez, Marc Steiner, Dimitre Iankov, Peter Nitz, Frank Dimroth, Henning Helmers, *Technical Boundaries of Micro-CPV Module Components: How Small Is Enough?*, in: Proceedings of the 17th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-17), 2021. Virtual conference hosted in Freiburg, Germany. AIP 2550, 030008. DOI: [10.1063/5.0099878](https://doi.org/10.1063/5.0099878)

Im gewählten Design mit einer Primäroptikapertur von 18.5x18.5 mm², einem Glaskugeldurchmesser von 1.6 mm und einer Fokusslänge von 44 mm werden sowohl eine hohe optische Effizienz von 84.2 % (ohne ARC) und ein hoher Akzeptanzwinkel von $\pm 0.73^\circ$ bei gleichzeitig geringem Maximum-zu-Mittelwert-Verhältnis der Einstrahlung von 3 erwartet. Für Details zum Vorgehen wird auf die oben genannte Veröffentlichung verwiesen, weitere Ergebnisse zur Optikentwicklung finden sich zudem in AP3 unten.

Eine beispielhafte Studie aus dem optischen Modell zeigt im Folgenden eine Betrachtung des Akzeptanzwinkels. Abbildung 10 zeigt das simulierte Profil der Intensitätsverteilung im idealen Designfall (ideale Geometrie, Positionen und Ausrichtung aller Komponenten) bei senkrechter Ausrichtung zur Sonne (links). Micro-Empfänger einer Größe von 585x585 μm^2 (C1000 Zelldesign, siehe AP2) empfangen den Brennfleck vollständig, wobei das Intensitätsmaximum auf eine etwa 350x350 μm^2 messende Fläche trifft. Bei Verkipfung des Moduls gegenüber der Sonne (entsprechend eine 2-achsigen Nachführung mit endlicher Genauigkeit), verändert sich der Strahlengang und damit auch der Brennfleck. Der Brennfleck bei einem 0.7° verkippten Modul (aber ansonsten weiterhin idealer Geometrie und Ausrichtung der Modulkomponenten zueinander) ist in der Abbildung 10 rechts gezeigt. Die Verkipfung resultiert in einer leichten Veränderung und Verschiebung des Intensitätsmaximums des Brennflecks. Ein geringer Anteil der Strahlen wird an der Kugellinse abgelenkt, sodass die Strahlen erst im Abstand von ca. 0.8 mm wieder auf die Empfängerebene treffen (weißer Kreis entspricht Kugeldurchmesser). Der wesentliche Strahlenanteil trifft aber weiterhin auf eine 585x585 μm^2 messende Micro-Solarzelle (weiß gestricheltes Quadrat). Die Reduktion des optischen Wirkungsgrads beträgt bei dieser Verkipfung 10%_{rel.}

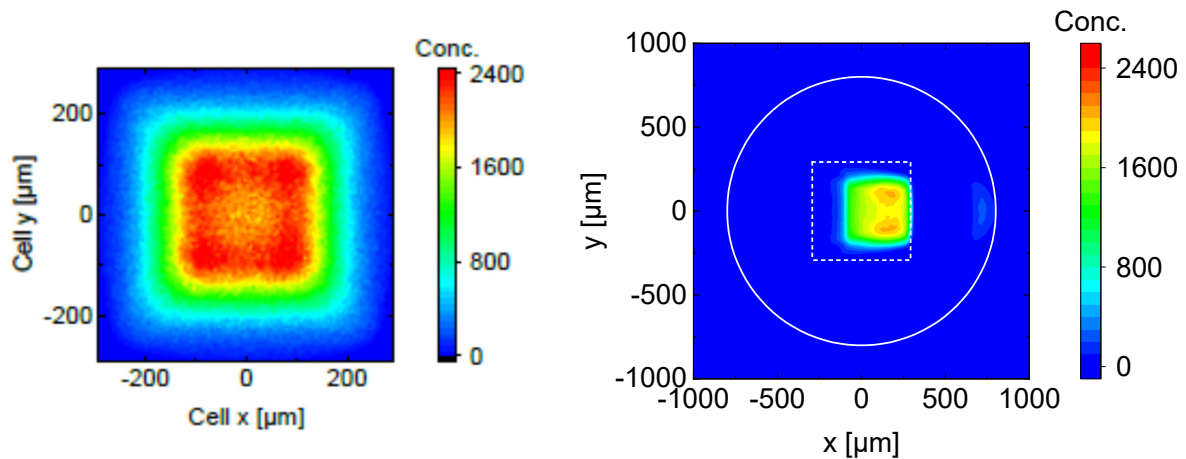


Abbildung 10: Links: Mittel Strahlverfolgungsmodell simuliertes Konzentrationsprofil auf einer $585 \times 585 \mu\text{m}^2$ abmessenden PV-Zelle im idealen Designfall, d.h. bei idealer Ausrichtung aller Komponenten zueinander und des Moduls zur Sonne. Abbildung aus [23]. Rechts: Brennfleck eines idealen Modul (im Bezug auf die relative Position der Komponenten, Form und Geometrie) bei einer um 0.7° verkippten Modulausrichtung zur Sonne. Die Linien visualisieren eine $585 \times 585 \mu\text{m}^2$ Micro-Solarzelle (gestricheltes Quadrat) sowie den Durchmesser der Kugellinse (durchgezogener Kreis).

Um das Verhalten von CPV Modulen bei Fehlausrichtung zur Sonne zu beschreiben, wird häufig der Verlauf des optischen Wirkungsgrads (alternativ: des erzeugten Stroms des Moduls) gegen den Einfallswinkel (engl. angle of incidence, AOI) aufgetragen. Abbildung 11 zeigt diesen Akzeptanzwinkelverlauf für das micro-CPV Module auf Basis der modellierten Strahlverfolgung im idealen Designfall. Wie oben erklärt, beträgt der Akzeptanzwinkel für eine Reduktion des optischen Wirkungsgrads auf 90% 0.7° . Intuitiv könnte erwartet werden, dass eine Vergrößerung der Solarzellfläche das Winkelverhalten verbessern würden. Dies ist aber für den idealen Designfall nicht der Fall. Wie in der Abbildung gezeigt, verhalten sich Module mit einer geometrischen Konzentration von 1000 und 500, also mit Solarzellabmessungen von $585 \times 585 \mu\text{m}^2$ bzw. $827 \times 827 \mu\text{m}^2$ (siehe AP2) im Plateau der Kurven praktisch identisch. Der Grund wurde oben bereits erklärt. In realen Modulen sind allerdings – entgegen den Annahmen hier – nicht alle Komponenten ideal zueinander ausgerichtet. Die Positionen variieren gemäß der entsprechenden Fertigungstoleranzen. Zudem liegen geometrische Abweichungen in Form und Position vor. Dies hat Einfluss auf den optischen Strahlengang und damit unmittelbar auf den von der Solarzelle erzeugten Strom. In der Fertigung ist dies typischerweise ein statistischer Prozess, sodass im Modul Zell-Linsen-Einheiten mit im Detail unterschiedlicher Geometrie verschaltet werden. Hier kann eine größere Solarzellfläche im Gegensatz zum idealen Designfall in der Tat den Akzeptanzwinkel verbessern sowie allgemein die Modulfertigung weniger sensitiv gegenüber Fertigungstoleranzen machen. Eine detaillierte Studie zu den Auswirkungen von Fertigungstoleranzen wird im folgenden Abschnitt gegeben.

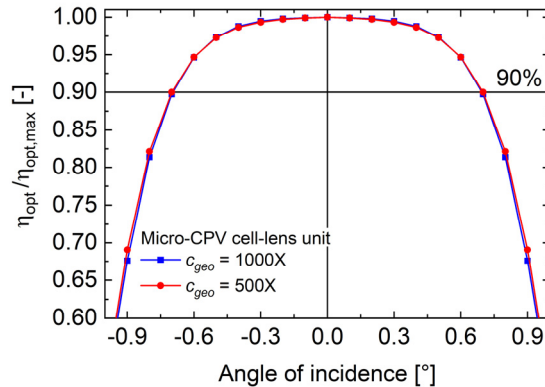


Abbildung 11. Simulierte Akzeptanzwinkel für eine Zell-Linsen-Einheit mit der Größe C1000 und C500. Ergebnis von Strahlverfolgungs-Simulationen einer Zell-Linsen-Einheit mit unterschiedlichen Solarzellgrößen: $585 \times 585 \mu\text{m}^2$ (C1000) und $827 \times 827 \mu\text{m}^2$ (C500).

Einfluss von Toleranzen: Optisch-elektrische statistische Modellierung

Die Leistung von micro-CPV Modulen wird durch Komponententoleranzen, Fertigungstoleranzen und Nachführungstoleranzen beeinflusst. In einem Modul liegt für jede Zell-Linsen-Einheit eine zufällige Kombination verschiedener unabhängiger Toleranzen vor (wie Abweichungen in der Position von Solarzelle und Kugellinse von der Sollposition, eine leichte Unrundheit der Kugellinse, eine Verkippung dieser, etc., siehe Abbildung 12 links). Jede Toleranz liegt dabei in einer gewissen prozessbedingten statistischen Verteilung vor. Die Auswirkungen einer spezifischen Kombination von Toleranzen können mit Hilfe einer optischen Strahlverfolgung präzise modelliert werden. Dies ist in Abbildung 12 rechts beispielhaft für den Fall einer fehlplatzierten Solarzelle veranschaulicht, bei ansonsten ideal ausgerichteten Komponenten. Bei der Fertigung treten die verschiedenen Toleranzen in der Regel unabhängig voneinander auf, so dass statistisch alle möglichen Kombinationen betrachtet werden müssen. Für die Auswirkung auf die Modulperformance müssen dann in einem zweiten Schritt diese spezifischen Kombinationen von Toleranzen, statistisch auf die einzelnen Zell-Linsen-Einheiten verteilt werden. Dabei spielt dann auch die Verschaltung eine wichtige Rolle: Über eine Parallelschaltung kann eine Abnahme im Strom teilweise kompensiert werden, da im statistischen Mittel stets etwas Bessere mit etwas schlechteren Zellen kombiniert werden. Eine reine Parallelschaltung ist aufgrund der summierten Ströme aber nicht sinnvoll, da dann Serienwiderstandsverluste berücksichtigt werden müssten.

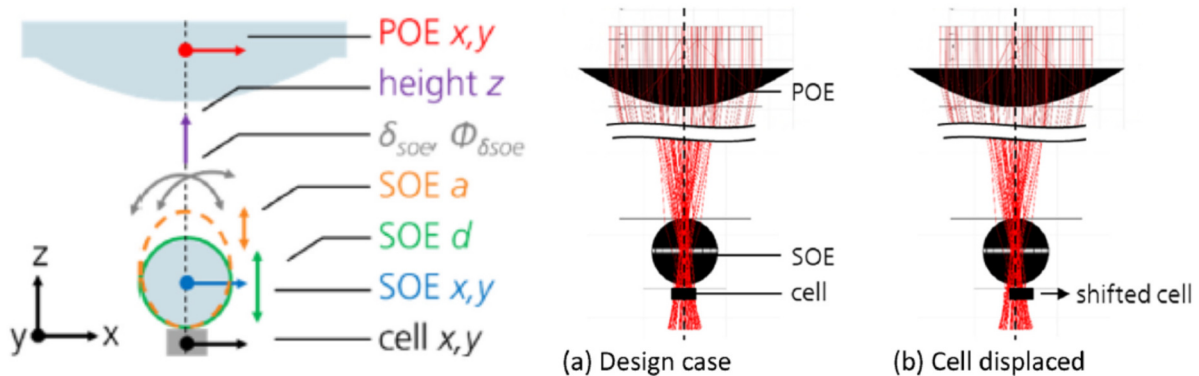


Abbildung 12: Nicht maßstabsgetreue Illustration einer Zell-Linsen-Einheit, bestehend aus Primärlinse (POE), Sekundärlinse (SOE) und Micro-Solarzelle (cell). In unterschiedlichen Farben sind die betrachteten Fertigungstoleranzen veranschaulicht. Abbildungen aus [24] und [25]

Für eine detaillierte Analyse und quantitative Beschreibung der Auswirkungen verschiedener Toleranzen und Toleranzverteilungen und verschiedene Verschaltungskonzepte wurde im micro-CPV Projekt ein zweistufiger Monte-Carlo-Modellansatz entwickelt. Das dabei verfolgte Vorgehen ist in Abbildung 13 skizziert. In der ersten Stufe, der optischen Domäne (Abbildung 13, türkis) werden einzelne Zell-Linsen Einheiten mit dem ISE-internen Strahlverfolgungsmodell Raytrace3D simuliert. Die Modulverkipfung in der Ausrichtung zur Sonne (also entweder die Verkipfung des Moduls auf einer ideal ausgerichteten Nachführeinheit oder eine Fehlausrichtung der Nachführeinheit selbst) kann zudem diskret variiert werden. Für jede Kombination von Parametern werden die optische Effizienz sowie unter Annahme einer spezifischen Quanteneffizienz die Teilzellströme der Micro-Mehrfachsolarzelle ausgegeben. Die Teilzellströme dienen dann als Eingabewerte für die zweite Simulationsstufe in der elektrischen Domäne (Abbildung 13, orange). Hier wird das Verhalten im Modul in Abhängigkeit des Verschaltungsdesigns und der Modulgröße mit der Schaltungssimulationsprogramm LTspice simuliert. Die Fünffachsolarzellen werden dabei als seriell verschaltete Teilzellen abgebildet und die berechneten Teilzellströme aus der optischen Domäne als Eingangsparameter verwendet. Mit diesem Modell kann nun unter Berücksichtigung realer Fertigungstoleranzen der Einfluss der elektrischen Verschaltung sowie der Modulgröße simuliert werden. Zudem kann die Sensitivität gegenüber der Größenordnung der einzelnen Toleranzen quantitativ untersucht werden und erlaubt so eine bisher unmögliche Detailanalyse der Signifikanz verschiedener Komponenten und Prozesse. Dies ermöglicht eine quantitative Bewertung des Verbesserungspotenzials durch Verbesserung der Genauigkeit einzelner Prozesse bzw. kann aufzeigen an welchen Stellen die Anforderungen relaxiert werden können, ohne signifikant die Leistungsfähigkeit zu beeinträchtigen.

Im Projekt wurden unterschiedliche Verschaltungskonzepte simuliert und somit der Einfluss der Toleranzen auf die Modulperformance bewertet, insbesondere auch der Einfluss auf den Akzeptanzwinkel, also die Toleranz gegenüber Fehlausrichtungen des Moduls zur Sonne. Eine detaillierte Darstellung des Vorgehens, der untersuchten Parameter und der Ergebnisse dieser umfangreichen Untersuchungen wurden in den folgenden zwei Journal Papern veröffentlicht [24,25], auf eine genauere Darstellung wird hier daher verzichtet.

- Elisa Kaiser, Maïke Wiesenfarth, Peter Schöttl, Marc Steiner, Stefan W. Glunz, Henning Helmers, *Effect of manufacturing tolerances on micro-CPV assemblies: A quantitative approach based on statistical modeling*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 2025. 279: 113256. DOI: [10.1016/j.solmat.2024.113256](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113256)
- Elisa Kaiser, Maïke Wiesenfarth, Peter Schöttl, Marc Steiner, Stefan W. Glunz, Henning Helmers, *Two-step nested optical-electrical Monte-Carlo approach to analyze the influence of tolerances on micro-CPV module performance*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 2025. 279: 113257. DOI: [10.1016/j.solmat.2024.113257](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113257)

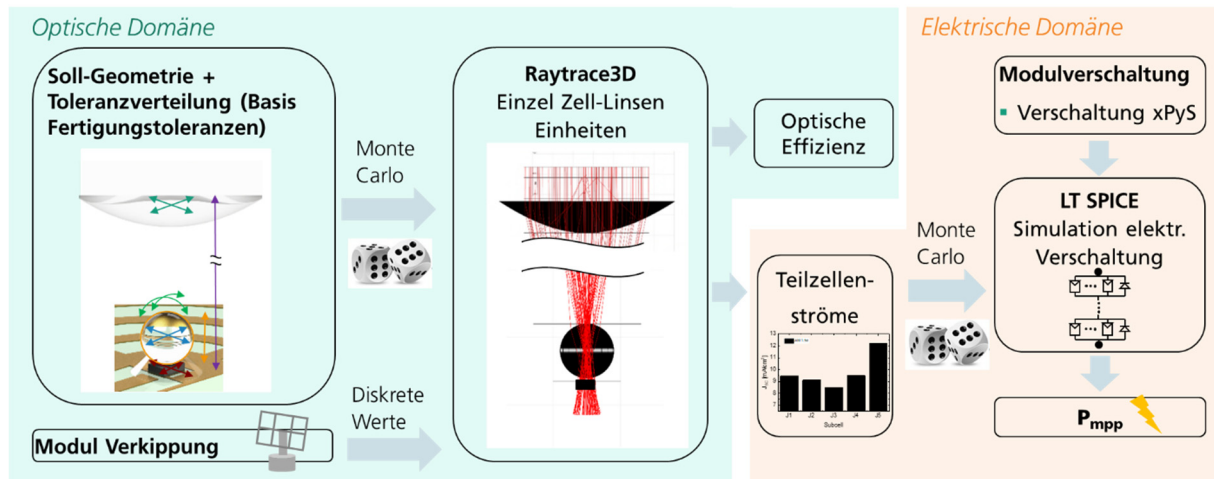


Abbildung 13. Illustration des zweistufigen Monte-Carlo-Simulationsansatzes zur Bewertung des Einflusses von Komponenten-, Fertigungs- und Nachführungstoleranzen auf die elektrische Leistung von micro-CPV Modulen gemäß [24,25]. Die optische Domäne wird mittels Strahlverfolgungssimulation RayTrace3D modelliert. Hier werden zunächst einzelne Zell-Linsen Einheiten mit zufällig kombinierten Toleranzen modelliert (Monte-Carlo-Simulation). In einem nachgeschalteten elektrischen Modell werden erneut zufällig ausgewählte einzelne Zell-Linsen Einheiten zu einem Modul verschaltet (Kombination aus paralleler und serieller Verschaltung). Als zentrale Metrik wurde die maximale Modulleistung P_{mpp} des Moduls ausgewertet.

Elektrische Verschaltung

Die Auslegung der Verschaltungsdesigns der entwickelten und hergestellten Module erfolgte wie folgt: Für das Submodul-Design mit 60 Zell-Linseneinheiten wurden jeweils fünf Solarzellen und eine Bypassdiode parallel verschaltet. Diese werden dann 12 mal in Serie geschaltet („12s5p“ Verschaltung). Durch die Parallelverschaltung wird der Einfluss von Montage-Toleranzen (durch z.B. Fehlplatzierung) reduziert. Abweichungen im Strom mitteln sich so über fünf Zellen aus. Außerdem kann so die benötigte Anzahl an Bypassdioden auf ein Fünftel reduziert werden.

Die Primärlinsen liegen in einer rechteckigen 6×10 Anordnung vor (siehe AP3 und AP6). Für die 12s5p Konfiguration werden daher zwei 6s5p Teilschaltungen seriell nebeneinander realisiert, Abbildung 14 zeigt das zugehörige Ersatzschaltbild des Moduls. Dies hat zudem den Vorteil, dass die elektrischen Anschlüsse des Moduls auf einer Seite angegriffen werden können.

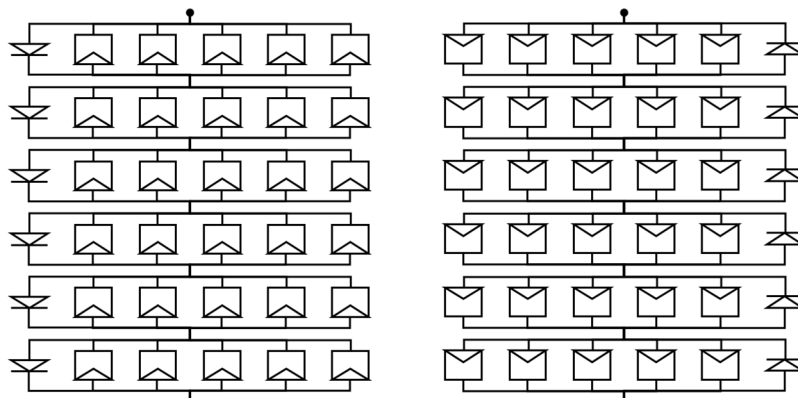


Abbildung 14. Schematisches Schaltbild des Verschaltungskonzepts des Demonstratormoduls. 60 Solarzellen werden in 12s5p Konfiguration (12 seriell, 5 parallel) verschaltet. Jeweils fünf parallel geschaltete Solarzellen werden mit einer Bypassdiode geschützt.

Technologieüberwachung

Während des Projektes wurden kontinuierlich Arbeiten von anderen Forschungsinstituten und der Industrie durch Literaturrecherche und den Besuch von Konferenzen und Messen verfolgt. Für eine Zusammenfassung des Stands der Konzentratorphotovoltaik siehe Abschnitte 1.4 und 2.4.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Im Rahmen des Projekts wurde unter der Leitung von Projektpartner TUB eine ausführliche Kostenstudie durchgeführt. Im Rahmen der Projektverlängerung und -aufstockung wurde diese weiter verfeinert und aktualisiert. Die Ergebnisse beruhen auf vertraulichen Daten der Projektpartner und können nicht veröffentlicht werden.

2.1.2 AP2 Micro-Konzentratorsolarzelle (Leitung: AZUR)

Das zweite Arbeitspaket befasste sich mit der Entwicklung und Charakterisierung von Micro-Konzentratorsolarzellen. Da sich durch die erhöhte Lichtkonzentration und reduzierte Zellfläche wesentliche Strom- und Spannungs-Unterschiede zu marktüblichen Konzentratorzellen ergeben, wurden Chipdesign und Kontaktgeometrie neu konzipiert und Fertigungsprozesse in Abstimmung mit optischem Design (AP1.3) und elektrischer Verschaltung (AP1.4) angepasst. Zur akkuraten Zellcharakterisierung wurde Messtechnik entwickelt bzw. angepasst. Zudem wurden neue Trennverfahren mit reduziertem Materialverlust evaluiert.

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Status
M2a	Erste Version μ -Solarzellendesign definiert (ISE, AZUR)	erreicht
M2c	Messtechnologie für Charakterisierung von kleinen Solarzellen vorhanden (ISE)	erreicht

Zelldesign

Bei feststehendem optischem Design und fixierter Geometrie, kann über eine Vergrößerung der Fläche der Solarzelle die Toleranz gegenüber Fehlausrichtungen und anderen Nicht-Idealitäten erhöht werden, solange ein fehlpotentialer oder aufgeweiteter Brennfleck noch auf aktive Zellfläche trifft. Im Projekt wurden Zelldesigns in drei Größen hergestellt. Bei fester Definition der Modulgeometrie entspricht dies kalkulatorisch drei verschiedenen geometrischen Konzentrationsfaktoren. Allerdings ist anzumerken, dass sich dabei der Brennfleck des optischen Systems und somit auch der optische Konzentrationsfaktor nicht verändert. Die Designs sind:

- C1000: aktive Solarzellenfläche 585 x 585 mm², Chipgröße: 0.885 x 0.685 mm²
- C650: aktive Solarzellenfläche 726 x 726 mm², Chipgröße: 1.046 x 0.846 mm²
- C500: aktive Solarzellenfläche 827 x 827 mm², Chipgröße: 1.147 x 0.947 mm²

Die Architektur der Solarzelle und die Anzahl und Anordnung der Grid-Finger und Busbars wurde mit dem Projektpartner AZUR festgelegt. Das Fraunhofer ISE hat dafür die erwarteten Einstrahlungsprofile und Leistungen sowie die Möglichkeiten zur Kontaktierung der Vorderseite definiert.

Im Projekt wurden von Projektpartner AZUR Solarzellen unterschiedlicher Größe für unterschiedliche geometrische Konzentrationen sowie eine Variation an Designs für die Vorderseitenmetallisierung hergestellt und ISE zur Verfügung gestellt. Für die unterschiedlichen Designs sind zwischen 200 und 2640 Solarzellen auf einem Wafer. Die Wafer wurden zur Ausgangskontrolle unter konzentriertem Licht vermessen und Wafermaps erstellt. Somit liegt positionsgenau die I - V Charakteristik für jede Solarzelle vor. Im Projekt wurde eine detaillierte Analyse dieser Solarzellenmessungen durchgeführt. Es liegen unterschiedliche Solarzellengrößen vor, benannt nach dem Zielwert der geometrischen Konzentration: C500, C650 und C1000. Durch die unterschiedliche Größe unterscheiden sich diese Zellen auch im Verhältnis von Perimeter P (Rand bzw. Umfang) zur Fläche A : P/A . Aufgrund von verstärkter Auswirkung von Randrekombination bei kleineren Zellen wird mit ansteigendem P/A -Verhältnis eine Abnahme der offenen Klemmenspannung V_{OC} erwartet [21]. Zusätzlich wurden unterschiedliche Layouts der Vorderseitenmetallisierung (B_0b, B50, B50_b, B100, B100_b und B150) realisiert. Dadurch unterscheidet sich die durch Metallisierung abgeschattete („dunkle“) Fläche auf den Solarzellen. Eine zunehmende Dunkel-Solarzellenfläche führt aufgrund von Dunkelströmen ebenfalls zu einer Abnahme der offenen Klemmenspannung V_{OC} . In Abbildung 15 sind rechts zwei Solarzellenlayouts mit dem geringsten (B0_b) und dem größten Anteil (B150) metallisierter Fläche skizziert. Links zeigt Abbildung 15 für die unterschiedlichen Solarzellengrößen und unterschiedlichen Solarzellenlayouts die gemessene Offenklemm-Spannung V_{OC} (bei vergleichbarer Einstrahlung) als Funktion der metallisierten Dunkel-Fläche. Der V_{OC} -Verlust durch die

größere Dunkel-Fläche zwischen Design B0_b und B150 beträgt für die Solarzellengröße C500 ($P/A=43 \text{ cm}^{-1}$) bzw. C1000 ($P/A=59 \text{ cm}^{-1}$) 39 mV (0.7 %_{rel}) bzw. 60.5 mV (1.1 %_{rel}). Die Steigung des Spannungsverlusts mit dem Anteil der metallisierten Fläche ist für beide Solarzellengrößen etwa gleich groß. Der V_{OC} -Verlust durch den Perimeter beträgt bei ungefähr gleichem Anteil metallisierter Fläche, von $A_{dark}/A_{total} = 29 \%$ am Beispiel des Layouts C500_B150 zu C1000_B100_b, 18 mV (0.3 %_{rel}). Wie erwartet liegen die Daten der Solarzellengröße C650 zwischen C500 und C1000.

Die Ergebnisse zum Einfluss von Dunkelflächen und Perimeter zu Fläche Verhältnis wurden auch in einer Fachzeitschrift veröffentlicht [21]:

- M. Wiesenfarth, M. Steiner, H. Helmers, A.W. Bett, Voltage losses due to the perimeter and dark area in micro-concentrator solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells, 2021. 219: 110791. DOI: [10.1016/j.solmat.2020.110791](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110791)

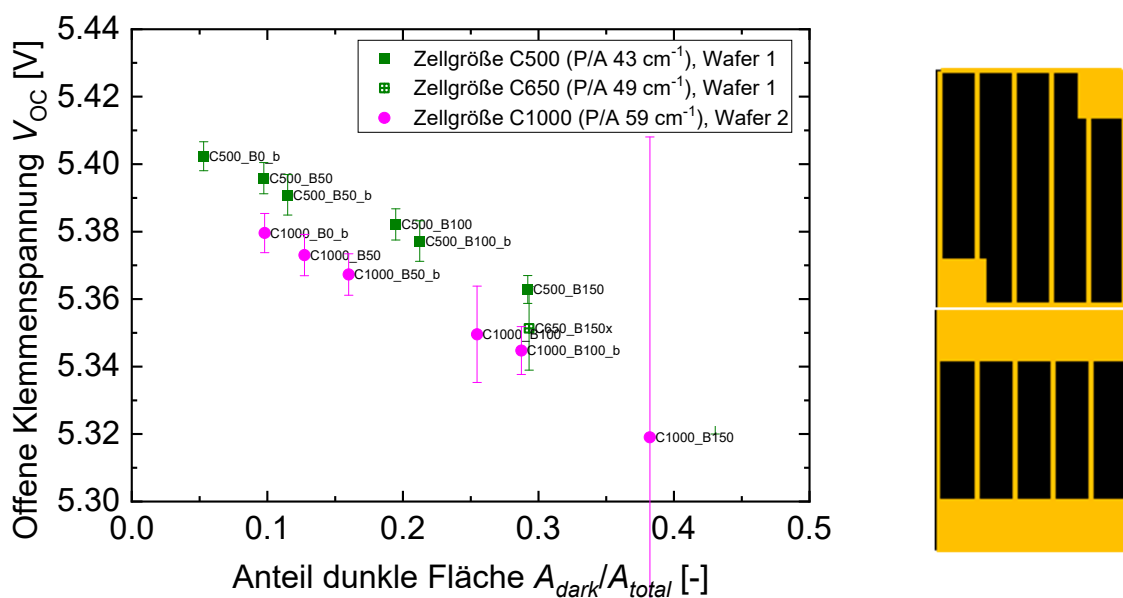


Abbildung 15: Auswertung von Wafermaps für Solarzellen unterschiedlicher Solarzellengrößen C500, C650 und C1000 und unterschiedlichem Layout der Metallisierung (B_0b, B50, B50_b, B100, B100_b und B150), gemessen unter vergleichbaren Intensitäten. Abhängig von der Solarzellengröße ist das Verhältnis des Perimeters zur Gesamtfläche P/A , d.h. die Spannungsverluste aufgrund von erhöhter Perimeter-Rekombination können bei Vergleich verschiedener Solarzellengrößen bei gleicher dunkler Fläche bestimmt werden. Zudem werden die Spannungsverluste durch zunehmende Dunkel-Fläche ersichtlich. (Flächen bestimmt nach Maskensatz, reale Flächen können leicht abweichen). Rechts: Skizze des Solarzellendesigns mit Layout B0_b mit geringster Metallfläche (oben) und B150 mit größter Metallfläche (unten) (gelb: Metallisierung, schwarz: aktive Solarzellfläche).

Die Untersuchung verdeutlicht, dass relevante Verluste sowohl durch Perimeter-Rekombination als auch durch Dunkel-Flächen auftreten. Für die untersuchten Designs sind die Verluste aufgrund abgeschatteter Zellbereiche ausgeprägter als die Perimeter-Verluste. Dies bestätigt frühere Untersuchungen von Wiesenfarth et al. [26], wobei bei den hier untersuchten Designs ein systematischer Vergleich zwischen Anteil der Perimeter-Rekombination oder Dunkelfläche möglich ist. Es werden Designs, mit gleichem Perimeter, jedoch unterschiedlichen Dunkel-Flächen oder unterschiedliche Perimeter, jedoch gleicher Anteil der Metallisierung analysiert. Anzumerken ist, dass der Anteil an metallisierter Fläche bei den hier untersuchen Solarzellen B100 bis B150 unnötig groß ist; dies wurde lediglich als Toleranz für die Entwicklung der gedruckten Kontaktierung eingeplant. Für ein kommerzielles Produkt wird dieser Anteil

erheblich reduziert werden, was die Spannung verbessert sowie auch die Ausbeute von Zellen pro Wafer erhöht.

Germanium-basierte Solarzellen

Im Projekt wurden von AZUR Solarzellenwafer mit 5-fach und 3-fach Solarzellenepitaxiestrukturen und dem Solarzellendesign für die micro-CPV Solarzellen zur Verfügung gestellt. Außerdem wurden Wafer für die Entwicklung von Sägeprozessen bereit gestellt.

Wafer-gebundene Solarzellen

In micro-CPV wurden wafergebundene 4-fach Solarzellenstrukturen in drei Batches getestet. In den ersten beiden Batches wurde der aktuelle Entwicklungsstand der Zellen aus dem parallel laufenden Projekt „50Prozent“¹¹ für das micro-CPV Modul angepasst. Die Epitaxie erfolgte auf einem Aix2800-G4 Horizontalreaktor mit einer 8x4“ Wafer Konfiguration. Es wurden zwei 2-fach Zellstrukturen epitaktisch gewachsen, welche im Anschluss mittels direktem Waferbonding zu einer Vierfachzelle verbunden wurden. Die Zellstruktur ist Abbildung 16 schematisch gezeigt. Die oberen beiden Teilzellen (GaInP 1.9 eV und AlGaAs 1.45 eV) wurden invertiert auf GaAs gewachsen. Das GaAs Substrat wurde nach dem Waferbond nasschemisch entfernt. Die unteren beiden Teilzellen (InGaAsP 1.1 eV und InGaAs 0.74 eV) wurden auf InP abgeschieden. Rechts in Abbildung 16 ist die Bandlücke-Gitterkonstante Kombination der verwendeten Absorbermaterialien im Vergleich mit anderen typischen III-V Verbindungshalbleitern gezeigt. Diese Solarzellenarchitektur hat das Potential bei 300-1000 Sonnen eine Effizienz von über 50% zu erreichen.

Im Rahmen des Projekts 50Prozent konnte am Fraunhofer ISE eine photovoltaische Umwandlungseffizienz von 47.6% auf Zellebene („an Luft“) erreicht werden [15]. Im Projekt micro-CPV wurden Teile solcher Wafer angepasst, mit Designs, die in Zellgröße und Vorderseitenkontaktgrid für das micro-CPV Modul geeignet sind. Dafür wurde ein Maskensatz für die photolithographische Prozessierung entworfen und beschafft. Die Antireflexionsbeschichtung würde an den Halbleiter-Silikon Übergang zur Sekundäroptik angepasst.

Mit den hergestellten Strukturen konnte im Projekt das Effizienzpotenzial leider nicht erreicht werden. Am Ende des 50Prozent Projekts wurde festgestellt, dass die obere GaInP Teilzelle den Strom begrenzt und die Stromfehlانpassung größer als erwartet war. Ursächlich dafür war eine zuvor unbemerkte Unsicherheit in der Messung der Quanteneffizienz der Teilzellen, welche zukünftig in der Messprozedur berücksichtigt werden sollte. Im micro-CPV Projekt wurde ein weiterer Zellbatch mit Dickenvariationen in der Oberzelle hergestellt, mit dem Ziel eine verbesserte Stromanpassung zu erreichen. Aufgrund von Verzögerungen konnte die Prozessierung und Charakterisierung dieser Zellen in der Laufzeit des Projekts nicht abgeschlossen, so dass zur Zeit der Erstellung dieses Berichts noch keine belastbaren Messergebnisse dieser Zellen vorliegen.

¹¹ „50Prozent“ Monolithische III-V-Mehrfachsolarzellen mit über 50% Wirkungsgrad unter konzentrierter Einstrahlung
FKZ:03EE1060 (BMWK)

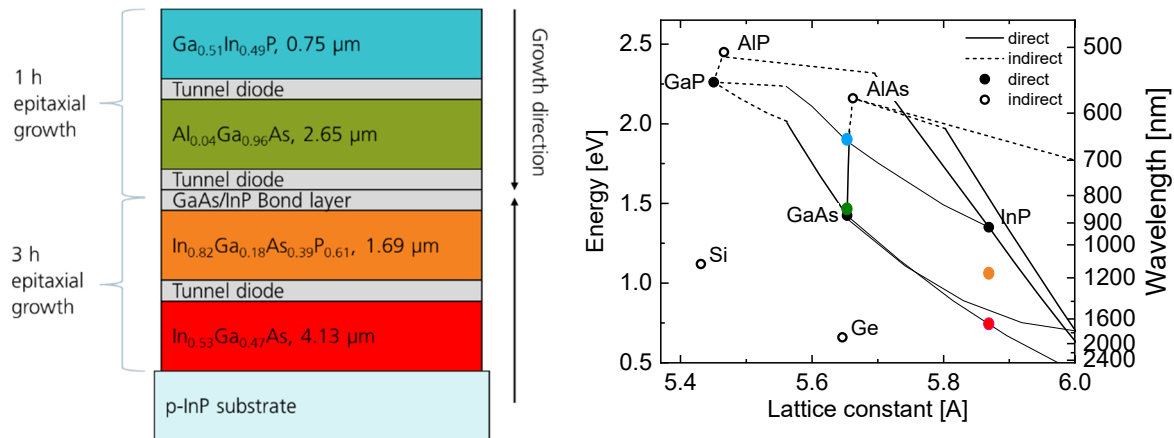


Abbildung 16: Links: Schematischer Aufbau der Wafer-gebundenen Vierfachsolarzellen. Rechts: Übersicht der hier relevanten III-V Halbleiter. Die Bandlücke ist als Funktion der Gitterkonstante aufgetragen. Die schwarzen Punkte (geschlossen direkte Halbleiter, offen: indirekte Halbleiter) sind die binären, die schwarzen Linien entsprechen den ternären Systemen (durchgezogen: direkte Halbleiter, gestrichelt: indirekte Halbleiter). Die quaternären Kompositionen befinden sich innerhalb der ternären Grenzen. Die farbigen Punkte markieren die Absorbermaterialien der Vierfachsolarzellstruktur.

Charakterisierung & Evaluierung

In diesem Arbeitspaket wurde die Messtechnik für die Charakterisierung der Micro-Solarzellen entwickelt. Für die Erstellung von Wafermaps wurde für die automatisierte elektrische Charakterisierung der Solarzellen die elektrische Kontaktierung angepasst. Außerdem wurden der Außenmesstand zur Charakterisierung der Module unter Umgebungsbedingungen für die Charakteristika der micro-CPV-Module vorbereitet. Messergebnisse werden in den Arbeitspaketen der Komponentenentwicklung berichtet.

Über die Messungen an aktuellen micro-CPV-Zellen und -Modulen hinaus, wurde ein Konzept erarbeitet, wie in einer zukünftigen Fertigung die Qualitätssicherung durch geeignete Charakterisierungsschritte realisiert werden kann:

Auf **Solarzellenebene** wird üblicherweise eine Vollcharakterisierung mittels I-V Kennlinien durchgeführt: Jede Solarzelle wird unter Beleuchtung vermessen. Auch wenn hier Taktzeiten von unter einer Sekunde denkbar sind, ist aufgrund der Anzahl an Solarzellen dieses Vorgehen im micro-CPV Bereich ungeeignet. Als Alternative sollten kontaktlose Messverfahren evaluiert werden. Insbesondere bietet sich ein Verfahren auf Basis von Photolumineszenz (PL) als Messmethode an. Dazu könnten die Teilzellen mit verschiedenen, an die Absorptionsspektren der Teilzellen angepassten Laser angeregt werden. Aus dem ortsaufgelösten PL-Signal lässt sich dann die lokale Spannung (V_{oc}) ermitteln. Durch eine Variation der Anregungsintensität kann die gesamte Pseudo-I-V Kennlinie rekonstruiert werden. Darüber hinaus ermöglicht eine Thermographie-Untersuchung unter Beleuchtung lokale Widerstände aufzuzeigen und mit entsprechender Kalibrierung sowie ggf. Modellierung die komplette I-V Kennlinie einschließlich elektrischer Verluste nachzubilden. Dieses Vorgehen ermöglichte idealerweise ganze Wafer in einem „Schuss“ zu charakterisieren. Außerhalb des micro-CPV Projekts wurden erste Vorversuche dieser Messmethodik mit Tandemzellen durchgeführt und vielversprechende erste Proof-of-Concept Ergebnisse erzielt. Ein nächster Schritt weiterer Entwicklung wäre der Proof-of-Concept für die Charakterisierung von 3-, 4- und 5-fach Zellen. Zusätzlich zur kontaktlosen Charakterisierung bietet es sich an, punktuell EQE und I-V Messungen an einzelnen Solarzellen durchzuführen.

Auf **Bodenplattenebene** wird die Charakterisierung mittels Dunkelkennlinie empfohlen. Hierdurch können Kurzschlüsse und Unterbrechungen in der Verschaltung detektiert werden. Zusätzlich kann Kamera-gestützt auch ein Elektrolumineszenzbild aufgenommen werden. Dies ermöglicht die Detektion

und Lokalisierung nicht funktionierender Solarzellen. Diese Tests können auch bei erhöhter Temperatur durchgeführt werden, um z.B. Auswirkungen thermisch bedingter Ausdehnungen zu berücksichtigen.

Auf **Modulebene** ergeben sich für CPV Module weitere Herausforderungen: Grundsätzlich erfolgt die Vermessung von PV Modulen bevorzugt unter Beleuchtung. Für CPV Module muss daher die Modulfläche komplett mit parallelem Licht (bzw. Licht mit einer Divergenz ähnlich der Sonne von $\pm 0.27^\circ$) ausgeleuchtet werden. Sonnensimulatoren für herkömmliche, d.h. nicht-konzentrierende Solarmodule sind für große Beleuchtungsflächen ($> 2 \text{ m}^2$) verfügbar, jedoch ist die Divergenz des Messlichtes dabei viel zu hoch ($> 5^\circ$) und damit für Konzentratormodule nicht geeignet. Sonnensimulatoren für Konzentratormodule verwenden neben der eigentlichen Lichtquelle eine Optik, die das Licht der Lichtquelle parallelisiert. Für mittlere Modulflächen bis zu 1 m^2 und leicht darüber kommen dabei Parabolspiegel zum Einsatz [27–29]. Im Fokuspunkt des Spiegels wird dabei eine Blitzröhre platziert. Das vom Spiegel reflektierte Licht ist daher kollimiert, wobei der Divergenzwinkel des Lichtes sich aus der Ausdehnung der Lichtquelle und dem Abstand der Lichtquelle zum Spiegel ergibt. Die Größe dieser Parabolspiegel ist limitiert und üblicherweise nicht größer als 2 m im Durchmesser¹². Im Normalbetrieb befindet sich die Lampe wie oben erwähnt im Fokuspunkt des Parabolspiegels, wodurch die effektiv nutzbare Fläche sich auf die Hälfte der Spiegelfläche reduziert. In sogenannten off-axis Konfigurationen (die Lichtquelle ist nicht im Fokuspunkt, sondern lateral verschoben) vergrößert sich die Divergenz und verringert sich die Homogenität des Messlichtes, jedoch lässt sich so im Extremfall die komplette Spiegelfläche für die Beleuchtung der Module nutzen – im Falle des am Fraunhofer ISE verfügbaren Sonnensimulators ein Kreis mit Durchmesser 2 m. Für Panel-formatige micro-CPV Module ist die nutzbare Fläche des am Fraunhofer ISE vorhandenen Sonnensimulators für CPV Module jedoch auch im Normalbetrieb ausreichend¹³.

Für Messungen von CPV Modulen am Fraunhofer ISE sind das Anbringen und Ausrichten der Module im Messplatz verhältnismäßig aufwendig. Speziell das Ausrichten der Module mittels einer Maximierung des gemessenen Stromes, bzw. der Leistung der Module kann aufgrund der Ladezeit des verwendeten Blitzes von 2 Minuten sehr zeitraubend sein. In einem Fertigungsszenario ist dies nicht abbildbar – hier müsste eine Modulaufnahme konstruiert werden, die eine hinreichend gute Ausrichtung der Module durch einen mechanischen Anschlag sicherstellt. Eine Taktzeit von 3 Minuten pro Modul (inkl. Wechsel von Modul zu Modul) erscheint realistisch und eine Vollcharakterisierung aller Module wird empfohlen.

Für die Messungen am Sonnensimulator für CPV-Module ist derzeit keine gezielte Anpassung des Simulatorspektrums möglich. Hierdurch ergeben sich erhöhte Messunsicherheiten. Es wird daher empfohlen, die Messungen am Sonnensimulator im relativen Vergleich zu Referenzmodulen durchzuführen, an denen unter Außenbedingungen ein vollständiges Rating nach IEC 62670-3 [4] durchgeführt wurde. Durch diesen Abgleich können die Messungen am Sonnensimulator auf absolute Werte unter STC re-normiert werden.

Verlustfreies Trennverfahren

Durch die sehr kleinen Bauelemente in der micro-CPV steigt der Anteil der Randfläche zur aktiven Fläche und damit auch der Anteil an Sägestraßen für das Trennen der Zellen auf Waferebene. Für eine größere Wafernutzung und damit Kostenreduzierung ist die Reduzierung der Sägeverluste entscheidend. Die Hauptverantwortung für die Entwicklung verlustfreier Trennverfahren lag bei Projektpartner DISCO. Über die von DISCO verfolgten Arbeiten hinaus, hat Fraunhofer ISE im Projekt Fortschritte bei laserbasierten Trennverfahren für die Anwendung für III-V/Ge basierte Konzentratorsolarzellen adaptiert und getestet.

¹² Größere Parabolspiegel in der benötigten optischen Qualität werden z.B. für astronomische Teleskope hergestellt, allerdings wäre eine Sonderanfertigung eines Spiegels mit geeigneter Fokusslänge mit exorbitanten Kosten verbunden.

¹³ Falls in Zukunft deutlich größere Module vermessen werden sollten, kommt ein sequentielles Messverfahren, wie in Ref. [30] vorgestellt, in Frage.

Für das verlustfreie Separieren der Micro-Solarzellen wurde in der Projektaufstockung am Fraunhofer ISE zusätzlich ein Prozess auf Basis des thermischen Laserseparierens (TLS) weiterentwickelt. Der Prozess bestand aus zwei Schritten: Ablation einzelner Linien entlang der Trennungslinie, um im Material eine Sollbruchstelle zu erzeugen und darauffolgend Induktion eines thermischen Stresses an den Sollbruchstellen mit einem zweiten und elliptisch geformten Laser räumlich gefolgt von einem kalten Wasserspray. Das Ziel war, dass nach dem zweiten Schritt das Werkstück komplett in Mikro-Teile zerlegt ist.

Auf Proben vom Projektpartner AZUR mit und ohne Zellstruktur wurden unterschiedliche Parametervariationen appliziert und dadurch die Anforderungen und notwendigen Voraussetzungen ermittelt. Die Experimente umfassten:

- Variation der Laserleistung zur Erzeugung der Sollbruchstelle; also „Scribe-Laser“ genannt
- Variation des Strahldurchmessers (20 μm bis 120 μm) durch Platzierung der Werkstücke auf unterschiedlichen fokalen Ebenen sowie durch Nutzung eines anderen Scribe-Lasers
- Variation der Pulsdauer (20 ns bis 220 ns) des Lasers und der Anzahl der Wiederholungen des Musters auf der gleichen Stelle
- Variation der Werkstückhalterung und der Modalität der Ansaugung
- Variation der Leistung des Lasers zur Wärmeinduktion, um thermische Spannung zur Trennung zu erzeugen; also „Cleave-Laser“ genannt.
- Variation der Verfahrensgeschwindigkeit des Cleave-Lasers
- Nutzung der Werkstücke auf Expandierfolie oder ohne Folie

In einzelnen Prozessvarianten konnten lokal erfolgreich Micro-Zellen vereinzelt werden. Der Prozesserfolg war aber bisher nicht reproduzierbar und konnte daher nicht auf ganze Wafer hochskaliert werden (siehe Abbildung 17 und Abbildung 18). Die dazu identifizierten Ursachen sind:

- Die Ebenheit der Werkstückhalterung im Bereich von ± 20 Mikrometern ist für die Mikrozellen nicht ausreichend. Eine ganzflächige Höhenmessung und darauf angepasste, aktive Fokuspachführung sind notwendig, um die Tiefe der Sollbruchstelle gleichmäßig zu gestalten. Alternativ kann ein System mit höherer Ebenheit benutzt werden.
- Die Wellenlänge des Cleave-Lasers ist für die Struktur ungünstig, weil das Licht in hohem Maße von der Rückseite der Wafer reflektiert wird.
- Die Ansaugung erlaubt nicht die notwendige Flexibilität für die thermische Ausdehnung des Werkstücks.

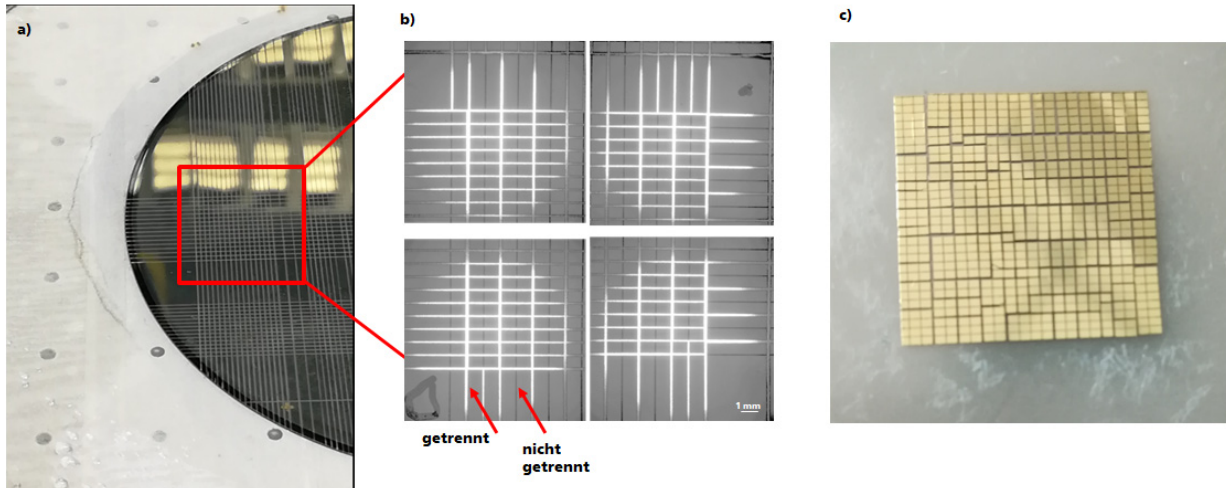


Abbildung 17: a) Fotoausschnitt eines Testwafers auf Folie auf Probenhalterung der Anlage zum thermischen Laserseparieren. Die hellen Linien zeigen die gelaserten Strukturen zur Erzeugung der Sollbruchstellen. b) Mikroskopaufnahmen im Durchlichtmodus einzelner Regionen auf dem Werkstück nach dem Cleaving Schritt. An den Stellen, an denen das Licht durchleuchtet, sind die Mikrozellen getrennt, die dunkleren Linien kennzeichnen die nicht getrennten Areale. c) Fotoaufnahme eines kleinen Werkstücks mit teilweise getrennten Strukturen.

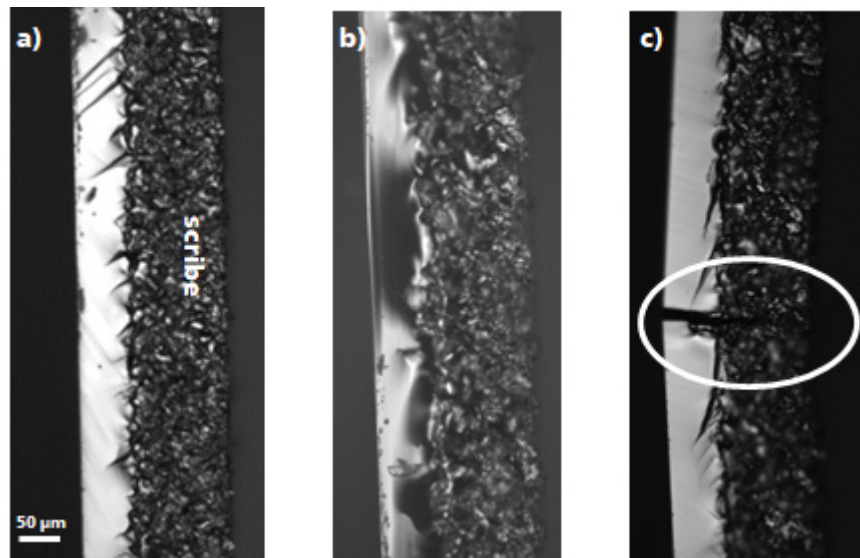


Abbildung 18: Auflicht-Mikroskopie der Schnittkanten nach der Trennung in einzelne Teile. Die getrennten Teile wurden hochkant unter das Mikroskop gelegt und bei Epi-Illumination in Reflektion abgebildet. a) Der dunkelgraue, körnige Bereich („scribe“) zeigt die ablatierte Sollbruchstelle, die tief ins Material reicht. Eine homogene und reproduzierbare Tiefe der Ablation ist für ein erfolgreiches Trennen essenziell. Der helle Bereich links zeigt die gewünschte durch thermische Spannung gebrochene Bruchkante des Werkstücks. b) Im Gegensatz zu a) ist hier die Tiefe der Sollbruchstelle nicht klar definiert. c) Hier ist ein unerwünschter Querriss entstanden.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde ein neuer Experimentplan erstellt, der die Nutzung einer anderen Laserbearbeitungsstation für das Scribe vorsieht. Dieser zweite Laseraufbau zeichnet sich mit Mikrometer-Präzision aus und die einfach gelaserten Strukturen sind nur wenige Mikrometer breit. Obwohl die Präzision für eine gut definierte Sollbruchstelle vorteilhaft ist, war es hier allerdings mit einmaliger Überfahrt nicht möglich, tief genug im Material zu ablatieren. Die Hauptherausforderung lag darin, dass der Materialstaub, der während der Ablation generiert wurde, aus einem besonders schmalen

Graben nicht vollständig abgesaugt werden konnte und die Öffnung wieder verschlossen hat. Daher wurden pro Sollbruchstelle mehrere Linien nebeneinander und mit Mehrfachüberfahrten gelasert und ein breiterer und stufenförmiger Graben im Material erzeugt (Abbildung 19).

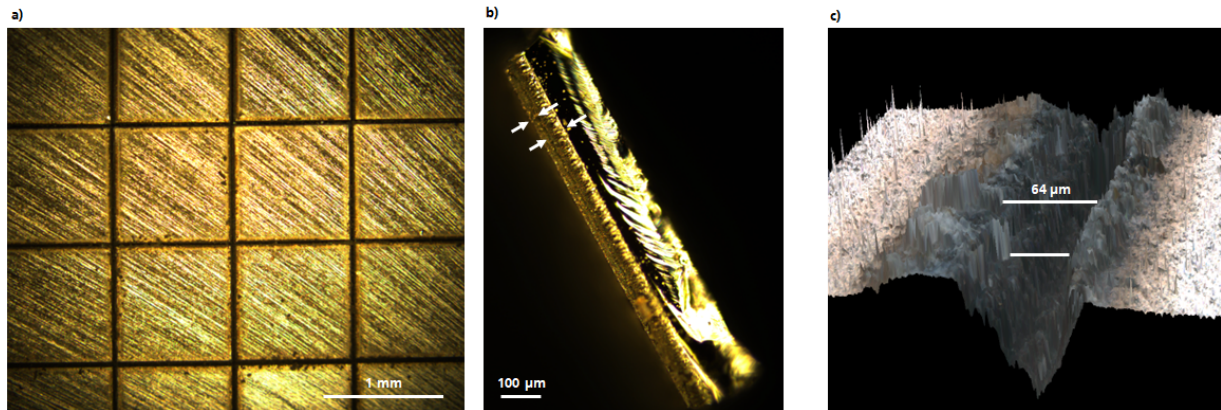


Abbildung 19 a) Draufsicht auf ein Germanium Probe, auf dem Schachbrettmuster mit einer Kantenlänge von 0,9 mm gelasert wurden. b) Draufsicht auf die Kante nach dem Trennen einzelner Stücke. Die Ablation wurde stufenförmig appliziert. Das obere Pfeilpaar zeigt die breitere Ebene der Ablation, das untere Pfeilpaar zeigt die tiefergelegene Stufe. c) 3D Profil eines solchen Grabens als Sollbruchstelle zum Trennen.

Wie in der obigen Abbildung gezeigt, war das Sriben homogener Gräben mit diesem Aufbau möglich. Zum Trennen nach dem Sriben wurden drei Techniken getestet: mechanisches Trennen via „break-on-a-roll“, mechanisches Trennen via Expandieren und zuletzt Trennen via laserinduzierten thermischen Stress wie in der ersten Experimentreihe.

„Break-on-a-roll“ wurde manuell getestet. Auch wenn einzelne Stücke gut getrennt wurden, entstanden bei vielen anderen Stücken Risse oder brüchige Kanten, die sich mit den negativen Erfahrungen des Projektpartners DISCO zum mechanischen Trennen übereinstimmten. Auch das Expandieren und laserbasierte Trennen haben bisher nur lokal zum Erfolg geführt (siehe Abbildung 20).

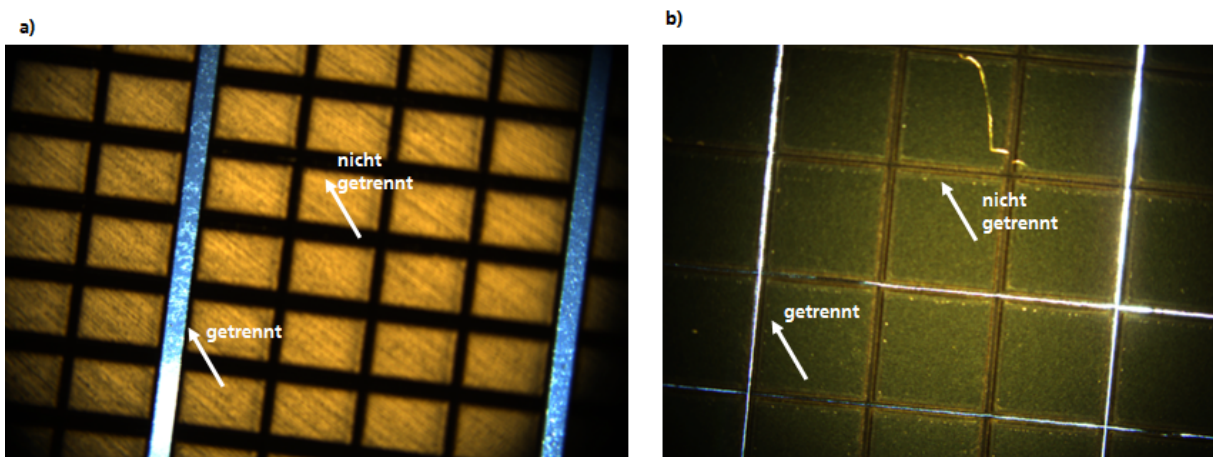


Abbildung 20: a) Draufsicht (Durchlichtmikroskopie) auf einer Germanium Probe, die nach dem Scribe Prozess auf eine Folie gebracht und expandiert wurde. Zwei Hauptlinien wurden dabei separiert, der Rest jedoch nicht. b) Ein weiteres Werkstück, das nach dem Sriben und Folieren mit einem zweiten Laser und Wasserspray durch laserinduzierten Stress getrennt wurde. Auch hier sind manche Linien getrennt und manche nicht.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass die getesteten laserbasierten Trennverfahren noch nicht zu den gewünschten Resultaten und sauberen Schnittkanten geführt haben. Obwohl lokal bereits vielversprechende Ergebnisse erzielt wurden, war die Reproduzierbarkeit und auch Skalierbarkeit auf ganze

Wafer bisher nicht gegebene. Allerdings schätzen wir insbesondere den zweiten Ansatz mit wohl definierter Ablation und anschließendem Expandieren in einer zukünftigen Folgeentwicklung als erfolgsversprechend ein.

2.1.3 AP3 Optik (Leitung: SILI)

Im dritten Arbeitspaket wurden die eingesetzten primär- und sekundäroptischen Elemente (POE und SOE) entwickelt und qualifiziert. Ein Schwerpunkt lag auf der Anpassung und Optimierung der Fertigungsprozesse auf die Anwendung hin, um die erforderlichen Eigenschaften und Toleranzen zu erzielen. Es wurden Primäroptiken aus Vollglas (mit Partner FUCHS) und Silikon-auf-Glas entwickelt, sowie als Ausblick auch neuartige gedruckte Optiken betrachtet. Als Sekundäroptiken wurden Glaskugeln von Partner SILI verwendet. Durch enge Abstimmung der Entwicklungen mit optischen Simulationen (AP1.3) und der Packaging-Technologie für die Kugellinsen (AP5) wurde das Design optimal auf die Fertigungs- und Montagetoleranzen und Materialien abgestimmt. Prototypisch gefertigte Optiken wurden charakterisiert und dazu bestehende Messplätze erweitert bzw. neue Methoden aufgebaut. Funktionsmuster/Prototyp-Optiken für Charakterisierung, Tests (Montage, Testmodule) und micro-CPV-Modul wurden gefertigt.

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Status
M3a	Auswahl Primäroptik für Demonstratormodul (ISE, FUCHS)	erreicht
M3b	Vergleich verschiedener Optiken (Designgenerationen und Herstellungsverfahren) (ISE)	erreicht

Primäroptik Linsenplatte & Evaluierung

Im Projekt wurden erste vom Projektpartner FUCHS hergestellte plankonvexe Vollglas-Linsen charakterisiert. Als Referenz wurden plankonvexe Linsen in der Silikon-auf-Glas-Technologie in allen untersuchten Formaten (9er-Array, Demonstrator, Panel) extern hergestellt und anhand von Einzelmessungen und im Modul getestet. Darüber hinaus wurde ein Design für Silikon-auf-Glas Fresnellinsen erstellt und ebenfalls bestellt und evaluiert. Letzteres reduziert die benötigte Silikonmenge um mehrere Größenordnungen und damit auch die Kosten für die Herstellung der Linsenplatte. Die Anzahl der Fresnelstufen wurde bezüglich Materialverbrauch, optischer Performance, Temperaturverhalten und Fertigung optimiert. Für die Ergebnisse in Modulen siehe AP6.

Beispielhaft für eine Charakterisierung der Primäroptiken ist die Vermessung der lateralen Positionen der Linsenmittelpunkte einer Linsenplatte. Eine Abweichung des Linsenmittelpunktes von der Sollposition resultiert direkt in einer Verschiebung des Brennpunktes und damit in einem Einfluss auf die Solarzellperformance (elektrischer Verlust entsprechend reduzierter Einstrahlungsleistung auf die Solarzellfläche und ggf. veränderte spektrale Verteilung). Abbildung 21 zeigt die Analyse einer Fresnelstruktur mit 30x23 Einzellinsen im Panelformat. Dargestellt ist die Verteilung des Versatzes der Linsenmittelpunkte zur Sollposition. Die Verteilung ist näherungsweise normalverteilt, mit Standardabweichungen in x- und y-Richtung von 30 µm und 53 µm. Das Trägerglas der Silikonstruktur zeigt entlang der y-Richtung eine leichte Biegung. Diese Krümmung könnte die höhere Standardabweichung in y-Richtung erklären. Im rechten Diagramm sind daher alle einzelnen Abweichungen aufgetragen. Die Farbskala visualisiert dabei die Reihen entlang der y-Achse. Es wird ersichtlich, dass in den äußersten Reihen (dunkelgrüne und dunkelbraune Punkte) die größten Abweichungen zur Sollposition auftreten. Da im Herstellungsprozess das Trägerglas gerade gezogen wird, könnte diese laterale Verschiebung durch die Krümmung verursacht werden.

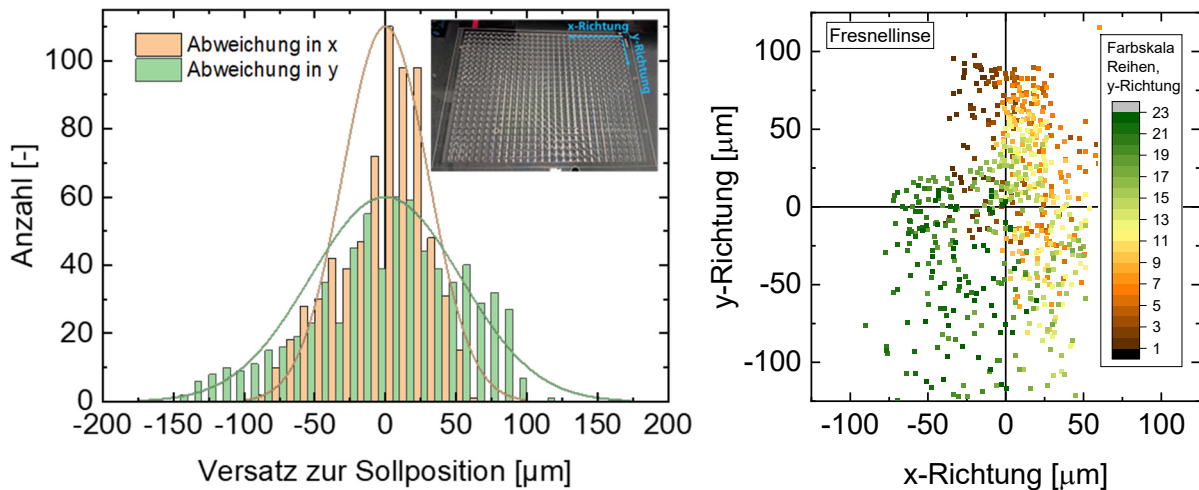


Abbildung 21: Links: Histogramm der Abweichungen der Einzellinsen von der Sollposition in x und y-Richtung. Rechts: Abweichungen der Einzellinsen. In der Farbskala sind die Reihen in x-Richtungen gegeben. Die Linsen der äußersten Reihen zeigen die größten Abweichungen.

Die gemessenen Abweichungen liegen laut Hersteller im Rahmen der erwarteten Präzision. Aus den Toleranzuntersuchungen in AP1 [25] wird bei einer Modulfehlausrichtung von 0.5° und einer Standardabweichung der Primärlinsen- zur Solarzellposition von nur $32 \mu\text{m}$, bereits ein Leistungsverlust von 5% erwartet. Bei optimaler Modulausrichtung, also ohne Verkippung, wird der 5% Verlust erst bei einer Positionsabweichung mit Standardabweichung von $239 \mu\text{m}$ erreicht. Da im Betrieb die Präzision der Ausrichtung variiert, ist dies zunächst nur als Tendenz einzuordnen, erlaubt aber noch keine quantitative Aussage über den Ertrag. Dennoch ist klar, dass die als ursächlich für den Verzug eingestufte Krümmung des Trägerglases zukünftig vermieden oder verhindert werden sollte.

Darüber hinaus wurden Messungen zur optischen Güte der Fokussierung (optische Effizienz und Interceptradien der Brennflecke) für die im Projekt untersuchten Designvarianten der Einzellinsen und Arrays am Linsenmessplatz des Fraunhofer ISE durchgeführt, die hier nicht im Detail diskutiert werden.

Bezüglich der im Projekt untersuchten Vollglaslinsen zeigte sich, dass die Formgenauigkeit der von FUCHS bemusterten Glas-Volllinsen-Arrays auch nach mehreren Iterationen nicht ausreichend war, um die erforderlichen hohen optischen Effizienzen zu erzielen. Dies zeigte sich nicht nur in den optischen Eigenschaften (schlechter Fokus, hohe Variabilität der Linsen im Array), sondern konnte auch in Messungen der Kontur bestätigt werden. Gegen Ende des Projektes konnte der Werkzeugbau als Hauptursache für die Abweichungen identifiziert werden. Allerdings gelang es nicht mehr, alternative kostengünstige Wege für den Werkzeugbau zu evaluieren. Im Projektverlauf wurde daher entschieden, für den Demonstratorbau in micro-CPV statt einer Glas-Volllinse eine Silikon-auf-Glas (SoG)-Volllinse für die Primäroptik (POE) zu verwenden. Muster der Vollglas- sowie der SoG-Volllinsen (jeweils als 3×3 Linsen-Arrays) sind in der nachfolgenden Abbildung 22 gezeigt.

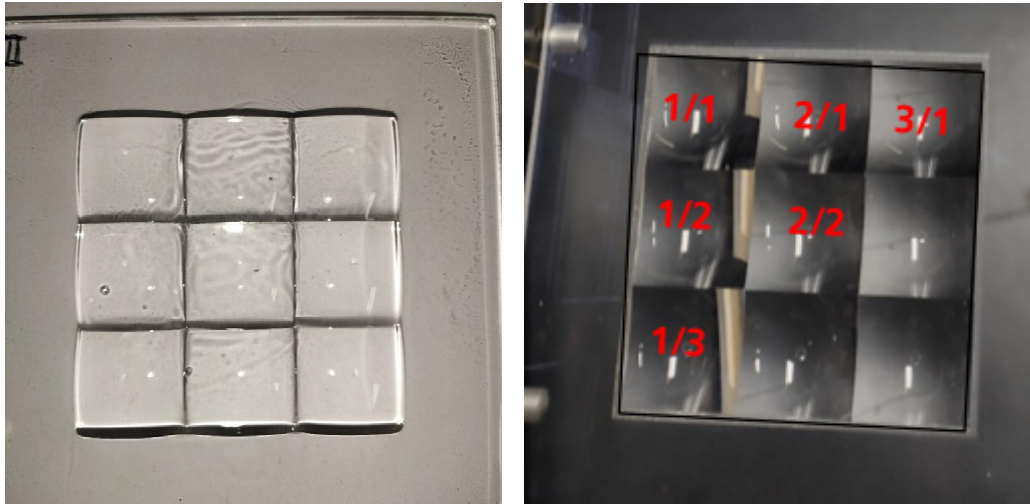


Abbildung 22: Muster der Primäroptik-Varianten Glas-Voll-Linsen von Partner FUCHS (links) und Silikon-auf-Glas-Volllinsen (SoG-Voll-Linsen, rechts), jeweils als 3x3 Linsenarray. SoG-Linsen-Arrays wurden im Projektverlauf auch als größere Arrays (SoG-Voll-Linsen als 3x3 und 6x10, SoG-Fresnel-Linsen als 23x30) hergestellt, charakterisiert und in Prototyp-Modulen verbaut (vgl. AP6).

Um den Einfluss der unterschiedlichen Materialien zu bewerten, wurde mittels Strahlverfolgungssimulation eine Verlustanalyse für die beiden POE-Varianten erstellt. Der Vergleich ist in Abbildung 23 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Glas-Volllinse als ideale Geometrie simuliert wurde und mögliche und in Messungen festgestellte herstellbedingte Toleranzen und Verluste hier nicht berücksichtigt worden sind.

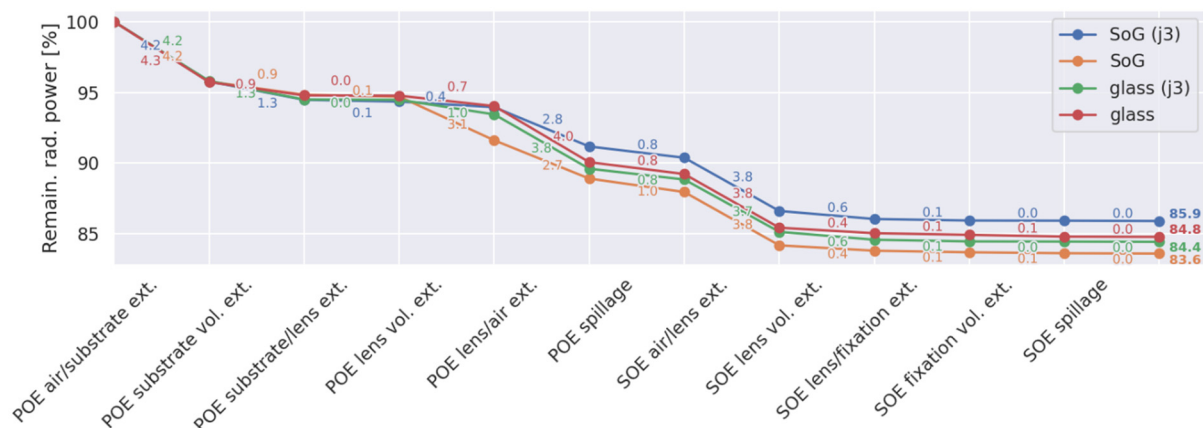


Abbildung 23: Vergleich der optischen Verluste und der optischen Effizienz für die Primäroptik-Varianten Silikon-auf-Glas-Volllinse (SoG, blau und orange) und Vollglas-Linse (glass, grün und rot) als Wasserfalldiagramm. Dargestellt ist die verbleibende Strahlungsleistung nach den jeweiligen Verlustmechanismen, gerechnet als AM1.5d-Spektrum gewichtete Vollspektrumanalyse (blau orange und rot), sowie zusätzlich eine mit der Spectral-Response-Kurve der meist strombegrenzenden dritten Teilzelle (j3) einer Fünffachsolarzelle gewichtete Analyse (blau und grün). (POE: Primärlinsenelement, SOE: Sekundärlinsenelement=Kugellinse, ext.: Extinktion)

Es ist ersichtlich, dass die SoG-POE im gesamten Spektrum eine mehr als 1%-Punkt niedrigere optische Effizienz als die Vollglas-POE aufweist, was primär durch erhöhte volumetrische Extinktion im Silikon als

Linsenmaterial begründet ist. Dieser Effekt tritt allerdings nicht im Spektralbereich der begrenzenden dritten Teilzelle auf. Ein weiterer Unterschied liegt in den Fresnel-Reflexionsverluste am Übergang POE-Linse/Luft (POE lens/air ext.), welche bei der SoG Linse weniger stark ausgeprägt sind.

Für die Bewertung der Leistung im CPV-Modul ist die Betrachtung der stromlimitierenden Teilzelle der Mehrfachsolarzelle relevant. Beim Einsatz der im Projekt verwendeten Fünffachsolarzellen ist die dritte Teilzelle (j3) unter dem Referenzspektrum stromlimitierend. Abbildung 24 zeigt einen direkten Vergleich der Teilzell-Ströme beider Systeme. Trotz der geringeren optischen Vollspektrum-Effizienz (orange vs. rot in Abbildung 23), zeigt die SoG-POE hier einen geringfügig ($1.9\%_{\text{rel}}$) höheren Minimalstrom in der strombegrenzenden dritten Teilzelle als die Vollglas-POE. Dies entspricht den geringeren Verlusten in der optischen Effizienz gewichtet für dritte Teilzelle (blau vs. grün in Abbildung 23) bei der die SoG-POE etwa 1.5%-Punkte besser abschneidet als die Vollglas-POE. Es ist weiterhin anzumerken, dass SoG-Linsen in der Praxis nahezu ideal abgeformt vorliegen, während bei Vollglas-POEs herstellbedingte Toleranzen und Formabweichungen zu erwarten sind, welche in der Simulation nicht berücksichtigt wurden. Im Vergleich zu einer realen Vollglas-POE schneidet die SoG-Volllinse also deutlich besser ab.

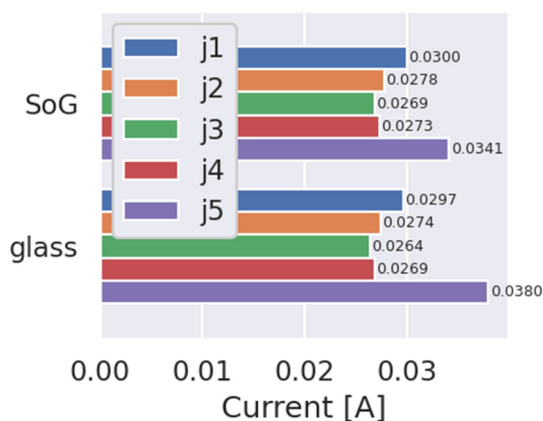


Abbildung 24: Vergleich der simulierten Teilzell-Ströme für SoG-POE und Vollglas-POE.

Neben Glas- und SoG-Volllinsen wurde ein innovatives potenzielles Herstellverfahren gedruckter Glaslinsen (Glassomer) exploratorisch evaluiert. Dazu wurden vom Neptun Lab am Institut für Mikrosystemtechnik der Universität Freiburg zwei Einzellinsen des micro-CPV Volllinsendesigns gedruckt, für Testzwecke aber zunächst nicht als Glassomer sondern aus einem kommerziell verfügbaren Polymer. Um bei den gegebenen Abmessungen eine akzeptable Druckzeit ($\sim 18\text{h}$) zu erreichen, musste eine niedrige Auflösung verwendet werden. Dadurch wird die Oberfläche rau bzw. weist nicht-akzeptable Stufen auf, siehe Abbildung 25. Diese interessante Technologieroute ist in der getesteten Form daher nicht anwendbar und wurde nicht weiterverfolgt.

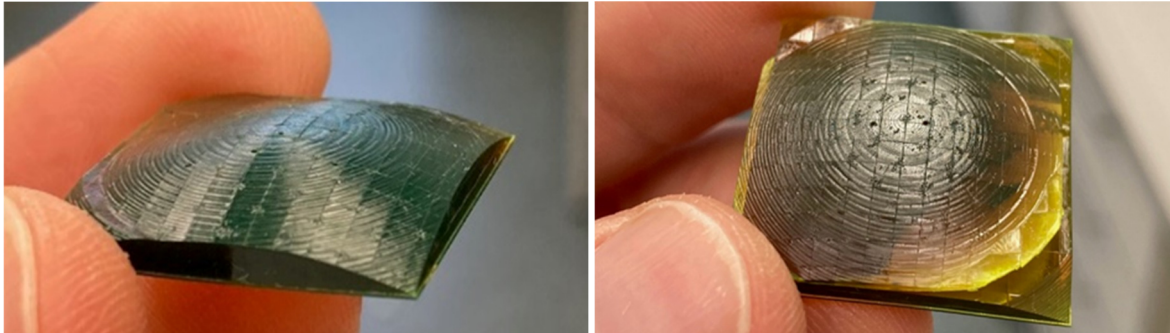


Abbildung 25: Gedruckte Linse, hergestellt vom Neptun Lab am Institut für Mikrosystemtechnik der Universität Freiburg.

Im Vergleich verschiedener Optiken (Designgenerationen und Herstellungsverfahren) stellt sich also eine SoG-Voll-Linse als beste der verfügbaren Voll-Linsen dar, die in hoher Güte hergestellt und charakterisiert wurde. Daher wurde diese auch im Prototyp-Modulbau verwendet. Aufgrund der hohen Silikonkosten wurde jedoch zudem ein Fresnellinsen-Design als Alternative erstellt und auch hergestellt sowie charakterisiert. Auch diese Optiken konnten als Array in hoher Güte hergestellt werden; aufgrund der Fresnel-Stufen und damit verbundener optischer Verluste aber mit etwas reduzierter optischen Güte. Eine finale Abwägung zum genauen Design der Fresnellinse (genaue Form, Anzahl und Höhe der Stufen) optimiert für eine zukünftige Massenfertigung sollte sowohl die Kostenstruktur (Menge Silikon) als auch die optischen Verluste berücksichtigen.

Als weitere Option für Kostensenkungen bei der Primäroptik wurde Walzglas als Trägerglas für SoG-Optiken betrachtet und anhand von Mustern exploratorisch evaluiert. Walzgläser sind kostengünstiger als die bislang als Trägergläser verwendeten Floatgläser, weisen aber eine prozessbedingte Oberflächenstruktur auf, an der Licht gestreut wird. Hier zeigte sich, dass die Strahlaufweitung durch die Oberflächenstruktur auf Walzgläsern so schwach bzw. gering ist, dass sie in einem micro-CPV Modul nur zu sehr geringen und u.U. vernachlässigbaren bzw. tolerierbaren Beeinträchtigungen der optischen Güte der Konzentration führt. Diese attraktive Option sollte demnach in nachfolgenden Arbeiten intensiver untersucht werden.

Sekundäroptik Kugellinse mit Charakterisierung & Evaluierung

Beim Projektpartner SILI wurden einerseits die Glaskugeln in verschiedenen Qualitätsstufen und Glastypeen bereitgestellt, die im Projekt charakterisiert und als Sekundäroptik eingesetzt wurden. Andererseits wurde eine Antireflexionsbeschichtung (ARC) auf der Sekundäroptik entwickelt. Die Arbeiten wurden vom Fraunhofer ISE beratend unterstützt. Insbesondere wurde eine Methode zur Charakterisierung der Glaskugeln entwickelt und Prototypen von SILI vermessen, um so Entwicklungen der ARC bewerten zu können. Da die einzelnen SOE mit einem Durchmesser von 1,6 mm zu klein für eine direkte Messung sind bzw. Messunsicherheiten bei der kleinen Größe sehr hoch wären, wurde ein neues Verfahren entwickelt, um die Transmission einer dicht gepackten Monolage von Kugeln zu messen und dann mit Simulationen abzugleichen. Abbildung 26 zeigt einen Probenhalter bestückt mit einer solchen dicht gepackten Monolage aus Kugeln. Der Transmissionsgrad verschiedener Kugelchargen kann so mit Hilfe eines Spektrometers mit Ulbricht-Kugel vermessen werden. Zu berücksichtigen ist, dass in diesem Aufbau auch die Deckgläser des Probenhalters einen Einfluss auf den Transmissionsgrad haben.

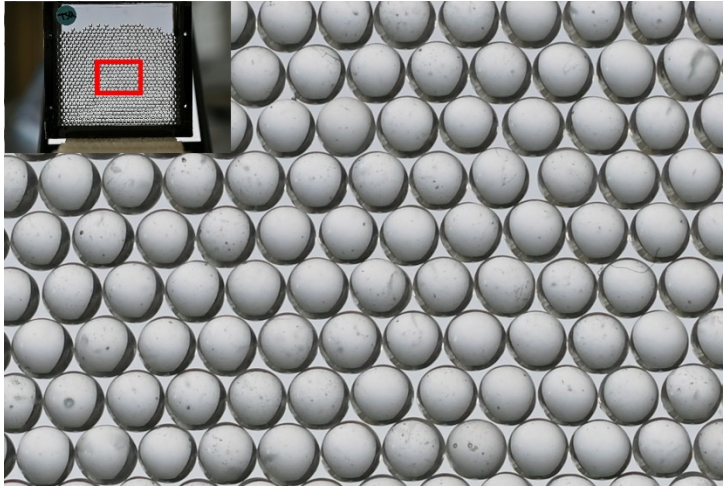


Abbildung 26: Kleines Bild: Probenhalter für die vergleichende Transmissionsmessung verschiedener SOE-Kugeln. Großes Bild: Ausschnitt aus dem Kugelgitter, welches hier aus unbeschichteten, eisenhaltigen SOE-Kugeln besteht. Oberflächenfehler und auch Varianzen in Größe und Form sind gut zu erkennen.

Wie in Abbildung 26 gut zu sehen ist, variieren die SOE-Kugeln leicht, aber sichtbar in der Oberflächen-
güte, Größe und Formtreue. Letzteres ist insbesondere daran zu erkennen, dass das Kugelgitter an
verschiedenen Stellen Lücken aufweist. Aus diesen drei Varianzen entsteht eine Messunsicherheit durch
die Position der von der Lichtquelle im Spektrometer beleuchteten Fläche. Je nach Position variiert jedoch
auch das Verhältnis von beleuchteter Fläche mit Kugeln zu beleuchteter Fläche zwischen den Kugeln
(siehe Abbildung 27). Dies stellt eine weitere Unsicherheit dar.

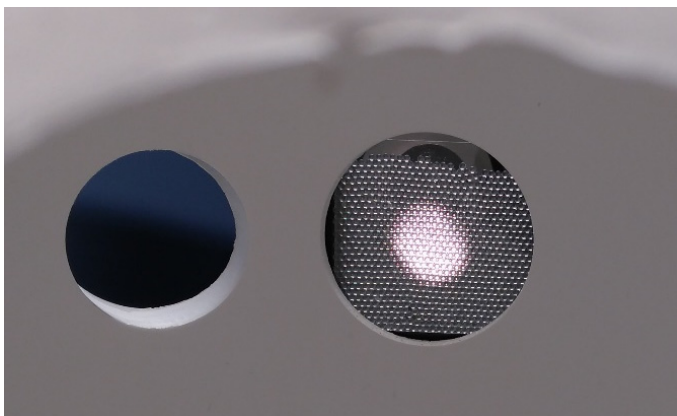


Abbildung 27: Monolage von SOE-Kugeln im Probenhalter, durch die Ulbricht-Kugel fotografiert. Zu sehen ist auch die bei der Messung beleuchtete Fläche.

Um diese Einflussfaktoren zu überprüfen, wurde mit zwei unterschiedlich beschichteten SOE-Kugeln eine
Messreihe von jeweils fünf Messungen durchgeführt. Für jede Messung wurde die Position des Proben-
halters relativ zum Messaufbau leicht verändert und die Kugelpackung „verschüttelt“ und erneut in der
dichtesten Kugelpackung angeordnet. Die Reproduzierbarkeit bei einem Kugeltyp bzw. die Varianz
innerhalb der Messreihe eines Typs ist dabei deutlich besser als der Unterschied zwischen verschiedenen
Kugeltypen. Der Einfluss von Unsicherheiten und der Variabilität im Probenaufbau kann daher zunächst

vernachlässigt werden. Die entwickelte Messmethodik wurde auch in einem Konferenzbeitrag [31] veröffentlicht:

- Lysander Treumann, Peter Schöttl, Thomas Schmidt, Peter Nitz, *Characterization of Antireflective Coatings on a Spherical Lens Secondary Optical Element*, presented at 18th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-18), hybrid conference hosted in Miyazaki, Japan. 25.-27.04.2022. DOI: [10.1063/5.0147642](https://doi.org/10.1063/5.0147642)

Im Projektverlauf wurde Fraunhofer ISE von SILI mit unterschiedlichen SOE-Chargen bemustert, die verschiedene Entwicklungsschritte in Bezug auf Glastyp, Oberflächenbehandlung und ARC-Beschichtung darstellen. Einen groben Überblick über die Entwicklungen im Projekt gibt Abbildung 28, welche am Fraunhofer ISE-Teststand gemessene spektrale Transmissionskurven der Kugel-Monolage verschiedener Chargen zeigt.

Die spektralen Transmissionskurven der ersten, unbeschichteten Kugeln zeigen einen Abfall zu kleinen Wellenlängen hin, der auf Lichtstreuung an Oberflächenstrukturen hindeutet. Diese Hypothese, die auch durch Mikroskopaufnahmen gestützt wurde, wurde weiter dadurch gestützt, dass eine ARC diesen Effekt abmildert (orange vs. blau) und die Transmission bei kleineren Wellenlängen stärker anhebt als bei größeren, indem – wiederum hypothetisch – Oberflächenstrukturen durch die Beschichtung teilweise ausgeglichen und „geglättet“ werden. Daher wurde im Projektverlauf ein zusätzlicher Nachbehandlungsschritt der Kugeloberflächen in Betracht gezogen und getestet. Dieser zusätzliche Schritt in Form einer Politur der Oberfläche erhöht die Transmission in gewünschter Weise (grün zu blau).

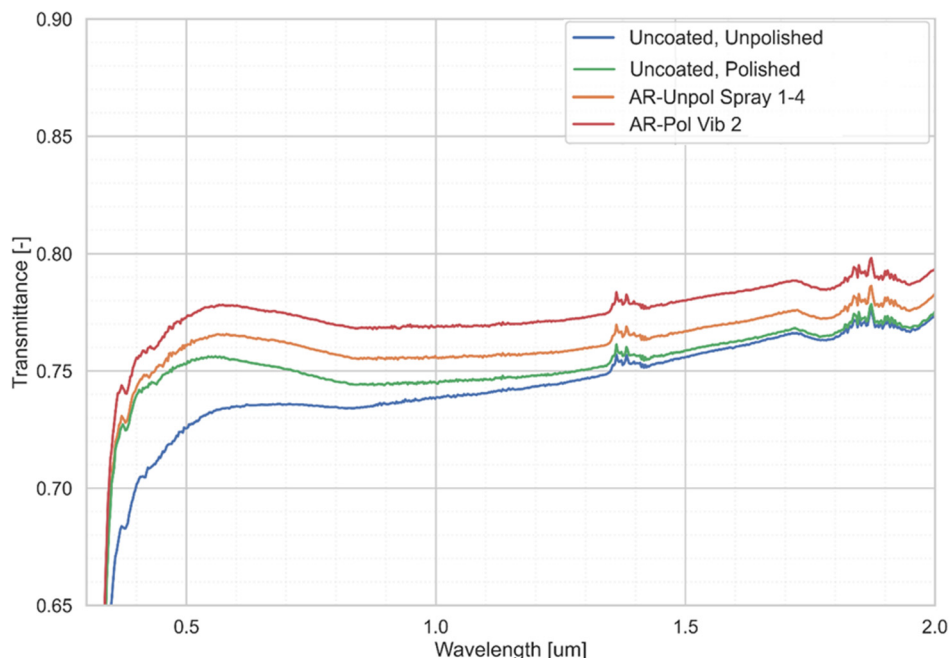


Abbildung 28: Evolution der SILI-SOE-Kugellinsen im Projektverlauf, Transmissionsmessung am Monolagen-Messaufbau von Fraunhofer ISE. Alle Kurven beziehen sich auf SILI-Standardkugeln (Typ S), die in der vorliegenden Ausführung einen Glastyp mit niedrigem Eisengehalt verwenden (low-iron, zur Verringerung der Extinktion im kurzwelligen Bereich). Blaue Kurve: unbeschichtet, nicht poliert; grüne Kurve: unbeschichtet, Nachpolitur; orange Kurve: ARC, nicht poliert; rote Kurve: ARC, Nachpolitur.

Durch den Einsatz der kostengünstigen Nachpolitur ergibt sich insbesondere im kurzwelligen Bereich eine deutliche Verbesserung der Transmission um 2-3%-Punkte. Durch den Einsatz der besten im Projekt entstanden ARC-Beschichtung ergibt sich über den gesamten Spektralbereich eine Verbesserung der Transmission von ca. 2%-Punkten. Die Messungen sind zwar aufgrund der unterschiedlichen geometrischen Gegebenheiten nicht direkt auf den Einsatz der Kugeln im micro-CPV Modul übertragbar, indizieren aber trotzdem sehr anschaulich die erreichbaren Verbesserungen in der Transmission, die sich mittelbar in einer Verbesserung des optischen Wirkungsgrads niederschlagen.

Um die möglichen Verbesserungen der optischen Effizienz durch den Einsatz einer ARC auf der SOE bewerten und auch das Schichtdesign optimieren zu können, wurde ein ARC-Materialmodell in die optische Simulation des CPV-Moduls integriert. In Abbildung 29 ist der Effekt einer ARC mit variabler Schichtdicke auf die optische Effizienz und die Teilzell-Ströme dargestellt, relativ zu einem System ohne ARC.

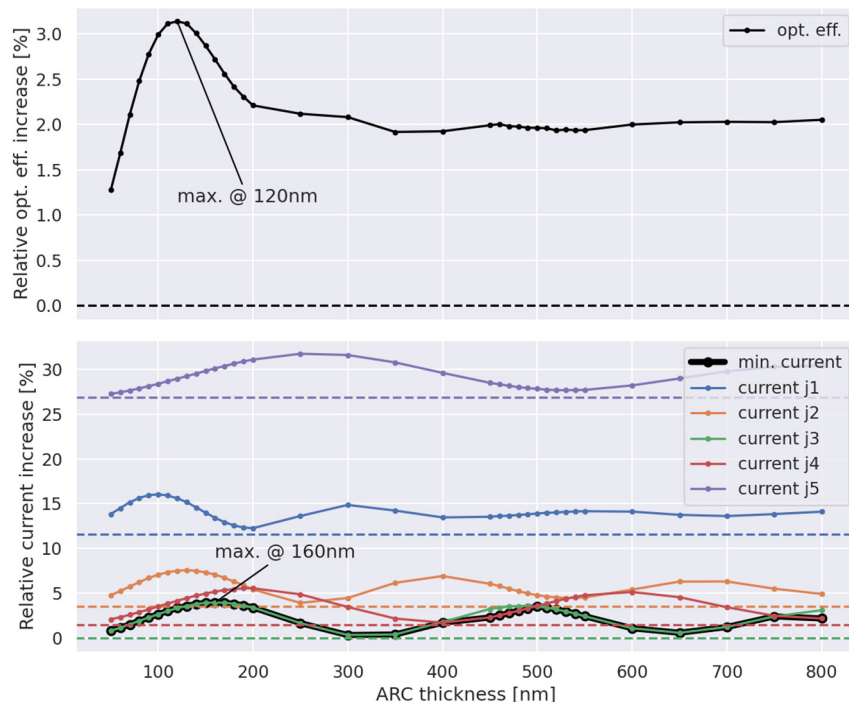


Abbildung 29: Simulierte relative Änderung der optischen Vollspektrum-Effizienz und der Teilzell-Ströme bei Variation der ARC-Schichtdicke. Die Referenzwerte ohne ARC sind jeweils als gestrichelte Linien dargestellt, für die Teilzell-Ströme beziehen sich die relativen Änderungen auf die Teilzelle 3 ohne ARC. Die limitierende Teilzelle (meist j3) ist als dicke schwarze Linie dargestellt (min. current).

Es ergibt sich ein ausgeprägtes Maximum der optischen Vollspektrum-Effizienz bei einer ARC-Schichtdicke von 120 nm, mit einer relativen Verbesserung von über 3 %. Auch im weiteren ARC-Schichtdickenbereich ist eine Verbesserung von ca. 2 % sichtbar. Abweichend davon tritt das Maximum des Teilzell-Stroms der limitierenden dritten Teilzelle bei einer Schichtdicke von 160 nm auf, mit einer relativen Verbesserung des Teilzellstroms von ca. 4 %. Ein weiterer, ähnlich hoher Gewinn liegt bei ca. 500 nm vor. Für eine Bewertung, welches Maximum in der Praxis relevanter ist, wird folgendes angemerkt: Kleine ARC-Schichtdicken sind laut SILI leichter herzustellen, größere Schichtdicken neigen zum Abplatzen. Zudem sind Schichtdicken-Variationen eher proportional zur Schichtdicke; Abweichungen wären bei einer Dicke von 500 nm entsprechend auch größer. Schließlich ist festzuhalten, dass beinahe im gesamten Bereich die

dritte Teilzelle limitierend bleibt. Diese Untersuchung zeigt, dass neben der Betrachtung der optischen Effizienz auch die Teilzell-Ströme berücksichtigt werden sollten. Die Simulationen lieferten also wichtige Hinweise für die Optimierung der AR-Beschichtung bei SILI.

2.1.4 AP4 Packaging Modul-Bodenplatte (Leitung: EVYTRA)

Im Arbeitspaket 4 wurden die Fertigungstechnologien zur Herstellung der mit Solarzellen und Bypassdioden bestückten Bodenplatte des micro-CPV Moduls entwickelt und bewertet. Schwerpunkte lagen dabei in der Leiterplattentechnik (Partner EVYTRA) und der präzisen Bestückung von und Verbindungstechnik für Micro-Konzentratorsolarzellen und Bypassdioden. Zudem wurden neue und alternative Prozesse zur Leiterbahnherstellung untersucht. Als Zielgröße wurden Prozesse für großformatigen Panels (24"x18") betrachtet. Kriterien für die Entwicklung waren Kosten, Durchsatz, Präzision, und Zuverlässigkeit. Neben der direkten Montage der Konzentrazorzellen auf die Bodenplatte (Chip-on-board) wurde eine komplexere Variante mit vormontierter Konzentrazorzelle und Bypassdiode in einem integrierten Chip Scale Package als Studie betrachtet (Partner TUB).

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Status
M4b	Alterungsversuche (Leiterbahn, Lötstopp) durchgeführt (ISE)	erreicht
M4d	Prozessbewertung zur Bestückung und Löten der Solarzellen (ISE)	erreicht
M4g	Bewertung der Prozesse zur Herstellung der Leiterbahn auf Glas, Konsolidierung der Ansätze	erreicht

Gedruckte Metallisierung

Die Prozessentwicklung wurde vom Projektpartner EVTRA durchgeführt. Das Fraunhofer ISE hat die Entwicklungen begleitet und stand im regelmäßigen Austausch mit dem Projektpartner.

Gedruckte Isolation

Die Prozessentwicklung wurde vom Projektpartner EVYTRA durchgeführt. Das Fraunhofer ISE hat die Entwicklungen begleitet und stand im regelmäßigen Austausch mit dem Projektpartner.

Leiterplatte

Das Leiterbahndesign dient der elektrischen Verschaltung der Solarzellen und der Wärmeverteilung. Außerdem ist das Pad Design entscheidend für die Platziergenauigkeit der Solarzellen (siehe Abschnitt zur Bestückung unten). Die wesentlichen Entwicklungen im Projekt zu optimalem Leiterbahndesign hinsichtlich Wärmemanagement und Platziergenauigkeit der Solarzellen, sowie zur Fertigung von Modulen wurden subtraktiv gefertigte Leiterplatten von EVYTRA genutzt. „Subtraktiv“ bezieht sich hier auf das Fertigungsverfahren, bei dem eine geschlossene Kupferschicht teilweise entfernt wird, um die Zielstruktur zu erzeugen. Darüber hinaus wurden im Projekt alternative Herstellungsprozesse in Betracht gezogen. EVYTRA untersuchte einen additiven Prozess auf Basis von Inkjet-Druck der Metallisierung. Bei Fraunhofer ISE wurden weitere Konzepte für eine additive Leiterplattenfertigung entwickelt und untersucht.

Subtraktive Leiterplatten

Für die Entwicklung des optimalen Leiterplattendesigns wurden Leiterplatten nur für die Prozessentwicklung (90 Pads) und Leiterplatten für Testmodule (3x3 Solarzellenanordnung) hergestellt. Später wurden diese dann für Demonstratormodule mit einer 6x10 Solarzellenanordnung und für Panelmodule mit einer 23x30 Solarzellenanordnung umgesetzt. Die vom ISE entwickelten Designs und von EVYTRA hergestellten subtraktiven Leiterplatten sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zusammengefasst.

Für die micro-CPV Anwendung dient die Leiterbahn als elektrischer Rückseitenkontakt der Solarzelle und muss daher auf mindestens einer Seite des Pads an die Leiterbahn „angeschlossen“ sein. Um das optimale Design festzulegen, wurden unterschiedliche Designs untersucht.

Alterungsversuche von subtraktiven Leiterplatten

Die Langzeitstabilität von subtraktiv hergestellten 3x3er Leiterplatten mit unterschiedlich dicken Leiterbahnstrukturen und 6x10-Designs mit vollflächigen Leiterbahnstrukturen wurde in Klimakammertests untersucht.

- Feuchte Frost Test: Temperaturbereich -40 bis +85 °C, relative Feuchtigkeit 85%, 24 h/Zyklus, Anzahl Zyklen: 24, angelehnt an IEC 62108 [32]
- Temperaturzyklisierung: Temperaturbereich -30 bis +85 °C, 70 min/Zyklus, Anzahl Zyklen: 1000

Nach der Alterung wurden Mikroskopaufnahmen gemacht und Haftungstests an den Leiterbahnstrukturen durchgeführt. Visuell konnte nach Alterung keine erkennbare Veränderung festgestellt werden; zudem bestanden alle getesteten Leiterplatten den Haftungstest.

Lotpastenauftrag

Zur Applikation von Lot wurden neben dem Standard Dispensierprozess auch die Verwendung von Lotkugeln auf der Solarzellrückseite, von Lotkugeln auf der Leiterplatte, der Schablonendruck mit Lotpaste sowie Jetdispensen untersucht.

Die unterschiedlichen Varianten wurden anhand folgender Aspekte experimentell untersucht und bewertet:

- Homogenität der Lotschicht mittels Röntgen-Aufnahmen
- Verbindung der Lotschicht zwischen Pad und Diode mittels Scherversuchen
- Einstellbarkeit des Lotvolumens
- Dauer der Applikation
- Komplexität der Applikation
- Prozessrobustheit

Tabelle 1 gibt eine Übersicht der Ergebnisse. Schablonendruck und Jet-Dispensen erscheinen als vielversprechendste Verfahren. Für den Forschungsbetrieb hat das Jet-Dispensen den Vorteil, flexibel auf Änderungen im Design oder Substrat reagieren zu können und hohe Kosten für z.B. neue Schablonen vermieden werden. Im Projekt wurde daher eine Jet-Dispenser Anlage beschafft, in Betrieb genommen und für Versuche und zur Modulfertigung genutzt (siehe auch Abbildung 33). Für eine kommerzielle Massenfertigung ist der höhere Durchsatz des Schablonendruckverfahren relevant, eine genaue technoökonomische Bewertung unter Berücksichtigung von Investitions- und Betriebskosten wurde im Projekt allerdings nicht durchgeführt.

Tabelle 1. Prozessbewertung verschiedener Prozesse zur Aufbringung des Lotdepots

Prozess	Lot-volumen	Ein-schlüsse /Lunker	Scher-wider-stand	Durch-satz/ Prozess-zeit	Prozessabfolge / Komplexität	Robust-heit
Dispensierte Lotpaste		10-20%			1 Dispensieren, 2 bestücken, 3 löten	
Schablonendruck		<6%	>50 N		1 Drucken, 2 bestücken, 3 löten	
Jet-Dispensen					1 Jetten, 2 bestücken, 3 löten	
Bekuglung Leiterplatte		0%	>50 N		1 Flussmittel, 2 Bekugeln, 3 anschmelzen, 4 Flussmittel, 5 bestücken, 6 Löten	
Bekuglung Solarzellwafer					1 Wafer-Rückseite strukturieren, 2 Flussmittel, 3 Bekugeln, 4 anschmelzen, (sägen), 5 umbonden, 6 Flussmittel PCB, 7 bestücken, 8 Löten	

++	+	0	-	--	unbekannt
----	---	---	---	----	-----------

Bestücken Halbleiterbauelemente

Für die Bestückung der Micro-Solarzellen auf die Leiterplatte wurde ein Prozess entwickelt zur Selbstausrichtung der Halbleiterchips auf den Kontaktpads der Leiterbahn. Die Selbstausrichtung basiert auf Rückstellkräften beim Aufschmelzen des Lots, welche den Chip zentrisch auf dem Pad ausrichten. Das Prinzip ist in Abbildung 30 schematisch und in Abbildung 31 mit Aufnahmen einer Hochgeschwindigkeitskamera während des Prozesses veranschaulicht.

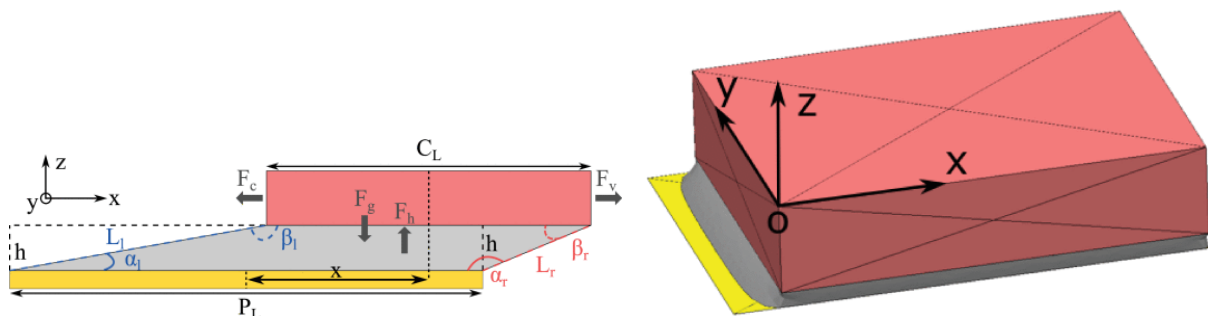


Abbildung 30. Schematische Darstellung der relevanten Komponenten für die Oberflächenspannungs-induzierte Selbstausrichtung. Auf das Kontaktpad (gelb) wird Lotpaste appliziert. Die Micro-Solarzelle (rot) wird zunächst ungenau bestückt. Beim Aufschmelzen des Lots (grau) benetzt die Kontaktflächen auf beiden Seiten. Die Oberflächenspannung führt zu Rückstellkräften, die den Chip zentrisch auf dem Kontaktpad ausrichten. Grafiken aus [33]

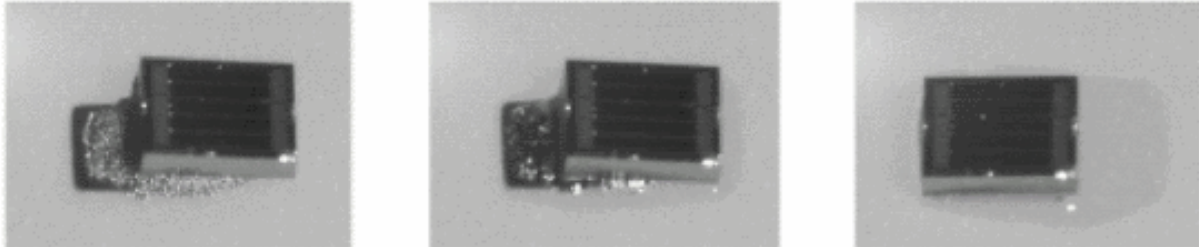


Abbildung 31. Aufnahmen einer Hochgeschwindigkeitskamera während der Selbstausrichtung einer micro-CPV Solarzelle. Links: Die Micro-Solarzelle wurde auf dem mit Lotpaste versehenen Kontaktpad fehlplatziert. Mitte: Beim Aufschmelzen des Lots benetzen die Unterseite des Halbleiterchips und das Kontaktpad. Rechts: Rückstellkräfte führen zu einer zentrischen Ausrichtung des Chips auf dem Kontaktpad. Grafik aus [34]

Im Projektverlauf wurde der Bestückungsprozess intensiv experimentell und theoretisch untersucht. Dabei wurden diverse Fragestellungen bearbeitet, insbesondere im Hinblick darauf, wie sich verschiedene Einflüsse auf die Selbstausrichtung auswirken. Betrachtet wurden u.a. unterschiedliche Pad-Layouts, definierte Fehlplatzierungen, Leiterbahnstrukturen, oder das Lotvolumen. Eine detaillierte Beschreibung der Experimente und Ergebnisse ist in den folgenden zwei Journal Veröffentlichungen und einem Konferenzbeitrag [33–35] dokumentiert. Eine wesentliche Erkenntnis der Untersuchungen ist, dass eine gewisse Fehlausrichtung bei bzw. nach der Bestückung vorteilhaft für die folgende Selbstausrichtung beim Reflow-Löten ist. Diese führt zu initial höheren Rückstellkräften und damit geringerer Auswirkung von widerständigen Reibungskräften, so dass bessere Positionierungsergebnisse bei initialer Fehlplatzierung erreicht werden.

- Elisa Kaiser, Maike Wiesenfarth, Victor Vareilles, Martin Schneider-Ramelow, Stefan Glunz, Henning Helmers, *Forced Motion Activated Self-Alignment of Micro-CPV Solar Cells*, IEEE Journal of Photovoltaics, 2024. 14(2): pp. 288-95. DOI: [10.1109/JPHOTOV.2024.3355403](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2024.3355403)
- Victor Vareilles, Elisa Kaiser, Philippe Voarino, Maike Wiesenfarth, Romain Cariou, Frank Dimroth, Mohamed Amara, Yannick Veschetti, Henning Helmers, *Experimental and simulative correlations of the influence of solder volume and receptor size on the capillary self-alignment of micro solar cells*, IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems, 2024. DOI: [10.1109/JMEMS.2024.3352396](https://doi.org/10.1109/JMEMS.2024.3352396).
- Elisa Kaiser, Maike Wiesenfarth, Victor Vareilles, Henning Helmers, *Impact of Pad Layouts and Solder Volume on Self-Alignment of Micro Solar Cells*, in: Proceedings of 24th European Microelectronics Packaging Conference (EMPC23), 2023. Cambridge, UK. DOI: [10.23919/EMPC55870.2023.10418434](https://doi.org/10.23919/EMPC55870.2023.10418434) and DOI: [10.4071/001c.94746](https://doi.org/10.4071/001c.94746)

Bestückung von Panel-formatigen Bodenplatten

Für die Bestückung von Panel-formatigen Bodenplatten mit Micro-Solarzellen wurde ein Bestückprozess auf einer für diese Größen geeigneten und am Fraunhofer ISE verfügbaren Anlage der Firma DBMatik entwickelt (siehe Abbildung 32). Da die Anlage ursprünglich nicht für das Bestücken solcher kleinen Bauteile ausgelegt war, musste sowohl die Prozessführung als auch z.B. Greifwerkzeuge aufwändig angepasst werden. Mit dem angepassten Prozess konnte erfolgreich Panel-formatige Bodenplatten bestückt werden.

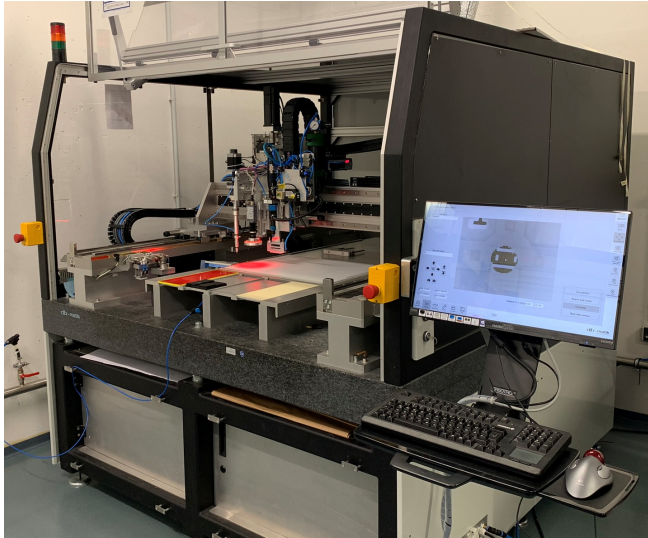


Abbildung 32: Links: Bestück-Anlage von DBMatik am Fraunhofer ISE. Rechts: Greifwerkzeug mit Solarzelle beim Transport zur Bestückposition auf einem Testsubstrat.

Für die anvisierte Massenfertigung der micro-CPV Module stellt die serielle Bestückung der Zellen eine Limitierung dar, auch für Hochdurchsatzanlagen. Eine erhöhte Durchlaufzeit der Bodenplatten könnte durch gleichzeitiges Bestücken mehrerer Bauteile erreicht werden. Dazu müssen zwei unterschiedliche Funktionen geleistet werden: Zum einen die Bauteilbereitstellung und zum anderen die Bauteilaufnahme bzw. das Greifwerkzeug. Im Projektzeitraum wurden initiale Versuche zu einer möglichen parallelisierten Bestückung durchgeführt. In ersten Versuchen wurde die parallele Aufnahme und das Setzen von Solarzellen untersucht, was als sehr vielversprechend bezüglich Kosten und Durchsatzzeiten angesehen wird, erfordert jedoch weitere Entwicklungen, die im Rahmen des Projektes nicht möglich waren.

Im Rahmen der Projektaufstockung konnte ein Bestücker und Jetdispenser beschafft und in Betrieb genommen werden (siehe Abbildung 33). Damit können auf einer Normleiterplatte in der industriellen Produktion bis zu 180'000 Lotpunkte gesetzt und 5'600 Bauteile bestückt werden. Die Bestückung einer Panelbodenplatte ist in wenigen Minuten realisierbar. Im Projekt wurde auf dieser Anlage erfolgreich ein Bestückprozess entwickelt. Die in AP6 beschriebenen Panel-Bodenplatten wurden mit dieser Hochdurchsatzanlage hergestellt.

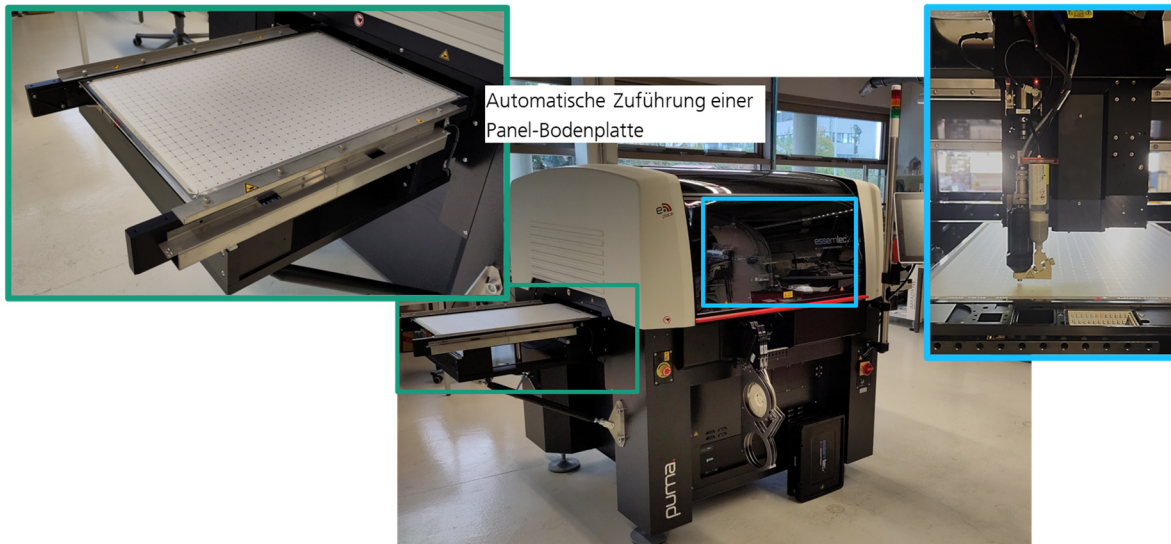


Abbildung 33: Bestücker und Anlage für das Jetten von Lotpaste von Essemtec am Fraunhofer ISE. Die Bodenplatten werden automatisch zugeführt, Lotpaste aufgetragen und die Solarzellen bestückt (Bildausschnitt links). Im Bildausschnitt rechts ist die Dispenseinheit während des Prozesses zu sehen.

Lötprozess

Für den Lötprozess der bestückten Panel-Bodenplatten wurde der vorhandene Reflow-Ofen erweitert um auch 18" breite Substrate zu verarbeiten. Ein Lötprozess wurde entwickelt. Für einen Reflowprozess ist ein Luftblasenanteil von unter 10 % zu erwarten [36]. In Röntgenanalysen mit 20 gelöteten Dioden wurde ein durchschnittlicher Luftblasenanteil von etwa 3 % bei einem Maximalwert von 8 % gezeigt, was ein sehr gutes Lötresultat darstellt.

Vorderseitenkontaktierung

Für die Entwicklung gedruckter Vorderseitenkontakte bei Projektpartner EVYTRA wurden Proben zur Verfügung gestellt. Leider konnten für diesen gedruckten Kontakt keine zufriedenstellenden Ergebnisse erreicht werden, sodass die Module im Projekt am Fraunhofer ISE mittels Drahtbonds kontaktiert wurden.

Ein Ball-Wedge-Bonder von der Firma TPT Wire Bonder GmbH Co & KG wurde beschafft und ein Programm mit einem dünnen Draht von 17.5 μm für einen Ball-Wedge-Bond und einen Wedge-Wedge-Bond entwickelt. Letzterer wurde für die in AP6 gefertigten Testmodule sowie das Submodul-Demonstratormodul genutzt.

Im Zuge der Projektaufstockung wurde für die Panel-formatigen Bodenplatten ein neuer Prozess entwickelt. Hierzu wurde mit einer vorhandenen Maschine der Firma Hesse & Knipps GmbH eine teilautomatisierte Lösung entwickelt. Da die Maschine nicht für die Substratgröße ausgelegt ist, muss die Bodenplatte in vier Quadranten unterteilt werden und es wurde eine Aufnahme zur Halterung und Temperierung der Bodenplatte entwickelt. Mit dem Bondprozess wurden Bodenplatten mit unterschiedlichen Drähten gebondet (siehe Abbildung 34).

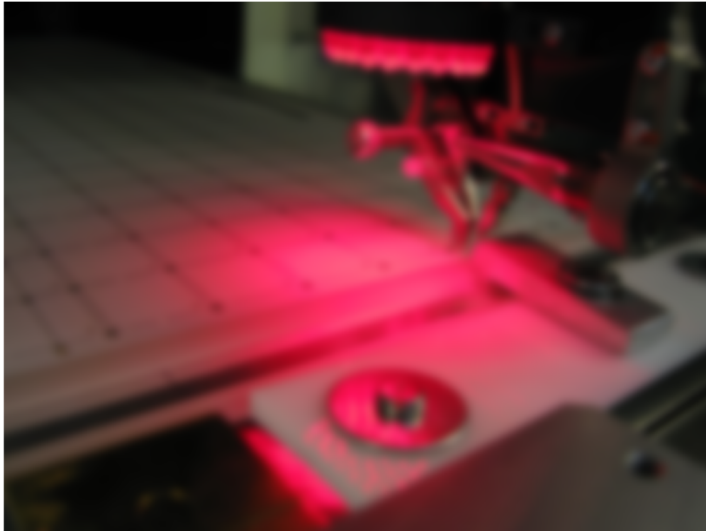


Abbildung 34: Panelbodenplatte bei der Prozessentwicklung im Dünndrahtbonder.

Chip Scale Package

Zur Unterstützung der Evaluierung des Chip-Scale-Packages von TUB, wurden am Fraunhofer ISE thermische Finite-Elemente-Simulationen durchgeführt und mit TUB diskutiert. Mit Hilfe der Simulationen konnte gezeigt werden, dass die Wärmeverteilung im Wesentlichen vom Layout der Leiterbahn bestimmt wird, solange das Bauteil Chip-Scale-Package kompakt aufgebaut ist. Damit wird keine deutliche Temperaturerhöhung in der Solarzelle durch das Chip-Scale-Package im Vergleich zur direkt montierten Solarzelle erwartet. Ziel ist eine möglichst kleine Baugröße des Packages, da mit dem Volumen auch die Kosten steigen.

2.1.5 AP5: Platzierung der Kugellinse (Leitung: WAGENBRETT)

Im fünften Arbeitspaket wurden Prozesse zur präzisen Platzierung der Kugellinse als Sekundäroptik auf den mit Solarzellen bestückten Leiterplatten entwickelt. Dazu wurden Kugeln mit einem Schablonendruckverfahren aufgebracht, analog dem Aufbringen von Lotkugeln mit der Anlagentechnik von Partner Wagenbrett. Zur Verbindung und optischen Kopplung wurde Silikon eingesetzt (TUB). In einem zweiten Schritt wurde die Anlagentechnik angepasst, um mittels Vakuumaufnahme eine präzisere Bestückung zu ermöglichen sowie mittels integrierter Aushärtevorrichtung das Silikon noch in der Anlage auszuhärten.

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Status
M5b	Zuverlässigkeits- und Alterungsversuche zum Silikon durchgeführt (TUB, ISE)	erreicht

Anlagen-Konfiguration

Die Anlagen-Konfiguration wurde vom Projektpartner Wagenbrett durchgeführt. Das Fraunhofer ISE zusammen mit dem Projektpartner TUB standen im regelmäßigen Austausch, so dass Anlagenspezifikationen gemeinsam erarbeitet und prozesstechnische Fragestellungen geklärt werden konnten.

Prozessentwicklung Silikon-Depot

Das Fraunhofer ISE hat Proben von montierten Solarzellen auf Leiterbahnen hergestellt und für die Prozessentwicklung an den Projektpartner TUB für Druck- und Setzversuche übergeben. Die Entwicklungsergebnisse bei TUB wurden in regelmäßigen Treffen diskutiert.

Alterungsversuche Silikon

Für die Langzeitstabilität der Module ist entscheidend, dass das zur Kopplung der Kugellinsen an die Solarzellen verwendete Silikon keiner Alterung unterliegt („Yellowing“) und eine hohe Transmission erhalten bleibt.

In einem ersten Versuch wurden Proben zwei verschiedener Silikone (Silikon 1 UV-aushärtend, Silikon 2 thermisch aushärtend) mit einer 0,2-mm Silikonschicht hergestellt und im Brennpunkt der Primärlinsoptik über 4 Monate im Zeitraum 08/22 bis 12/22 konzentrierter Solarstrahlung ausgesetzt. In Transmissionsmessungen konnten dabei keine Alterungserscheinungen festgestellt werden.

Als beschleunigter Alterungstest wurden zudem Proben mit hochintensiver UV-Strahlung bestrahlt (Leistungsdichte 5.33 W/cm^2 entspricht dem UV-Anteil von 2000-facher Sonnenlicht-Konzentration). Es wurden die Silikone, eingebettet als Planprobe unterschiedlicher Dicken (0,2 mm, 1 mm und 3 mm) zwischen zwei Objektglaträgern, bestrahlt. Die Tests wurden bis zu 1300 h durchgeführt. Dickere Proben haben einen höheren Energieeintrag und altern daher schneller. So können mögliche Degradationseffekte schneller sichtbar gemacht werden. Es wird angemerkt, dass eine direkte Übersetzung der Alterungsdauer in Lebenszeit in CPV-Anwendung aufgrund verschiedener Effekte schwierig ist und hier daher nur eine qualitative Bewertung vorgenommen wurde. Abbildung 35 zeigt links die Transmissionskurven der 3-mm Proben beider Silikone nach etwa 300 h UV-Bestrahlung im Vergleich zur Referenz (Transmission des Glaträgers ohne Silikon). Bei Silikon 1 ist eine ausgeprägte Alterung in Form einer reduzierten Transmission im kurzwelligen Bereich erkennbar, welche auch mit bloßem Auge als Vergilbung erkennbar ist (Abbildung 35 rechts). Es ist davon auszugehen, dass diese Alterung einer anhaltenden photochemischen Reaktion in diesem UV-vernetzenden Silikon zuzuschreiben ist. Für die micro-CPV Anwendung wird diese Klasse an Silikonen daher als ungeeignet eingestuft.

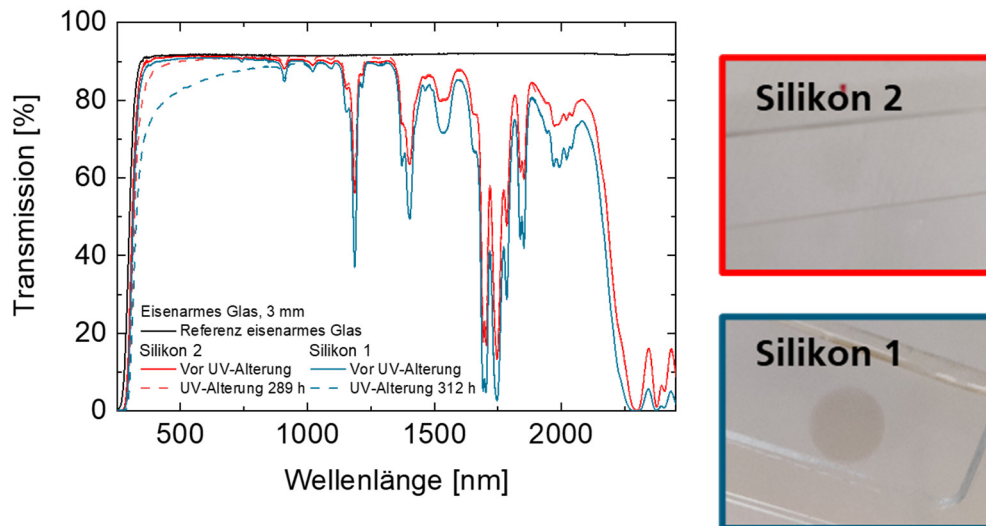


Abbildung 35: Links: Spektrale Transmissionskurven zweier 3-mm Silikonproben (blau und rot), eingebettet in zwei eisenarmen Objektglasträgern. nach 300 h UV-Alterung im Vergleich zur Transmission der Glasreferenz ohne Silikon (schwarz). Rechts: Optische Mikroskopaufnahmen der Proben. Silikon 1 zeigt eine deutliche sichtbare Vergilbung im bestrahlten Fleck.

Das thermisch aushärtende Silikon 2 weist gute Transmissionseigenschaften und trotz hoher Intensität nur eine sehr geringe Alterung auf. Allerdings weist dieses Silikon in der vorliegenden Zusammensetzung eine vergleichsweise geringe Viskosität (4 Pa·s) auf. Für eine Fertigung mittels Schablonendruckes wäre stattdessen ein zähflüssigeres hochviskoses Silikon (~50 Pa·s) notwendig. Im weiteren Projektverlauf wurden auch hochviskose Alternativen getestet. Wie in Abbildung 36 gezeigt, zeigten diese allerdings eine leicht reduzierte Transmission, was ein Resultat der zu Erhöhung der Viskosität beigemischten Additive sein könnte. Zukünftig wird daher eine weitere anwendungsspezifische Materialentwicklung empfohlen.

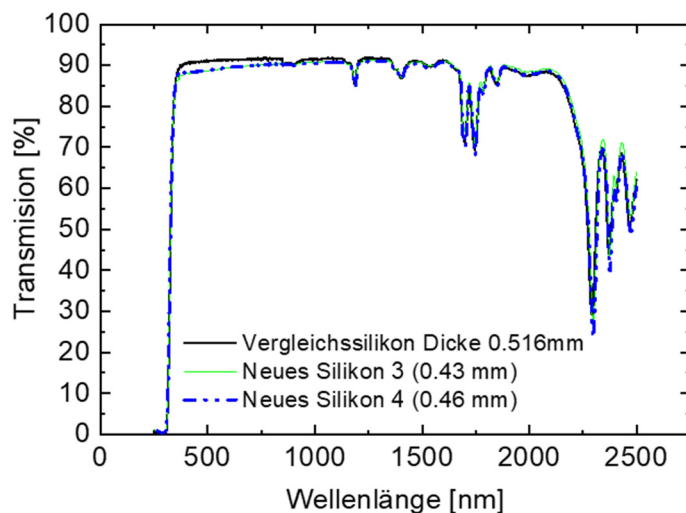


Abbildung 36: Transmissionsmessung von Glas-Silikon-Glas-Proben der Referenz (Silikon 2 aus der vorigen Abbildung) und zwei unterschiedlichen Silikon mit erhöhter Viskosität.

Darüber hinaus wurden Leiterplatten-Proben Klimakammertests unterzogen (siehe Abbildung 37). Dazu wurden 2x5 Leiterplatten direkt mit Kugellinsen (mit und ohne ARC) bestückt (ohne Solarzellen), zudem

wurden 2 Leiterplatten mit Solarzellen, Drahtbonds, und Kugellinsen (ohne ARC) bestückt. Die Module wurden Feuchte-Frost-Tests und einer Temperaturzyklisierung unterzogen:

- Feuchte-Frost-Tests (engl. humidity freeze, HF: Temperaturbereich -40 bis +85 °C, relative Feuchtigkeit 85 %, 24 h/Zyklus, Anzahl Zyklen: 12+12, angelehnt an IEC 62108)
- Temperaturzyklisierung (Temperaturbereich -30 bis +85 °C, 70 min/Zyklus, Anzahl Zyklen: 500+500)

Untersuchungen zielten auf mögliche optisch erkennbare Degradation des Silikons oder optisch erkennbare Veränderung der ARC der Kugellinsen, die Stabilität der Lotschicht, die Stabilität der Dünndrahtbonds, die Haftung der Kugellinsen im Silikon (mögliche Positionsänderung, Schertests), sowie die Haftung der Leiterbahnstruktur auf der Glasleiterplatte. Im Rahmen der durchgeführten Versuche konnte im Hinblick auf diese Punkte keine relevante Degradation festgestellt werden.

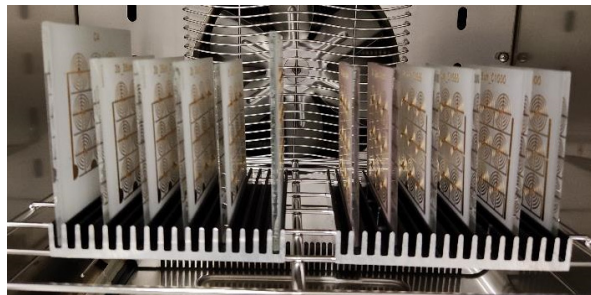


Abbildung 37: Verschiedene Leiterplatten (senkrecht aufgestellt) in einer Klimakammer.

Silkonauftragung auf Panel-formatige Bodenplatten

Zur Auftragung der Silikon-Depots für die folgenden Sekundäroptik-Bekuglung auf Panel-formatige Bodenplatten, wurde eine Prozess auf Basis des manuellen Schablonendrucks entwickelt. Verschiedene Schablonen (Metallfolien, verschiedene Materialien und Dicken) wurden getestet. Ebenfalls wurde ein Reinigungskonzept erarbeitet. Basierend auf den Ergebnissen wurde eine neue Schablone beschafft, die mit einem Distanzblech kombiniert wird, um einen höheren Abstand zu erhalten. Mit der neuen Schablone wurden unterschiedliche Substrate mit Zellen und ohne Zellen bedruckt.

Glaskugelplatzierung

Die Bestückung der Leiterplatten mit Kugellinsen erfolgte – neben manuellen Setzexperimenten – mit der Anlagentechnik von WAGENBRETT. Das Verfahren wurde damit angelehnt an die aus der Mikroelektronik bekannte Bekuglung von Wafern oder Leiterplatten mit Lotkugeln.

Im Verlauf des Projekts wurden Fraunhofer ISE von WAGENBRETT zwei neuentwickelten Anlagen für die Bestückung von Panel-formatigen Bodenplatten zur Verfügung gestellt. In der ersten Anlage wurde die Platzierung der Glaskugeln über eine Schablone vorgenommen. Abbildung 38 zeigt links ein Foto dieser Anlage.

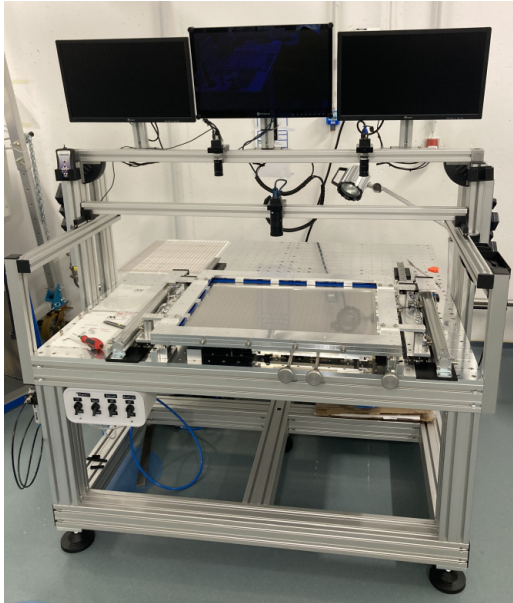


Abbildung 38. Links: Von Partner Wagenbrett entwickelte Anlage zur Bekugelung von Glaskugeln auf Panel-formatigen Leiterplatten.

Es wurden zwei Herausforderung dieses Schablonen-basierten Verfahrens identifiziert. Um ein Verstopfen der Schablone zu vermeiden und um eine gewisse Toleranz im Kugeldurchmesser zu erlauben, müssen die Öffnungen in der Schablone größer als der Kugeldurchmesser gewählt werden. Dieser Unterschied führt aber zu einer resultierenden Spanne in der Position. Zudem liegt eine Herausforderung darin, die Kugel nach Entfernen der Schablone positionstreu im Silikon als Kopplungsmedium zu halten. Dazu ist es vorteilhaft das Silikon noch im Prozess auszuhärten. Im Rahmen des Projekts wurde gemeinsam mit den Partnern WAGENBRETT und TUB eine Anlagentechnik konzipiert, die dies umsetzt und zum Patent angemeldet. Ein Merkmal dieser Anlagentechnik ist die Nutzung eines präzisen Vakuumwerkzeugs zur Aufnahme der Glaskugeln in vordefinierter Zielposition, sowie eine integrierte Aushärtevorrichtung. So können die Kugeln nach einmaligem Ausrichten gleichzeitig abgesetzt und das Silikon ausgehärtet werden, sodass die Positionsgenauigkeit allein von der globalen Ausrichtungsgenauigkeit zur Bodenplatte und der Präzision des Vakuumwerkzeugs abhängt.

Im Rahmen einer Projektaufstockung wurde von Projektpartner Wagenbrett eine entsprechende verbesserte Anlagentechnik mit Setzfunktion durch mit Vakuum gehaltenen Sekundärkugeln entwickelt. Die Entwicklung wurde von Fraunhofer ISE intensiv begleitet. Für eine thermische Aushärtung des Silikons in der Anlage wurden Heizdrähte vorgesehen. Zudem wurden weitere Optimierungen implementiert, wie die Möglichkeit der Anpassung des Abstands zwischen Substrat und Vakuumwerkzeug, um Dickenvariationen von Kugeln oder Substrat berücksichtigen zu können, sowie das Vorgehen zur Ausrichtung zur Bodenplatte.

Zum Ende des Projekts konnte die Anlage am Fraunhofer ISE in Betrieb genommen werden. Für die Bekugelung von Bodenplatten musste der Silikondruckprozess angepasst werden, um eine ausreichende Haftung der Kugeln zu gewährleisten. Schließlich wurden Panel-formatige Bodenplatten mit dieser Anlagentechnik mit Kugellinsen bestückt. Abbildung 39 zeigt ein Histogramm der Abweichung der Kugelpositionen von der Sollposition in x- und y-Richtung. Die Verteilungen sind in guter Näherung normalverteilt mit einer Standardabweichung von nur 14.5 μm bzw. 14.1 μm in x- und y-Richtung, um Mittelwerte von -19 bzw. -17 μm . Die geringe Standardabweichung zeigt eindrücklich die mit dem neuen Verfahren erreichte geringe Streuung der Kugelposition. Die verschobenen Mittelwerte zeigen eine

verbleibende Fehlausrichtung zwischen Bodenplatte und Werkzeug, welche durch weitere Prozessoptimierung weiter verbessert werden kann.

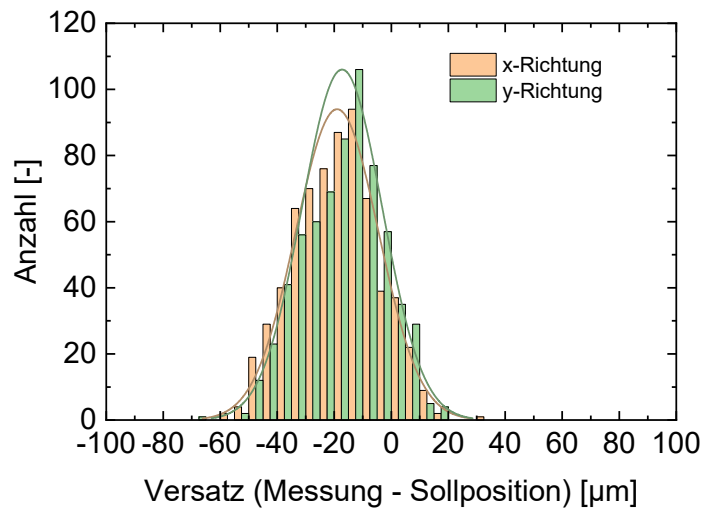


Abbildung 39. Statistische Analyse der Abweichung der Kugelposition von der Sollposition nach Bekuglung einer Panel-formatigen Bodenplatte.

2.1.6 AP6: Micro-CPV Modul (Leitung: ISE)

Im letzten Arbeitspaket wurde die Modulaufbautechnologie entwickelt, sowie alle Komponenten und Fertigungsverfahren zusammengebracht. Zur Untersuchung einzelner Prozessschritte und zur Beantwortung dezidierter Entwicklungsfragen wurden Testmodule definiert, hergestellt, und zur Prozessbewertung bzw. Modulcharakterisierung genutzt und vermessen. Anhand der Testmodule erfolgte auch eine Charakterisierung und Bewertung der Komponenten unterschiedlicher Generationen und Fertigungsprozesse. Zudem wurden Messergebnisse zur iterativen Entwicklung in thermischen, optischen, und elektrischen Simulationen in AP1 genutzt. Schließlich wurden auf Basis der entwickelten Komponenten und Fertigungsprozesse micro-CPV Moduldemonstratoren gefertigt, sowie im Kalibrierlabor des ISE indoor sowie outdoor vermessen, und ein Performance-Rating durchgeführt. Im letzten Projektteil wurde die Modultechnologie auf das größere Panel-Format skaliert.

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Status
M6a	Konsolidierung der verfolgten Ansätze, Definition des micro-CPV Moduldemonstrators	erreicht
M6b	Micro-CPV Demonstratormodul hergestellt und bereit für Charakterisierung	erreicht
M6c	Micro-CPV Modul Outdoor-Performance demonstriert, Wirkungsgrad >36%	erreicht
M6d	Micro-CPV Demonstratormodul in Panelformat hergestellt und charakterisiert (ISE)	erreicht

Fertigung micro-CPV Module: Mono-, Test- und Demonstratormodule

Im Laufe des Projekts wurden diverse Module gefertigt und untersucht. Diese dienten u.a. der experimentellen Untersuchung einzelner Aspekte des Moduldesign oder verschiedenen verwendeten Komponenten. Die folgende Tabelle 2 und Abbildung 40 zeigen eine Übersicht der verschiedenen im Projekt realisierten Modulgrößen.

Tabelle 2. Übersicht der verschiedenen im Projekt realisierten Modulgrößen

Bezeichnung	Array	Anzahl Symmetrieelemente	Aperturfläche [cm²]
Monomodul	1x1	1	3,4225
Testmodul	3x3	9	30,8025
Demonstratormodul	6x10	60	205,35
Panel-Modul	bis 23x30	bis 690	bis 2361,525

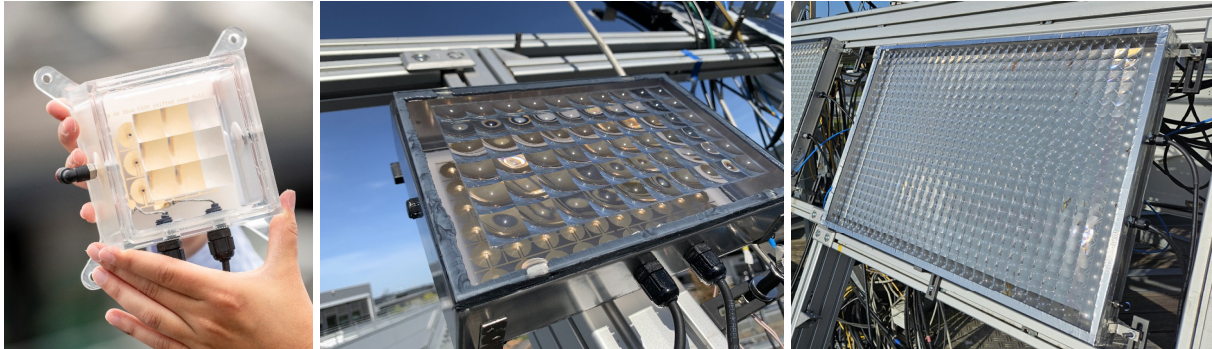
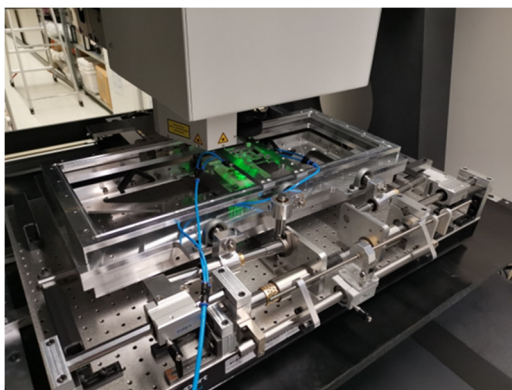


Abbildung 40: Verschiedene im Projekt realisierte Moduldesigns und Größen. Links: Testmodule mit 3x3 Symmetrieelementen zur Untersuchung einzelner Aspekte, Test verschiedener Komponenten und Fertigungstechnologien. Mitte: Demonstratormodul in „Submodul“-Klasse mit 6x10 Zell-Linsen-Einheiten. Rechts: Panel-formatiges Modul mit bis zu 23x30 Zell-Linsen-Einheiten und einer Aperturfläche >2000 cm².

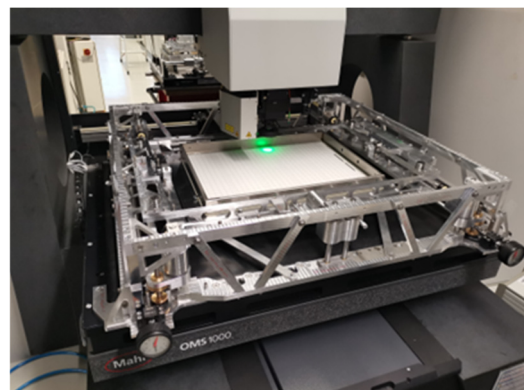
Entwicklung Modulaufbau

Nach der Bestückung von Bodenplatten ist für die Herstellung von micro-CPV Modulen das Ausrichten und Fügen der Bodenplatten mit der Linseplatte erforderlich. Dazu wird ein Rahmen mit der Bodenplatte verbunden und dann die Linseplatte dazu ausgerichtet und ebenfalls verbunden.

Für die Fertigung der kleineren Testmodule (3x3 Solarzellenanordnung) und der Submodul-Klasse Demonstratormodule (6x10 Solarzellenanordnung, Aperturfläche $A_{ap}=205 \text{ cm}^2$) wurde im Rahmen des Projekts eine Positioniervorrichtung entwickelt, gefertigt und getestet (siehe Abbildung 41a). Die Positioniervorrichtung ermöglicht eine manuelle Positionierung mit Hilfe des Kamerasystems eines vorhandenen Koordinatenmessplatzes. Zur Herstellung der mehr als 10-mal größeren Panel-formatigen Module (23x30 Solarzellenanordnung) wurde eine zweite größere Positioniervorrichtung konzipiert und realisiert (siehe Abbildung 41b).



a) Positioniervorrichtung für Test- und Demonstratormodule



b) Positioniervorrichtung für Panel-Module

Abbildung 41. Positioniervorrichtungen zur Ausrichtung der Linseplatte zur Bodenplatte integriert in den vorhandenen Koordinatenmessplatz.

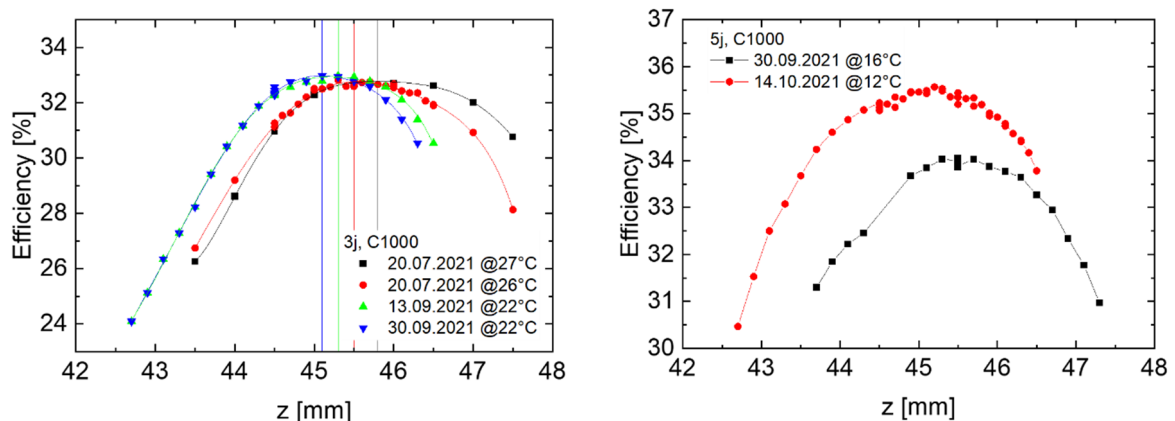
Modulcharakterisierung & Evaluierung

Im Rahmen des Projekts wurden zahlreiche Messungen von Mono- und Testmodulen auf der zwei-achsigen Nachführeinheit am CPV-Außenmessplatz des Fraunhofer ISE durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Aspekte im Bereich der Komponenten- und der Modulentwicklung untersucht. Im Folgenden werden beispielhafte Ergebnisse zusammengefasst.

- Einfluss der Modulhöhe

Es wurden micro-CPV Zell-Linsen-Einheiten mit 3J und 5J Solarzellen mit plan-konvexen Silikon-auf-Glas Linsen untersucht. Für Testmodule mit festem Rahmen muss die Rahmenhöhe optimal gewählt werden. Mit Hilfe der einzelnen Zell-Linsen Einheiten ohne festen Rahmen kann der Einfluss der Modulhöhe durch Variation des Abstandes experimentell untersucht werden („Z-Scan“).

Abbildung 42 zeigt beispielhaft die Z-Scan Messungen für eine Einheit mit einer Dreifachsolarzelle im Design C1000 (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, a) und einer Fünffachsolarzelle im Design C1000 (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, d). Dabei liegt der optimale Abstand zwischen Glasoberseite Bodenplatte zu Glasunterseite Linsenplatte für beide Einheiten zwischen 45.1 mm und 45.8 mm. Diese Streuung wird auf die Auswirkung unterschiedlicher Messbedingungen wie Umgebungstemperatur, Sonnenspektrum und Einstrahlungsintensität zurückgeführt. Im Rahmen der Streuung entspricht dies dem Erwartungswert aus dem Design von 45.4 mm.¹⁴



a) Zell-Linsen-Einheit mit einer 3J C1000 Solarzelle b) Zell-Linsen-Einheit mit einer 5J C1000 Solarzelle

Abbildung 42. Z-Scan Messungen von Monomodulen an unterschiedlichen Tagen und Außenbedingungen. Die optimale Modulhöhe liegt für beide Einheiten zwischen 45.1 mm und 45.8 mm, und entspricht damit im Rahmen der Streuung dem Erwartungswert aus dem Design von 45.4 mm.

- Temperaturabhängigkeit der plan-konvexen Silikon-auf-Glas Linsenplatte

Aus früheren Untersuchungen an CPV Modulen ist bekannt, dass die Linsentemperatur von Modulen mit SoG Fresnellinse einen relevanten Einfluss auf die elektrische Modulleistung haben kann. Ursächlich ist dafür die thermo-mechanischen Deformation der Fresnel-Facetten in Kombination mit der Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex des Silikonmaterials. Im Projekt wurden zunächst ebenfalls Linsen der SoG Technologie, aber in plan-konvexer Ausführung ohne Fresnel-Struktur eingesetzt. Neben optischen Simulationen (AP1) wurde deren Temperaturabhängigkeit experimentell untersucht.

¹⁴ Die Designfokusslänge der plan-konvexen SoG Linse beträgt 44 mm. Unter Berücksichtigung der Dicke der Leiterbahn, der Lotschichtdicke, der Zellhöhe und der Kugellinse, beträgt die Designmodulhöhe $z=45.4$ mm.

Dazu wurde die Temperatur der Linseplatte während einer Außenmessung in einem speziellen Messaufbau von 35°C bis 70°C variiert. In 5 K Schritten wurden sowohl Z-Scans (Variation Abstand Zelle zur Linse) als auch Strom-Spannung (*I-V*) Messungen durchgeführt. Dabei wurde die Bodenplatte aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, d verwendet. Insgesamt zeigt sich eine geringe Temperaturabhängigkeit, wobei die optimale Modulhöhe zwischen 35°C und 55°C bei 45.4 mm liegt. Bei höheren Temperaturen wurde ein leichter linearer Anstieg der optimalen Modulhöhe festgestellt bis zu 45.7 mm bei 70°C. Dies ist im Einklang mit den Erwartungen aus optischen Simulationen. Erklärbar ist diese geringe Temperaturabhängigkeit durch gegenläufige Effekte, die sich nahezu kompensieren, nämlich der temperaturbedingten Änderung des Brechungsindex und die Auswirkung der Verformung der plankonvexen Silikonform.

Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse wurde im folgenden Fachartikel [37] publiziert:

- Elisa Kaiser, Maik Wiesenfarth, Marc Steiner, Gerald Siefer, Peter Nitz, Peter Schöttl, Stefan W. Glunz, Henning Helmers, *Power Rating of a Novel Micro-CPV Module Concept and Operational Influences*, IEEE Journal of Photovoltaics, Volume: 15, Issue: 3, p: 434-441, May 2025. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2025.3547046

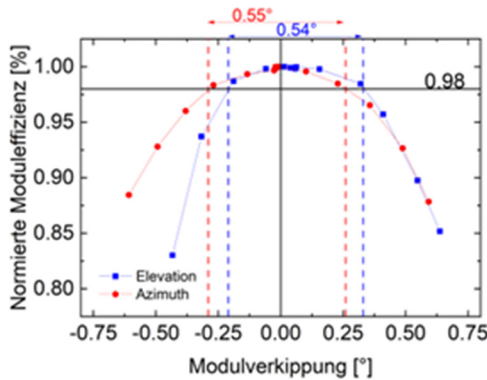
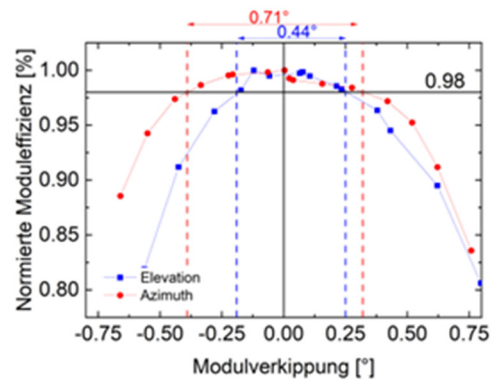
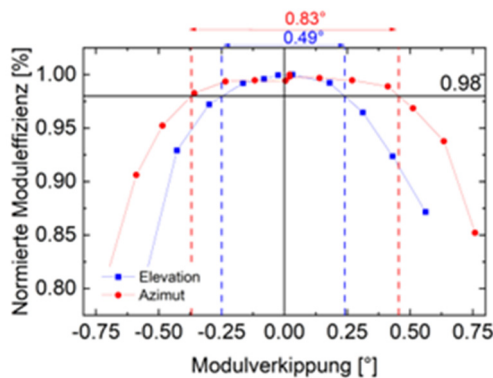
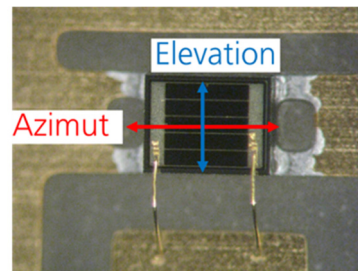
- Akzeptanzwinkelmessung

Eine wichtige Größe, um das Verhalten von CPV Modulen bei Fehlausrichtung zur Sonne zu beschreiben, ist der Akzeptanzwinkel. Fehlausrichtungen bei Betrieb im Feld können durch die Fehlausrichtung der gesamten Nachführeinheit verursacht werden, aber auch durch Schwankungen durch beispielsweise Windlasten entstehen. Ein hoher Akzeptanzwinkel ist daher für den Energieertrag sehr vorteilhaft bzw. erlaubt Kostenreduktion durch Reduktion der Anforderungen an die Nachführgenauigkeit.

Im Projekt wurden für Testmodule mit 3x3 Zellen und drei verschiedenen Zellgrößen (C1000: 585x585 μm^2 , C650: 726x726 μm^2 , C500: 827x827 μm^2) entsprechende experimentelle Akzeptanzwinkelmessungen durchgeführt.¹⁵ Für diese Messungen wurde die Nachführeinheit von der Idealposition abweichend gezielt in Azimut- und Elevations-Richtung verkippt und der Einfluss auf die Strom-Spannungs-Kennlinie gemessen. Die Verkipfung führt im Modul zu einer Veränderung des Brennflecks. Dabei ist zu beachten, dass die Geometrie im Modul sich hinsichtlich dieser Verkippsachsen unterscheidet: Wie in Abbildung 43(d) gezeigt geht eine Verkipfung in Azimut Richtung zu den neben der aktiven Zellfläche befindlichen 100 μm breiten Busbars.

Abbildung 43 zeigt den gemessenen Einfluss der Modulverkipfung auf den Wirkungsgrad der drei Testmodule: (a) C1000, (b) C650, (c) C500. Blaue und rote Daten stellen die Verkipfung in Elevation- und Azimut-Richtung dar. Als Akzeptanzbereich wurde hier der Winkel ausgewertet, bei dem die Modulleistung um 2%_{rel} abnimmt. In Elevationsrichtung betragen die Akzeptanzwinkel 0.27°/ 0.22°/ 0.25° für die Zelldesigns C1000/ C650/ C500, und liegen somit in derselben Größenordnung. In Azimut-Richtung nimmt der Akzeptanzbereich jedoch mit zunehmender Zellgröße zu, und beträgt für die Zelldesigns C1000/ C650/ C500 0.28°/ 0.36°/ 0.42°. Diese Zunahme deutet auf eine bessere Nutzung des im Fall einer Verkipfung verschobenen Brennflecks hin. Hier könnten Reflektionen am Metall der Busbars eine entscheidende Rolle spielen. Die konkreten Auswirkungen auf reale Testmodule sind allerdings komplex, da sich die Module in relevanter Art und Weise vom idealen Designfall unterscheiden, insbesondere in der Position und Ausrichtung der Komponenten POE, SOE und Solarzelle zueinander. Auf eine detailliertere Untersuchung wurde daher verzichtet.

¹⁵ Auch für mit dem am Ende des Projekts realisierten und charakterisierten Panel-Modul wurde eine Akzeptanzwinkelmessung durchgeführt, siehe letzter Abschnitt in AP6.

(a) ISE182: **C1000**, EQE 2(b) ISE181: **C650**, EQE 2(c) ISE175: **C500**, EQE 1

(d) Mikroskopaufnahme einer micro-CPV Zelle

Abbildung 43. (a) – (c): Akzeptanzwinkelmessung von drei Testmodulen mit einer 3x3 Solarzellenanordnung und unterschiedlich großen Solarzellen, gemessen am 04.05.2023 auf der Nachführeinheit des Fraunhofer ISE. Dargestellt sind normierte Modulwirkungsgrade in Abhängigkeit der Modulverkipfung in Elevation (blau) und Azimut (rot) Richtung. Der eingezeichnete Bereich entspricht einer 2%_{rel} Abnahme im Wirkungsgrad. (d) Mikroskopaufnahme einer micro-CPV Solarzelle. Die Pfeile veranschaulichen die Verkipprichtungen im Modul.

Micro-CPV Demonstratormodul

Zur Validierung und Demonstration der micro-CPV Technologie wurde ein Demonstratormodul bestehend aus 6x10 Zell-Linsen-Einheiten entwickelt. Dieses hat eine Aperturfläche von 205 cm² und gilt damit als Modul der „Submodul“-Klasse.

Es wurden zwei verschiedene Module von diesem Typ hergestellt: ISE183 „Demo_Eff“ und ISE189 „Demo_Tech“. Der Unterschied dieser Module besteht im Wesentlichen in den verwendeten Solarzellen und Kugellinsen. Das Modul ISE183 „Demo-Eff“ nutzt größere Solarzellen des Typs C500 sowie Kugellinsen mit ARC Beschichtung (1-2% verbesserte Transmission). Fertigungstoleranzen haben aufgrund der größeren Solarzellen hier also eine reduzierte Auswirkung. Das Modul ISE189 „Demo-Tech“ verwendet C1000 Zellen sowie Kugellinsen ohne ARC.

- Power Rating ISE183

Zur Bewertung der micro-CPV Module und zur Bestimmung eines kalibrierten Wirkungsgrades wurde mit dem Demonstratormodul ISE183 (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) ein Norm-gerechtes Power Rating nach IEC-62670-3 [4] nach Konzentrator-Standard-Testbedingungen (CSTC, engl. concentrator standard test condition) und nach Konzentrator-Standard-Betriebsbedingungen (CSOC, engl. concentrator standard operating conditions) durchgeführt. Die Bedingungen dabei sind wie folgt:

- CSTC: $DNI = 1000 \text{ W/m}^2$, Zelltemperatur $T_{cell} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, AM1.5d Spektrum
- CSOC: $DNI = 900 \text{ W/m}^2$, Umgebungstemperatur $T_{amb} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, AM1.5d Spektrum

Für das Power Rating werden die Temperaturkoeffizienten des Moduls benötigt. Diese werden mithilfe von thermischen Transientenmessungen (TTM) bestimmt. In Übereinstimmung mit den Anforderungen der Norm wurden insgesamt acht TTMs an zwei unterschiedlichen Tagen durchgeführt und folgende Temperaturkoeffizienten erzielt:

- Offene Klemmspannung $V_{oc}:\beta = -94 \pm 3 \text{ mV/K}$ (1σ)
- Kurzschlussstrom $I_{sc}:\alpha = 0 \pm 0 \text{ mA/(W/m}^2\text{)/K}$ (1σ)
- Effizienz: $\delta = -0.0587 \pm 0.0061 \text{ \%}_{abs}/\text{K}$ (1σ)

Nach einer umfangreichen Messkampagne wurde eine Filterung der Daten gemäß der Normbedingungen durchgeführt. Für den Zeitraum 14.04.2023 – 10.04.2024 wurden 304 I-V Kennlinien für die weitere Auswertung identifiziert. Für diese Messdaten ergibt sich für die CSOC-Bedingungen bei 20°C Außentemperatur eine berechnete mittlere Zelltemperatur von 70.5°C . Die mittleren Effizienzen betragen $36.0\% \pm 0.4\%$ (1σ) nach CSTC und $33.0\% \pm 0.4\%$ (1σ) nach CSOC.

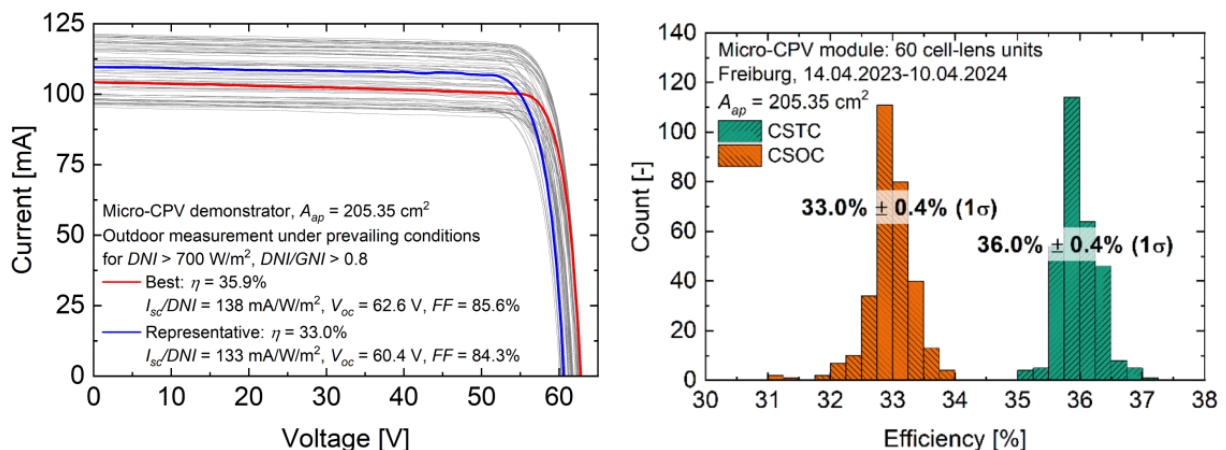


Abbildung 44: Links: Strom-Spannungs-Kurven des micro-CPV-Demonstratormoduls, gemessen in Freiburg, Deutschland, unter Messbedingungen, gefiltert nach $DNI > 700 \text{ W/m}^2$ und $DNI/GNI > 0.8$. Die blaue Kurve entspricht nahezu den CSOC-Bedingungen, und die rote Kurve markiert den höchsten im Betrieb gemessenen Wirkungsgrad. Rechts: Wirkungsgrade gemäß IEC-Norm aus dem durchgeführten Power Rating für CSTC (grün) und CSOC (orange) Bedingungen. Abbildungen aus [37]

Eine detailliertere Beschreibung der Ergebnisse wurde in folgendem Journalartikel veröffentlicht [37]:

- E. Kaiser, M. Wiesenfarth, M. Steiner, G. Siefer, P. Nitz, P. Schöttl, S. W. Glunz, H. Helmers, *Power Rating of a Novel Micro-CPV Module Concept and Operational Influences*, IEEE Journal of Photovoltaics, 15(3), p: 434-441, May 2025. DOI: [10.1109/JPHOTOV.2025.3547046](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2025.3547046)

- Vergleich Demonstratormodule „Demo_Eff“ und „Demo_Tech“

Zum Vergleich der beiden Demonstratormodule „Demo-Eff“ und „Demo-Tech“ wurden beide Module am Konzentratormodulmessplatz des Fraunhofer ISE vermessen (Labormessung, indoor). Es ist anzumerken, dass dieser Messplatz eine einzelne Xenon-Blitzlampe als Lichtquelle verwendet, und somit das Beleuchtungsspektrum weder an das Normspektrum AM1.5d noch an die spezifischen Solarzellen angepasst wurde. Da beiden Module jedoch den gleichen 5-fach Zelltyp verwenden ist ein direkter Vergleich dennoch aufschlussreich. Abbildung 45 zeigt die Strom-Spannungskennlinien von Demo-Tech ISE189 (gestrichelte Linie) und Demo-Eff ISE183 (durchgezogene Linie) bei zwei Einstrahlungsintensitäten 994 W/m² (rot) und 726 W/m² (schwarz). Bei einer Einstrahlungsintensität von 994 W/m² beträgt der Kurzschlussstrom I_{sc} 128.9 mA bzw. 126.4 mA bzw. für Demo-Eff bzw. Demo-Tech. Die relative Abweichung von 2%rel passt zu der durch ARC verbesserten Transmission der Kugellinsen des Demo-Eff Moduls. Es ist aber anzumerken, dass auch die Messunsicherheit in diesem Bereich liegt. Zudem sind die Auswirkungen von Fertigungstoleranzen auf einzelne Module schwer quantifizierbar. Die Daten können daher zunächst nur als Tendenz gewertet werden. Unter den gegebenen Messbedingungen (insb. unter dem Spektrum der Xenon Blitzlampe) ergeben sich Wirkungsgrade für Demo-Eff und Demo-Tech von 34.2% bzw. 33.6%, und liegen damit nur 0.6%abs auseinander. Im Rahmen der Messunsicherheit ist die Performance daher als gleichwertig zu bewerten. Für einen quantitativen Vergleich mit den CSTC Daten des Demo-Eff wäre auch für das Demo-Tech Modul ein vollständiges Power Rating erforderlich, was im Projekt nicht durchgeführt wurde. Abschließend ist festzuhalten, dass die Funktionalität auch für das Demo-Tech Modul demonstriert werden konnte.

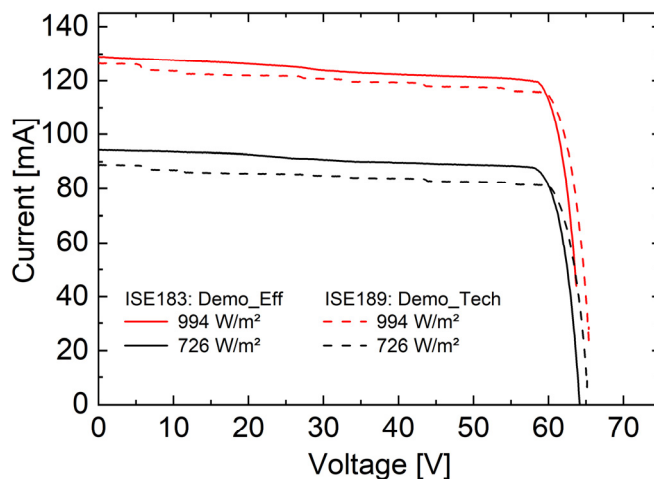


Abbildung 45. Gemessene Strom-Spannungskennlinien am Konzentratormodulmessplatz des Fraunhofer ISE der Module ISE183 „Demo-Eff“ (durchgezogene Linien) und ISE189 „Demo-Tech“ (gestrichelte Linien) bei zwei verschiedenen Einstrahlungsintensitäten.

- Langzeitstabilität über zwei Jahre

Das Demonstratormodul ISE183 (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) wurde ab dem 05.10.2022 auf der Nachführeinheit des Fraunhofer ISE vermessen. Zum Zeitpunkt der Auswertung für diesen Bericht waren Messdaten von über zwei Jahren verfügbar. In der folgenden Analyse wird die Stabilität der Modulleistung in diesem Zeitraum untersucht.

Um einen sinnvollen Vergleich der Messdaten unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen zu ermöglichen, wurden die Messdaten auf stabile Umgebungsbedingungen gefiltert, siehe Tabelle 3.

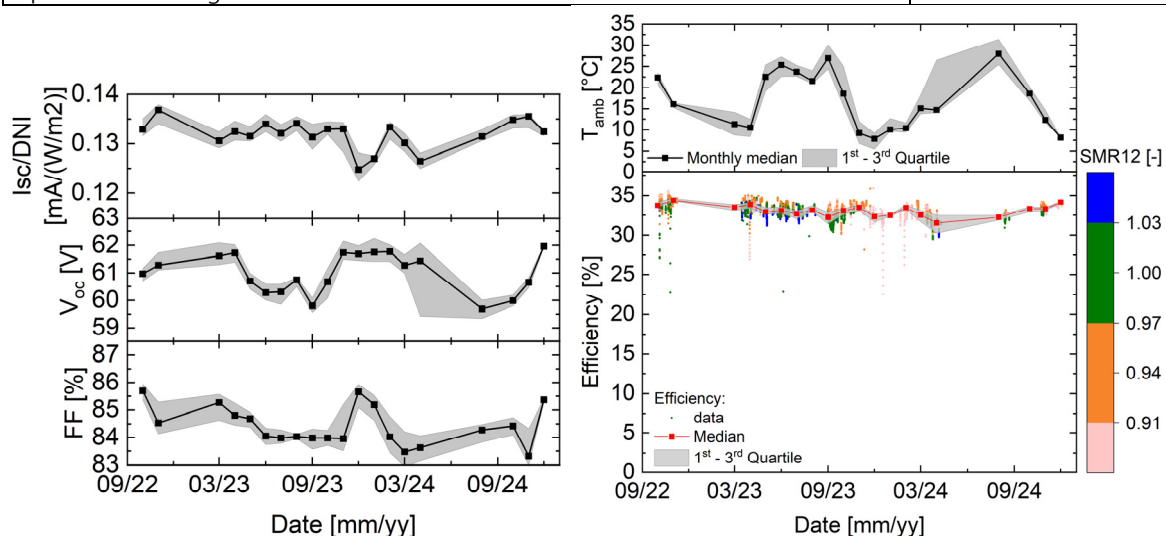
Abbildung 46 zeigt für den Zeitraum 05.10.2022 bis 03.12.2024 den zeitlichen Verlauf a) des Kurzschlussstroms normiert auf die Direkteinstrahlung I_{sc}/DNI , der offenen Klemmspannung V_{oc} , und des Füllfaktors FF und b) der Umgebungstemperatur T_{amb} und der Moduleffizienz. Dabei sind zur übersichtlichen Darstellung nicht die einzelnen Messpunkte aufgetragen, sondern es werden die monatlichen Medianwerte als Datenpunkte gezeigt. Grau hinterlegt ist zudem das erste bis dritte Quartil (25%-75% aller Datenpunkte) der jeweiligen Monatsdaten. Es ist anzumerken, dass zwischen dem 08.11.2022 und 15.03.2023 das Modul von der Nachführeinheit demontiert wurde und daher für diesen Zeitraum keine Messdaten vorliegen. Für den Zeitraum vom 12.04.2024 bis 13.08.2024 gibt es weniger Messdaten als im gleichen Zeitraum im Jahr zuvor, da die Nachführgenauigkeit hier beeinträchtigt war.

Folgende Erkenntnisse lassen sich aus den Daten ableiten:

- I_{sc}/DNI : Mit Ausnahme der Dezember und Januar Monate, liegt der Median zwischen $0.1265 \text{ mA}/(\text{W}/\text{m}^2)$ und $0.1368 \text{ mA}/(\text{W}/\text{m}^2)$, was einer Variation von $\pm 3.8\%$ entspricht. Im zeitlichen Verlauf ist kein klarer Trend erkennbar.
- V_{oc} : Der V_{oc} folgt, wie erwartet, gegenläufig dem Verlauf der Außentemperatur: Kalte Außentemperaturen führen zu kühleren Zelltemperaturen und erhöhen den V_{oc} und vice versa.
- FF : Maximal Werte werden in den Dezember und Januar Monaten erreicht. Dies deutet auf eine nicht optimale Stromanpassung der Teilzellen der Fünffachsolarzelle hin.
- Moduleffizienz: Im Median variiert die Effizienz über den gemessenen Zeitraum um $\pm 1.4\%$ abs. Es ist kein klarer zeitlicher Verlauf erkennbar. Das Modul ISE183 zeigt also in den ersten zwei Jahren unter Außenbedingung keine merkliche Degradation.

Tabelle 3. Filterkriterien für Langzeitmessungen.

Kriterium	Kriterium
Nachführgenauigkeit des Trackers α	$-0.2^\circ < \alpha < +0.2^\circ$
DNI Abweichung vor und nach einer I-V Kennlinie	$> -1\%$ und $< 1\%$
Spannung am Punkt maximaler Leistung / Offene Klemmspannung V_{MPP}/V_{oc}	> 0 und < 1.0
Strom am Punkt maximaler Leistung / Kurzschlussstrom I_{MPP}/I_{sc}	> 0 und < 1.0
Direkteinstrahlung DNI	$> 700 \text{ W}/\text{m}^2$
Direkteinstrahlung / Globalstrahlung DNI/GNI	> 0.8
Spectral matching ratio SMR_{12}	> 0.8 und < 1.1



a) Von oben nach unten: Monatliche statistische I_{sc}/DNI , V_{oc} und FF .

b) Oben: Umgebungstemperatur, Unten: Moduleffizienz, Farben veranschaulichen spectral matching ratio.

Abbildung 46. ISE183 Messdaten für den Zeitraum 05.10.2022 bis zum 03.12.2024. Die Messdaten wurden auf stabile Umgebungsbedingungen nach Tabelle 3 gefiltert. Die Messpunkte zeigen monatliche Medianwerte der gefilterten Daten, nach Anwendung von Filterung sind auf stabile Umgebungsbedingungen nach Tabelle 3 gefiltert.

Micro-CPV Panel-Prototypen Modul

Zum Ende des Projekts wurden die Fortschritte und Ergebnisse im Moduldesign, bei der Komponentenentwicklung, sowie der Entwicklung von Fertigungstechnologien und Prozessen zusammengebracht, um die Modultechnologie von den „Submodul“-Klasse Demonstratormodulen auf micro-CPV Module im Panel-Format zu skalieren. Wie für die bisherigen Module konnten auch für die Panel-Module von den Partnern bereit gestellte Komponenten verwendet werden, wie Solarzellen von Partner AZUR, Leiterbahnen auf Glas von EVYTRA, und Sekundäroptiken von SILI. Als Primäroptik wurden Linsenplatten der Firma ORAFOL beschafft.

Im Projekt wurden die Prozesse für die Herstellung von Panelmodulen entwickelt und sind mit Projektabschluss somit prototypisch am Fraunhofer ISE vorhanden. Mit der im Projekt beschafften Anlage der Firma Essemtec wurde Lot auf Panel-formatige Bodenplatten gejetet und anschließend mit Solarzellen und Dioden bestückt. Mit einer H&K Anlage wurden alle Zellen und Dioden dünn Drahtgebondet. Die hergestellten Panel-Bodenplatten wurden auf Funktionalität geprüft mithilfe von Elektrolumineszenz- und Dunkel-I-V Messungen.

Erste Panelmodule wurden hergestellt. In diesem Bericht werden Außenmessdaten des Panel-Moduls ISE201 vorgestellt. Für eine normgerechte Leistungsbestimmung, wie für das Demonstratormodul ISE183 durchgeführt (siehe oben: Power Rating ISE183), standen zum Berichtszeitpunkt keine ausreichenden Außenmessdaten zur Verfügung. Um dennoch eine erste Bewertung zu ermöglichen, werden die Messdaten mit denen des gleichzeitig gemessenen kleineren Testmoduls ISE185 verglichen. Dieses hat mit 9 Solarzellen-Linseneinheiten weniger Solarzellen als das Panel-Modul. Beide Module verwenden den gleichen Zelltyp (5-fach Solarzellstruktur, EQE1, Design C1000). In dem Panel-Modul ISE201 wurden Solarzellen mit etwas größeren Busbars verwendet, vergleiche Abbildung 15. Daher beträgt die rechnerische geometrische Konzentration hier 1046 und ist gegenüber dem ISE185 Module mit $C=1000$ leicht erhöht; gleichzeitig ist die Dunkelfläche etwas größer. Ein weiterer für den direkten Vergleich beider Module relevanter Unterschied liegt im Format und verwendeten Design der Leiterbahn. Das Modul ISE185 weist eine beinahe vollständige Metallisierung der Leiterplatte auf („Vollkreis“-Design, siehe AP4), wohingegen die gefertigten Panel-Module eine reduzierte Metallisierung aufweisen (Design „optimiert“, vergleiche auch **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Dies hat Auswirkungen auf die Wärmespreizung unterhalb der Solarzelle und damit auf die Temperatur der Solarzellen im Betrieb [22]. Zudem weist das ISE185 aufgrund des kleineren Formats ein um etwa eine halbe Größenordnung höheres Rand-zu-Fläche Verhältnis auf, was hinsichtlich der Wärmeabfuhr über den Metallrahmen an die Umgebung vorteilhaft ist.

In Tabelle 4 sind die Eigenschaften und Parameter beider Module gegenübergestellt. Abbildung 47 zeigt ein Foto der gefertigten Panel-Module montiert auf dem Außenmessplatz.

Tabelle 4. Vergleich Panel-Modul ISE201 und Modul für die Side-by-Side-Messung ISE185 (c_{geo} ist die geometrische Konzentration bezogen auf die aktive Solarzellenfläche).

Name	Zelle	c_{geo}	Array	A_{ap} [cm ²]	EQE	SOE	Silikon	Leiterbahn- design
ISE185 (Testmodul)	5j C1000	1000	3x3=9	30.8	1	Typ P, ohne ARC	Silikon 1	Vollkreis
ISE201 (Panel- Modul)	5j C1000	1046	22x30=660	2258.9	1	Typ P, ohne ARC	Silikon 1	Optimiert

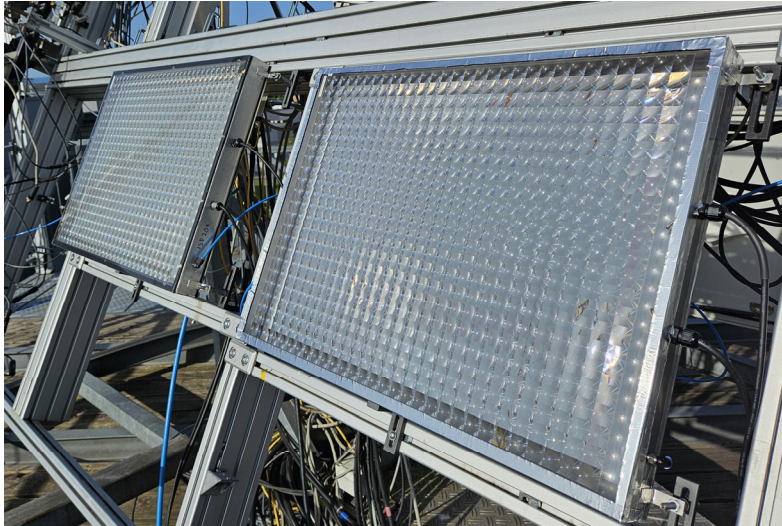


Abbildung 47. Erste Panelmodule auf der Nachführeinheit des CPV-Außenmesstands des Fraunhofer ISE (links ISE201 und rechts ISE202).

Abbildung 48 zeigt einen Vergleich der elektrischen Kenndaten der Module ISE201 und ISE185. Oben dargestellt sind der Einstrahlungs-korrigierte Kurzschlussstrom I_{sc}/DNI geteilt durch die Anzahl parallel geschalteter Zellen, sowie die offene Klemmenspannung V_{oc} geteilt durch die Anzahl seriell verschalteter Zellen. Die Division durch die Anzahl parallel bzw. seriell verschalteter Zellen erlaubt die Betrachtung der (durchschnittlichen) Strom und Spannungsdaten einer einzelnen Zelle im verschalteten Modul. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich der Module trotz unterschiedlicher Zellanzahl und Verschaltung. Unten in Abbildung 48 sind der Füllfaktor FF und der Wirkungsgrad gezeigt. Alle vier Graphen sind aufgetragen über dem $SMR12$ -Wert (engl. spectral matching ratio). $SMR12$ repräsentiert dabei die spektralen Bedingungen zum Messzeitpunkt. Der Index benennt den Vergleich verschiedener spektraler Bänder, hier mit 12 der Vergleich der oberen mit der folgenden zweiten Teilzelle. Ein Wert von 1 entspricht dem Normspektrum AM1.5d, Werte darüber bzw. darunter entsprechen ins Blaue bzw. ins Rote verschobenen vorherrschenden spektralen Bedingungen.

Die Auftragung des normierten Kurzschlussstroms (Graph oben links) zeigt einen typischen Verlauf („rooftop function“). Neben dem klar erkennbaren Maximum fällt der Strom mit zu- bzw. abnehmendem $SMR12$ -Wert linear ab. Die Steigung ist dabei für beide Module nahezu gleich, wie erwartet aufgrund des gleichen Zelltyps. Das Maximum wird aber bei einem geringeren $SMR12$ -Wert von etwa 0.9 erreicht. Das Maximum des ISE185 stimmt in etwa mit dem für das ISE183 Demonstratormodul (mit derselben 5fach-Solarzellstruktur) bestimmten Wert überein, vergleiche [37]. Die bei dem Panel-Modul ISE201 vorliegende spektrale Verschiebung ist ein Indiz für Einflüsse chromatischer Aberration durch die Linse und deutet darauf hin, dass die Modulhöhe hier nicht optimal zur verwendeten POE Linsenplatte passt. Darüber hinaus fällt der Wert im Maximum des Panel-Modul 1.4%_{rel} geringer aus. Dies kann zudem auf eine leichte Beeinträchtigung der optischen Güte der POE Linsen und/oder der SOE-Kugellinsen hindeuten. Andererseits kann dies auch durch Fertigungsungenauigkeiten begründet sein, insb. bei den einzelnen Positionen von Kugellinsen und Solarzellen auf der Bodenplatte. Zu beachten ist dabei jedoch, dass aufgrund der im Modul verschalteten Bypassdioden bei Kurzschlussbedingungen nur die „beste“ Reihe der Verschaltungsmatrix im Modul sichtbar wird, also die Reihe der parallel verschalteten Zellen, die den höchsten summierten Strom erzeugt.

Die normierte offene Klemmenspannung (Graph oben rechts) zeigt für beide Module höhere Werte für eher rote Spektren und einen Abfall mit zunehmendem $SMR12$, was durch eine Kombination von Umgebungstemperatur, Einstrahlungsintensität und Stromfehlanpassung verursacht wird. Der Verlauf ist

für beide Module annähernd gleich, die durchschnittliche offene Klemmenspannung ist für die Zellen des Panel-Moduls ISE201 im Vergleich zum Modul ISE185 um etwa 3%_{rel} reduziert. Diese Spannungsverluste im Betrieb deuten auf eine erhöhte Zelltemperatur hin. Dies wird qualitativ aufgrund der oben genannten Unterschiede im Moduldesign auch erwartet. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass diese ersten Messungen des Panel-Moduls bei beinahe Windstille durchgeführt wurden, so dass hier aufgrund der unterbundenen erzwungenen Konvektion thermisch erschwerte Bedingungen vorlagen. Unter der Annahme, dass der Spannungsverlust bei ansonsten identischen Parametern rein durch einen Temperaturunterschied hervorgerufen würde, lässt sich letzterer auf etwa 18 K abschätzen. Eine weitere Ursache für die beobachtete im Vergleich reduzierte Spannung könnten Teil-Kurzschlüsse (genauer: reduzierter Parallelwiderstand einzelner Zellen) sein. Betrachtet wird hier die auf die in Serie geschaltete Anzahl von Zellen normierte, durchschnittliche Spannung über das Gesamte Modul. Eine Beeinträchtigung einzelner Zellen im Panel-Modul würde sich hier daher als leichte Reduktion bemerkbar machen.

Bei der Betrachtung der Messdaten des Füllfaktors (Graph unten links) fallen folgende Punkte auf. Analog zum Verhalten im Strom zeigen beide Module ein klar erkennbares Minimum, mit geringerer Ausprägung für das Panel-Modul. Qualitativ entspricht dieses Verhalten der Erwartung; die Stromfehlانpassung in einer Mehrfachzellstruktur bei Variation des Spektrums führt zu einem Anstieg des Füllfaktors. Das Minimum wird bei der besten Stromanpassung der Teilzellen erreicht, d.h. beim Maximum des normierten Stroms im Graph oben links. Quantitativ ist der Füllfaktor des Panel-Moduls im Minimum beinahe 5%_{abs} reduziert. Eine interessante Betrachtung zeigt die Zerlegung der empirischen Größe Füllfaktor in ihre Strom- und Spannungsanteile, $FF_I = I_{mp}/I_{sc}$ und $FF_V = V_{mp}/V_{oc}$ ($FF = FF_I * FF_V$). Beide Füllfaktoranteile sind für das Panel-Modul im Vergleich zum Referenzmodul reduziert. Das Referenzmodul ISE185 zeigt für beide Anteile ein Minimum im Punkt der Stromanpassung. Für das Panel-Modul ISE201 ist dies nicht der Fall. Hier ist ein Minimum nur im Spannungsanteil erkennbar, und weniger ausgeprägt als im Referenzmodul. Im Stromanteil des Füllfaktors wird über den gesamten Messbereich ein nahezu konstanter Wert gemessen. Das bedeutet, dass die spektralen Einflüsse auf den Strom im Punkt maximaler Leistung denen unter Kurzschlussbedingungen entsprechend. Es ist anzumerken, dass sich Unterschiede im erzeugten Strom einzelner Zell-Linsen-Einheiten im größeren Panel-Modul in dieser Darstellung nicht aufgelöst werden können, da nur effektive Mittelwerte betrachtet werden aufgrund der Normierung auf die Anzahl parallel verschalteter Zellen. Die Unterschiede von Zelle zu Zellen führen somit für das Panel-Modul zu einer Reduktion des Stromanteils im Füllfaktor, I_{mp}/I_{sc} , um 1-3%_{abs}. Auch im Spannungsanteil des Füllfaktor wird im Panel-Modul eine Reduktion um etwa 2-5%_{abs} beobachtet. Dies deutet möglicherweise auch auf einzelne im Panel-Modul defekte Zellen (mögliche während der Montage verursachte Kurzschlüsse) hin. Eine abschließende Analyse konnte im Rahmen des Projekts nicht mehr durchgeführt werden.

Der Wirkungsgrad (Graph unten rechts) des Panel-Moduls ISE201 liegt im direkten Messvergleich zum ISE185 Testmodul bei den vorliegenden Bedingungen um etwa 10%_{rel} niedriger. Dies ist auf die zuvor beschriebenen Verluste in der Spannung aufgrund höherer Zelltemperatur, geringeren Stroms aufgrund optischer Verluste und möglicherweise sub-optimaler Modulhöhe sowie den niedrigeren Füllfaktor zurückzuführen. Im Maximum wurde für das Panelmodul ISE201 ein Wirkungsgrad von 31.4% unter den vorliegenden Betriebsbedingungen bei einem SMR12-Wert von 0.90 gemessen.

Dieses Modul stellt das erste Panel-Modul im micro-CPV-Design dar. Bei dessen Fertigung wurden viele neue Prozesse für die Bestückung der Komponenten, insbesondere bei der Bestückung der Bodenplatte mit Kugellinsen, und die Modulausrichtung erstmalig eingesetzt und zusammengebracht. Für zukünftige Panel-Module sind Verbesserungen erwartbar, durch weitere Anwendung und Erfahrungsgewinne hinsichtlich der Fertigungsgenauigkeiten und des Zusammenspiels der Prozesse. Daher ist anzunehmen, dass zukünftige Panel-Module die hier beobachteten Einbußen in der Leistung überwinden werden. Ein Baustein dafür wird auch das detaillierte Verständnis der vorliegenden Modulperformance sein. Für eine umfassende quantitative Analyse der Messergebnisse sollten daher weitere Untersuchungen und ein detaillierter Abgleich mit modellgestützten Erwartungen durchgeführt werden.

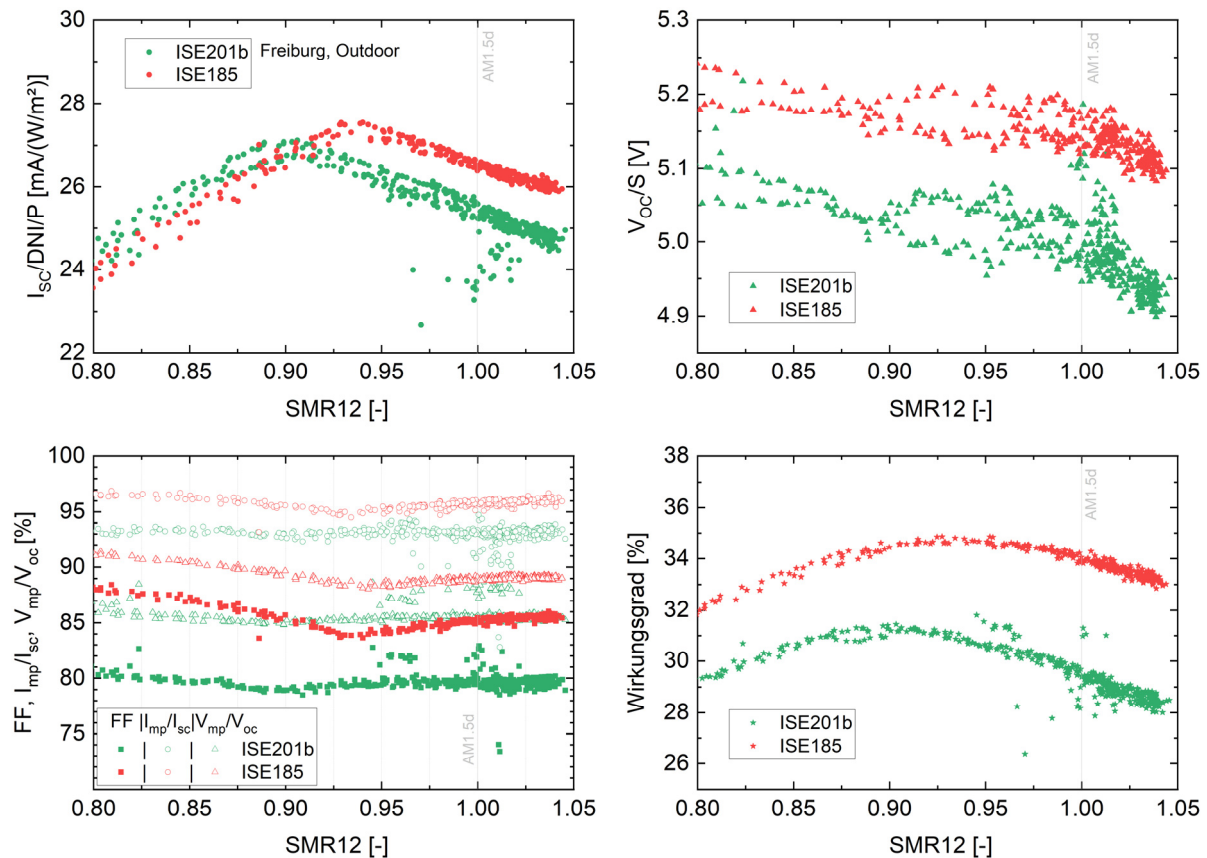


Abbildung 48. Ergebnisse der parallelen Vermessung des Panel-Moduls ISE201b und des kleineren Testmoduls ISE185 als Referenz. Dargestellt sind die Parameter der gemessenen Strom-Spannungs-Kennlinien. Gezeigt ist für beide Module die Variation über einen Tag, gemessen am selben Tag am Außenteststand des Fraunhofer ISE in Freiburg. Um eine Vergleichbarkeit herzustellen, ist der Kurzschlussstrom I_{sc} normiert auf die eingestrahltene Direktstrahlung DNI und die Anzahl parallel verschalteter Zellen P (Kreise), die offene Klemmenspannung V_{oc} normiert auf die Anzahl seriell verschalteter Zellen S (Dreiecke). Beide Größen sind daher als durchschnittliche Zellwerte zu verstehen. Zudem sind Füllfaktor FF (Quadrat) sowie die Strom- und Spannungsbeiträge zum Füllfaktor (I_{mp}/I_{sc} und V_{mp}/V_{oc} , offene Kreise und Dreiecke) gezeigt. Der vierte Graph zeigt den Wirkungsgrad (Stern-Symbole), bezogen auf die Aperturfläche der Primärlinsen. Alle Größen sind aufgetragen gegenüber dem Spektralparameter $SMR12$, der morgens bei kleinen Werten startet (rot verschobenes Spektrum), dann zu größeren Werten ansteigt und abends wieder abnimmt.

- Akzeptanzwinkelmessung Panel-Modul ISE201

Neben dem Wirkungsgrad ist auch der Akzeptanzwinkel ein wichtiger Faktor für das Modul. Er beschreibt den Leistungsabfall des Moduls bei Fehlausrichtung zur Sonne. Diese können im Feld durch Fehlausrichtung der Nachführeinheit aber auch durch Schwankungen durch beispielsweise Windlasten entstehen und damit ist ein hoher Akzeptanzwinkel vorteilhaft für einen hohen Energieertrag oder Kostenreduktion durch Reduktion der Anforderungen an die Nachführgenauigkeit.

In Abbildung 49 ist das Ergebnis der Akzeptanzwinkelmessung für das Modul ISE201 gezeigt. Der Akzeptanzwinkel des ISE201 bezogen auf 90% der Effizienz beträgt $\pm 0.45^\circ$. Dies stimmt in etwa mit dem an dem C1000 Testmodul gemessenen Wert überein, vergleiche Abbildung 43).

Der Akzeptanzwinkel für den idealen Designfall beträgt, gemäß der optischen Modellierung, $\pm 0.7^\circ$ [24]. Geringere Werte ergeben sich allerdings unter der Berücksichtigung von Fertigungstoleranzen. Mit dem Toleranzmodell aus AP1 und den dort angenommenen Toleranzverteilungen (die im Einzelnen nicht exakt mit dem schließlich gefertigten Panel-Modul ISE201 übereinstimmen), wurden Akzeptanzwinkel von 0.64°

bzw. 0.42° (jeweils 50te Perzentil-Werte) für 30p23s bzw. 1p690s Verschaltungen berechnet. Anzumerken ist, dass die tatsächliche 6p22s,5pp,1ss Verschaltung ähnlich aber nicht identisch mit der modellierten 30p23s Verschaltung ist; die Unterschiede wurden im Modell aber nicht abgebildet. Der geringere gemessene Akzeptanzwinkel des Panel-Moduls wird auf den Einfluss von vorliegenden Toleranzen zurückgeführt. Insbesondere im verkippten Fall wirken sich erhöhte Fertigungstoleranzen verstärkt auf die Modulleistung aus. Den stärksten Einfluss (bezogen auf den Einfluss absolut in μm -Werten zunehmender Standardabweichungen bei normalverteilten Größen) haben dabei Positionsabweichungen von Solarzelle und Kugellinse, gefolgt von der Formtreue der Kugellinse, einer Verschiebung der Primärlinsen, Abweichungen im Durchmesser der Kugeln und schließlich der Distanz zwischen Primäroptik und Bodenplatte [25]. So führen beispielsweise bezogen auf den modellierten Toleranzfall bereits Positionsabweichungen von Zellen, Kugellinsen, bzw. Primäroptiken mit Standardabweichungen von $19\text{ }\mu\text{m}$, $44\text{ }\mu\text{m}$, und $32\text{ }\mu\text{m}$ bei einer Modulverkipfung um 0.5° zu relativen Leistungsverlusten, bezogen auf den modellierten Toleranzfall bei idealer Modulausrichtung zur Sonne (0°), von jeweils $5\%_{\text{rel}}$.

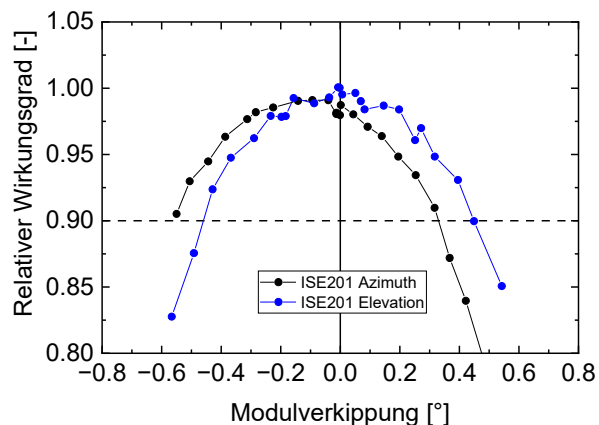


Abbildung 49. Akzeptanzwinkelmessung des Panel-Moduls ISE201. Die Schwankungen zwischen den Messpunkten resultieren aus der Messunsicherheit und schwankenden Umgebungsbedingungen. Der Akzeptanzwinkel, bezogen auf einen relativen Leistungsverlust von 10%, beträgt etwa $\pm 0.45^\circ$.

Abschließend ist festzuhalten, dass im Rahmen des Projekts micro-CPV Panel-Module erfolgreich hergestellt wurden. Erste Outdoor-Messungen zeigen Wirkungsgrade bis 31.4% unter Betriebsbedingungen. Hier ist anzumerken, dass ein direkter Vergleich mit den gemäß IEC Norm ermittelten CSTC und CSOC Wirkungsgraden des kleineren 6x10 Demonstratormoduls noch nicht bewertbar ist. Hier sind weitere Messdaten einer längeren Messkampagne bei unterschiedlichen Bedingungen erforderlich. Der gemessene Akzeptanzwinkel des Panel-Moduls (bezogen auf 90% der Leistung) beträgt $\pm 0.45^\circ$.

- Konzeptentwicklung Massenfertigung

Für die Evaluierung des massenfertigungstauglichen Herstellungsprozesses wurde mit Planern von Linien und Anlagenherstellern diskutiert, deren Kosten und Durchsatzzeiten in die Kostenstudie einfließen (siehe AP1).

2.2 Notwendigkeit der Arbeit

Im Verbundprojekt „micro-CPV“ wurde ein neuartiges CPV-Modulkonzept entwickelt, das geringere Herstellungskosten verspricht und somit die Wettbewerbsfähigkeit der CPV-Technologie steigert. Diese verspricht mit höchsten Wirkungsgraden und niedrigsten Energierücklaufzeiten aller Photovoltaik-Technologien, sowie effizientem Ressourceneinsatz große Vorteile gegenüber Stand-der-Technik Solar-technologien. Das Fraunhofer ISE ist bei der Entwicklung innovativer Technologien auf externe Förderung angewiesen. Im Projekt micro-CPV wurde das neue Modulkonzept entwickelt, modelliert, umgesetzt und erstmalig demonstriert. Die dafür erforderlichen Technologien und Prozesse, sowie Komponenten wurden entweder neu entwickelt oder in innovativer Art und Weise aus anderen Anwendungen und Industrien entlehnt und an die neuen Anforderungen angepasst. Diese Entwicklungen gehen mit einem hohen technologischen und wirtschaftlichen Risiko einher. Daher war eine Förderung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Fraunhofer ISE nötig und in dieser Höhe angemessen. Alle Projektarbeiten waren notwendig, um den geplanten Ablauf des Projekts umzusetzen und die Projektziele zu erreichen. Die Aufwände waren stets zielorientiert und in ihrem Aufwand angemessen.

2.3 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Projekts „micro-CPV“ zeigen ein hohes Potenzial für wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertbarkeit. Die Technologie wurde vom reinen Konzept bis hin zu ersten Demonstratormodulen entwickelt. Ein experimenteller Proof-of-Concept wurde erfolgreich mit einem Submodul auf Basis von industriell verfügbaren Komponenten erbracht, welches einen exzellenten Wirkungsgrad von 36,0 % (CSTC) aufweist. Diese Leistung ist ein bedeutender Fortschritt in der Entwicklung der CPV-Technologie und unterstreicht die Möglichkeiten der Technologie für die kommerzielle Verwertung. Es handelt sich hierbei um die effizienteste Lösung zur Umwandlung von Sonnenenergie in elektrische Energie mit besonders hohem Marktpotential in sonnenreichen Ländern mit hoher Direktstrahlung. Im Projekt wurde zudem die Skalierung der Modultechnologie auf das Panel-Format (61.0x45.7 cm²) demonstriert, als weiterem Schritt in Richtung der Anwendbarkeit für großflächige Solarprojekte.

Im Verlauf des Projekts wurden neue Prozesse entwickelt, darunter die Bodenplattenentwicklung mit Leiterplattendesign für die Chip-on-Board-Technologie, der Einsatz von hocheffizienten 5-fach Solarzellen und deren Bestückung mittels parallelisierter Selbstausrichtung, sowie die parallelisierte Bestückung mit Kugellinsen. Bei Gewährleistung hoher Wirkungsgrade ermöglichen diese innovativen Methoden eine effektive Fertigungstechnologie und senken die Produktionskosten erheblich. Umfangreiche Simulationen in den Bereichen Optik, Thermik und Elektrik unterstützen die Validierung und Optimierung der Modultechnologie und gewährleisten, dass die entwickelten Systeme unter realen Bedingungen optimal funktionieren.

Aktuell wird eine Ausgründung der Firma „Clearsun Energy“ vorbereitet, welche die kommerzielle Verwertung der micro-CPV Technologie weiter vorantreiben soll. Ziel ist es in 2025 eine Pilotfertigung von größeren micro-CPV-Modulen und Zellen in Deutschland aufzubauen und die Technologie dann schrittweise für Demonstrationsprojekte verfügbar zu machen. Sehr gute Marktchancen sehen wir im Bereich solarer Kraftwerke in sonnenreichen Ländern sowie in der Agriphotovoltaik. Letztere profitiert davon, dass die CPV-Module das diffuse Licht transmittieren und damit zum besseren Pflanzenwachstum beitragen. Bis 2030 könnten erste Fabriken mit Produktionskapazitäten im Gigawatt Maßstab entstehen und zu entsprechend neuen Arbeitsplätzen und Wertschöpfung bei den Industriepartnern in Deutschland führen.

Das Fraunhofer ISE würde zudem durch Lizenzeinnahmen und weitere Forschung und Entwicklung von der Kommerzialisierung der micro-CPV Technologie profitieren. Aktuell findet eine Weiterentwicklung im Rahmen eines Projekt mit der Werner Siemens-Stiftung statt.

Im Rahmen des micro-CPV Projekts wurde ein Patent angemeldet, und es gibt zahlreiche Publikationen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften sowie auf Konferenzen, die die Relevanz der Forschung in der wissenschaftlichen Community belegen. Eingeladene Vorträge und Auszeichnungen unterstreichen die Bedeutung der erzielten Ergebnisse und fördern das Interesse an der micro-CPV Technologie in der Fachwelt. Das Projekt hat zudem die Zusammenarbeit zwischen den relevanten industriellen Vertretern der CPV-Technologie sowie Zulieferkette in Deutschland gestärkt und damit die Grundlage für eine erfolgreiche Markteinführung gelegt.

Neben der geplanten terrestrischen Verwertung der micro-CPV Technologie bieten sich Möglichkeiten für die Anwendung im Weltraum, insbesondere für Missionen zu den sonnenferneren Planeten Mars und Jupiter. Aufgrund der dort vorherrschenden geringeren Sonnenintensität bietet die Konzentration des Lichts Vorteile. Darüber hinaus bestehen auch Aussichten auf eine Verwertbarkeit der entwickelten Technologien und Prozesse in anderen Branchen. So lassen sich Fortschritte bei der Leiterplatten-technologie oder Bekugelung auch auf Anwendungen im Mikroelektronikbereich übertragen.

Insgesamt bietet das Projekt „micro-CPV“ hervorragende Perspektiven für die wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertung der Ergebnisse. Die Kombination aus innovativen Technologien, starken Partnerschaften und einem klaren Plan zur Kommerzialisierung positioniert die micro-CPV Technologie als vielversprechende Lösung im Bereich der erneuerbaren Energien. Die Innovationen dieser Technologie haben das Potential diese zu einer tragenden Säule zukünftiger Solarstromerzeugung zu machen. Damit tragen diese Entwicklungen nicht nur zur Erreichung der globalen Klimaziele bei, sondern fördern auch die Schaffung von Arbeitsplätzen in der Region und stärken die Innovationskraft des Hightech-Standorts Deutschland.

2.4 Relevante Ergebnisse von dritter Seite

Bezüglich micro-CPV:

Auch andere Forschungsgruppen im internationalen Umfeld arbeiten auf dem Gebiet der micro-CPV Technologie. Während der Projektlaufzeit wurden interessante Dissertationen und Artikel in Fachjournalen veröffentlicht:

[38] Victor Vareilles (2024),
Highly integrated photovoltaic micro-concentrator for space applications.
These de Doctorat, Institut national des sciences appliquées (INSA)/Univ. Lyon,
<https://theses.hal.science/tel-04752155v1>.

→ Dissertation. Entwicklung eines micro-CPV Systems für die Weltraumanwendung. Kooperation und gemeinsame Publikation zur Montage von Micro-Solarzellen und Selbstausrichtung.

[39] Norman Jost (2022).
Development of micro-concentrator concepts and technologies enabling mass production of high efficiency photovoltaic modules.

Thesis (Doctoral), E.T.S.I. Telecomunicación (Universidad Politécnica de Madrid).
<https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.71694>

→ Dissertation der Univ. Madrid zum Thema micro-CPV. Übersicht über die Technologie und technologische Ansätze. Entwicklung im Bereich Konzentratoroptik und Verschaltung von Micro-Solarzellen mittels additiver Fertigungstechnik.

[40] Norman Jost, Steve Askins, Richard Dixon, Mathieu Ackermann, Cesar Dominguez, Ignacio Anton,
Array of micro multijunction solar cells interconnected by conductive inks,
Solar Energy Materials and Solar Cells, 240, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111693>.

→ Entwicklung der Univ. Madrid zu gedruckter Verschaltungstechnik für Micro-Solarzellen auf Glassubstrat.

[41] Alejandra Jacobo-Martín, Norman Jost, Jaime J. Hernández, César Domínguez, Guido Vallerotto, Steve Askins, Ignacio Antón, Isabel Rodríguez, *Roll-to-roll nanoimprint lithography of high efficiency Fresnel lenses for micro-concentrator photovoltaics*, Opt. Express, 29, 2021. <https://doi.org/10.1364/OE.437803>
 → Studie der Univ. Madrid zu perspektivisch kostengünstiger Fertigungstechnik für Fresnel-Linsen auf Basis von Nanoimprint-Lithographie.

[42] Corentin Jouanneau, Thomas Bidaud, Paul Ferreol, Benjamin Breton, Gwenaelle Hamon, Maxime Darnon, *Fabrication and characterization of high performance sub-millimetric InGaP/InGaAs/Ge solar cells*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 282, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113320>
 → Entwicklung der Univ. Sherbrooke in Kanada von 3-fach GaInP/GaInAs/Ge Micro-Solarzellen. Vereinzelung von 0.5×0.5 mm² und 0.1×0.1 mm² abmessenden Zellen mittels Plasmaätzen. Analyse der Perimeter-Rekombination.

[43] M. Darnon, M. de Lafontaine, M. Volatier, S. Fafard, R. Arès, A. Jaouad, V. Aimez, *Deep germanium etching using time multiplexed plasma etching*, J. Vac. Sci. Technol. B, 33, 2015. <https://doi.org/10.1116/1.4936112>
 → Entwicklung der Univ. Sherbrooke in Kanada von Plasma-Ätzprozessen zur Vereinzelung von Ge-basierten Solarzellen. Mögliche Alternative zu Säge- oder Laser-basierten Trennverfahren, allerdings typischerweise zeitaufwändiger Einzelwaferprozess.

[44] Grede, Alex J (2022). *Microscale Concentrated Photovoltaics and Soft Matter Lasers*. PhD thesis, The Pennsylvania State University. ProQuest Dissertations & Theses: <https://www.proquest.com/openview/edea17e299c8f1c700a40c3bac9913b0/> / <https://etda.libraries.psu.edu/catalog/24693ajg324>
 → Dissertation zu u.a. einem micro-CPV System für Weltraumanwendung

Bezüglich CPV Technologie allgemein:

Während der Projektlaufzeit wurden neue CPV-Projekte entwickelt und installiert. Zum Beispiel installierte die australische Firma RayGen ein 4 MW Kraftwerk [45]. Mit dem CPV-Turmkraftwerk und thermischem Speicher mit Organic-Rankine-Cycle (ORC) kann netzunabhängig Strom generiert werden. Außerdem installierte die portugiesischen Firma Fusion Fuel Anlagen zur direkten Wasserstoffherzeugung mit Hilfe von CPV-Modulen.

Forschungs- und Entwicklungsprojekt „50PROZENT“ (BMWK, Fkz. 03EE1060): Entwicklung am Fraunhofer ISE einer Vier- bzw. Sechsfachsolarzelle. Im Jahr 2022 konnte mit einer Vierfachsolarzelle ein neuer Wirkungsgradrekord von 47.6 % bei einer Konzentration von erzielt werden.

Forschungs- und Entwicklungsprojekt „QuintuMod“ (BMWK, Fkz. 0324152): Projekt unter Leitung von Partner AZUR. Insbesondere die Fortschritte bei der Energieertragsmodellierung können auch auf die micro-CPV Technologie übertragen werden.

CPV Agri-PV: In der Agri-Photovoltaik wird die Fläche unter den Modulen landwirtschaftlich genutzt. Dadurch sinkt der Flächenbedarf und die Pflanzen unterhalb der Module sind vor Starkregen und Hagel geschützt. Die Kombination von Agri-PV und Konzentratorphotovoltaik hat große Synergien, da für beide Technologien die Module auf Nachführeinheiten montiert werden. Zudem sind CPV Module transluzent für das Diffuslicht, was im Vergleich mit konventionellen lichtundurchlässigen PV Modultechnologien von Vorteil für das Pflanzenwachstum ist. So kann zusätzlicher Aufwand reduziert und gleichzeitig der Ertrag beider Technologien erhöht werden. Eine Übersicht wird beispielsweise hier gegeben [46]:

Shiva Gorjian, Farid Jalili Jamshidian, Alireza Gorjian, Hamideh Faridi, Mohammad Vafaei, Fangxin Zhang, Wen Liu, Pietro Elia Campana,

Technological advancements and research prospects of innovative concentrating agrivoltaics, Applied Energy, Volume 337, 2023, 120799. DOI: [10.1016/j.apenergy.2023.120799](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120799).

2.5 Schutzrechte und Veröffentlichungen

Schutzrechte

- H. Helmers (ISE), M. Voitel (TUB), S. Mehrafsun (Wagenbrett), Verfahren und Vorrichtung zum Anordnen von optischen Elementen an ein Substrat mit einer Mehrzahl von optoelektronischen Bauelementen. Patent DE102022117495 A1, Anmeldung: Jul 13, 2022; erteilt: Apr 16, 2025.

Wissenschaftliche Veröffentlichungen¹⁶

2021:

- M. Wiesenfarth, M. Steiner, H. Helmers, A.W. Bett, *Voltage losses due to the perimeter and dark area in micro-concentrator solar cells*, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021. 219: 110791. DOI: [10.1016/j.solmat.2020.110791](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110791)
- Maïke Wiesenfarth, Juan F. Martinez, Marc Steiner, Dimitre Iankov, Peter Nitz, Frank Dimroth, Henning Helmers, *Technical Boundaries of Micro-CPV Module Components: How Small Is Enough?*, in: Proceedings of the 17th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-17), 2021. Virtual conference hosted in Freiburg, Germany. AIP 2550, 030008. DOI: [10.1063/5.0099878](https://doi.org/10.1063/5.0099878)

2022:

- Elisa Kaiser, Peter Schöttl, Maïke Wiesenfarth, Peter Nitz, Henning Helmers, *Effects of Manufacturing Tolerances on Micro-CPV Module Performance*, in: Proceedings of the 18th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-18), 2022. Young Scientist Award. Hybrid conference hosted in Miyazaki, Japan. AIP 2841, 030002. DOI: [10.1063/5.0146360](https://doi.org/10.1063/5.0146360)
- Lysander Treumann, Peter Schöttl, Thomas Schmidt, Peter Nitz, *Characterization of Antireflective Coatings on a Spherical Lens Secondary Optical Element*, presented at 18th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-18), hybrid conference hosted in Miyazaki, Japan. 25.-27.04.2022
- M. Wiesenfarth, *Design of (micro-)CPV Modules*, Keynote presentation at 18th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-18), hybrid conference hosted in Miyazaki, Japan. 25.-27.04.2022

2023:

- Elisa Kaiser, Maïke Wiesenfarth, Victor Vareilles, Henning Helmers, *Impact of Pad Layouts and Solder Volume on Self-Alignment of Micro Solar Cells*, in: Proceedings of 24th European Microelectronics Packaging Conference (EMPC23), 2023. Cambridge, UK. DOI: [10.23919/EMPC55870.2023.10418434](https://doi.org/10.23919/EMPC55870.2023.10418434) and DOI: [10.4071/001c.94746](https://doi.org/10.4071/001c.94746)
- Victor Vareilles, Philippe Voarino, Yannick Veschetti, Elisa Kaiser, Henning Helmers, Mohamed Amara, *Manufacturing of a novel micro-concentrator prototype and assessment of its electrical performances*, in: Proceedings of European Space Power Conference (ESPC), 2023. Elche, Spain. DOI: [10.1109/ESPC59009.2023.10298184](https://doi.org/10.1109/ESPC59009.2023.10298184)

¹⁶ Artikel in Fachzeitschriften und Konferenzbänden, sowie Konferenzbeiträge. Wissenschaftliche Fachjournale mit Peer-Review Verfahren sowie eingeladene und prämierte Vorträge sind unterstrichen.

2024:

- Elisa Kaiser, Maike Wiesenfarth, Victor Vareilles, Martin Schneider-Ramelow, Stefan Glunz, Henning Helmers,
Forced Motion Activated Self-Alignment of Micro-CPV Solar Cells,
IEEE Journal of Photovoltaics, 2024. 14(2): pp. 288-95. DOI: [10.1109/JPHOTOV.2024.3355403](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2024.3355403)
- Victor Vareilles, Elisa Kaiser, Philippe Voarino, Maike Wiesenfarth, Romain Cariou, Frank Dimroth, Mohamed Amara, Yannick Veschetti, Henning Helmers,
Experimental and simulative correlations of the influence of solder volume and receptor size on the capillary self-alignment of micro solar cells,
IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems, 2024. 33(2): pp. 290-5 DOI: [10.1109/JMEMS.2024.3352396](https://doi.org/10.1109/JMEMS.2024.3352396)
- O. Höhn, D. Lackner, P. Schygulla, M. Klitzke, E. Oliva, M. Schachtner, E. Kaiser, M. Wiesenfarth, G. Siefer, H. Helmers, F. Dimroth,
Record Breaking Solar Cells – III-V Multi-Junction Devices and Their Way into Modules,
invited talk presented at Compound Semiconductor International, Apr 16-17, 2024. Brussels, Belgium.
- Elisa Kaiser, Maike Wiesenfarth, Peter Schöttl, Marc Steiner, Stefan W. Glunz, Henning Helmers,
Two-Step Nested Opto-Electrical Monte-Carlo Approach to Analyze the Impact of Manufacturing Tolerances on Micro-CPV Module Performance,
presented at 19th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-19), Apr 16-17, 2024. Virtual conference hosted in Madrid, Spain.
- Elisa Kaiser, Peter Schöttl, Marc Steiner, Tobias Dörsam, Juan Martinez, Gerald Siefer, Frank Dimroth, Peter Nitz, Maike Wiesenfarth, Henning Helmers,
Performance of a Novel Micro-CPV Module: Impact of Manufacturing Tolerances Based on a Two-Step Nested Monte Carlo Approach and Experimental Outdoor Results,
extended oral presented at 2024 52th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), June 9-14, 2024. Seattle, USA.
- Klaus Jäger, Sven Burger, Urs Aeberhard, Esther Alarcon Llado, Benedikt Bläsi, Bruno Ehrler, Wilfried Favre, Antonín Fejfar, Tristan Gageot, Ivan Gordon, Henning Helmers, Oliver Höhn, Olindo Isabella, Marko Jošt, Martin Ledinský, Jyotirmoy Mandal, Phillip Manley, Delfina Munoz, Juan Camilo Ortiz Lizcano, Ulrich W. Paetzold, Aaswath P. Raman, Hitoshi Sai, Rebecca Saive, Martina Schmid, Eli Yablonovitch, Christiane Becker,
A Roadmap on Optics for Terawatt Scale Photovoltaics,
OPTICA Advanced Photonics Congress, Solar Energy and Light-Emitting Devices (SOLED), July 28-Aug 1, 2024, Quebec, Canada. DOI: [10.1364/SELED.2024.STu2G.5](https://doi.org/10.1364/SELED.2024.STu2G.5)
- Marcus Voitel, Elisa Kaiser, Salar Mehrafsun, Maike Wiesenfarth, Henning Helmers, Karl-Friedrich Becker, Tanja Braun, Martin Schneider-Ramelow,
Secondary Optics Assembly for Micro Concentrating Photovoltaics: A Parallelized and Scalable Approach,
10th IEEE Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC 2024), 2024. DOI: [10.1109/ESTC60143.2024.10712110](https://doi.org/10.1109/ESTC60143.2024.10712110)

2025:

- Elisa Kaiser, Maike Wiesenfarth, Peter Schöttl, Marc Steiner, Stefan W. Glunz, Henning Helmers,
Effect of manufacturing tolerances on Micro-CPV assemblies: A quantitative approach based on statistical modeling,
Solar Energy Materials and Solar Cells, 2025. 279: 113256. DOI: [10.1016/j.solmat.2024.113256](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113256)
- Elisa Kaiser, Maike Wiesenfarth, Peter Schöttl, Marc Steiner, Stefan W. Glunz, Henning Helmers,
Two-step nested optical-electrical Monte-Carlo approach to analyze the influence of tolerances on micro-CPV module performance,
Solar Energy Materials and Solar Cells, 2025. 279: 113257. DOI: [10.1016/j.solmat.2024.113257](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113257)
- Klaus Jäger, Urs Aeberhard, Esther Alarcon-Llado, Benedikt Bläsi, Sven Burger, Bruno Ehrler, Wilfried Favre, Antonin Fejfar, Tristan Gageot, Ivan Gordon, Henning Helmers, Oliver Höhn,

Olindo Isabella, Marko Jost, Martin Ledinsky, Jyotirmoy Mandal, Phillip Manley, Delfina Munoz, Zunaïd Omair, Juan Camilo Ortiz Lizcano, Ulrich Paetzold, Aaswath Raman, Hitoshi Sai, Rebecca Saive, Martina Schmid, Eli Yablonovitch, Christiane Becker,
Optics for Terawatt-Scale Photovoltaics – Review and Perspectives,
Advances in Optics and Photonics, 2025. 17(1): pp. 185-294. DOI: [10.1364/AOP.530556](https://doi.org/10.1364/AOP.530556) –
 Preprint @ Optica Open. DOI: [10.1364/opticaopen.28554902.v1](https://doi.org/10.1364/opticaopen.28554902.v1)

- Elisa Kaiser, Maïke Wiesenfarth, Marc Steiner, Gerald Siefer, Peter Nitz, Peter Schöttl, Stefan W. Glunz, Henning Helmers,
Power Rating of a Novel Micro-CPV Module Concept and Operational Influences,
IEEE Journal of Photovoltaics, 2025. 15(3): pp. 434-441. DOI: [10.1109/JPHOTOV.2025.3547046](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2025.3547046)
- Henning Helmers, Elisa Kaiser, Marc Steiner, Tobias Dörsam, Peter Schöttl, Peter Nitz, Gerald Siefer, Juan F. Martínez, Aristides Pages Valle, Anneli Ojaste, Frank Dimroth, Maïke Wiesenfarth,
A Novel Micro-Concentrating Photovoltaic Module: Modeling and Experimental Results,
 2026 Photonics West Conference OE102: Physics, Simulation, and Photonic Engineering of Photovoltaic Devices XV, Jan 17-22, 2026. San Francisco, CA, USA. – eingereicht

Dissertationen

- Elisa Kaiser: *High-Efficiency Concentrating PV Modules – Miniaturization and Advanced Manufacturing Technologies*,
 Dissertation (Dr.-Ing.), Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Technische Fakultät, Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) (Prof. Glunz), 2025 (in Veröffentlichung).
- Maïke Wiesenfarth: *Numerische Analyse des thermischen Verhaltens von Solarzellen in Modulen der Konzentratorphotovoltaik*,
 Dissertation (Dr.-Ing.), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fakultät für Maschinenbau (Prof. Dagan), geplant 2025.

Studentische Arbeiten

- Christoph Kudla: *Entwicklung und Evaluierung eines Verfahrens zur Ausrichtung von Solarzellen und Optiken für die Modulfertigung in der Mikro-Konzentratorphotovoltaik*.
 Masterarbeit, Technische Universität München, School of Engineering and Design, Lehrstuhl für Produktentwicklung und Leichtbau (Prof. Zimmermann), 2022.
- Gayashan Silva: *Investigation of the Heat Transfer in a Concentrator Photovoltaic Module*.
 Masterarbeit, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Technische Fakultät, Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) (Prof. Glunz, Prof. Henning), 2022.
- Lysander Treumann: *Measuring and simulating the anti-reflective coating of a spherical lens of a CPV system*.
 Bachelorarbeit, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Fakultät für Mathematik und Physik, Physikalisches Institut, 2022.
- Khasan Abrorov: *Thermal Expansion of the Micro-CPV Module*.
 Masterarbeit, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Technische Fakultät, Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) (Prof. Glunz, Prof. Stolz), 2023.
- Lucia Mehlhart: *Vorderseitenkontaktierung durch Dünndrahtbonden auf Solarzellen in Micro-CPV Modulen*.
 Studienprojekt, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Technische Fakultät, Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) (Prof. Balle), 2023.
- Benjamin Brehm: *Montage von Mikrokonzentrator Photovoltaik Zellen für ein großflächiges Modul*.
 Bachelorarbeit, Hochschule Furtwangen, Mechatronik und digitale Produktion, Fakultät Industrial Technologies (Prof. Martin Heine), 2024.

- Nepomuk S. Zieske: *Entwicklung und Leistungsanalyse eines hybriden Micro-CPV/Dünnschicht Moduls zur verbesserten Nutzung der diffusen Strahlung*. Forschungsarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Photovoltaik (Prof. Michael Saliba), 2024.
- Aya Abd Alahi: *Montage von Sekundäroptiken in einem großflächigen Mikro-Konzentrator CPV-Modul*. Praktikum, Hochschule Offenburg, 2024.
- Lucia Mehlhart: *Evaluierung alternativer Materialien für das Dünndrahtbünden von alterungsbeständigen Micro-CPV Solarzellen*. Bachelorarbeit, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Technische Fakultät, Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) (Prof. Balle), 2024.

Sonstige Veröffentlichungen

- Projektwebseite im Internet-Auftritt des Fraunhofer ISE (letztes Update Aug 2024): <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/micro-cpv.html>
- Veranstaltung des „6. CPV Forum“ am Fraunhofer ISE, Workshop 07.10.2021
- Fraunhofer ISE News (05.05.2022): Elisa Kaiser vom Fraunhofer ISE erhält Young Scientist Award auf der CPV-18 Konferenz (<https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2022/elisa-kaiser-vom-fraunhofer-ise-erhaelt-young-scientist-award-auf-der-cpv-18-konferenz.html>)
- Veranstaltung des „7. CPV Forum“ am Fraunhofer ISE, Workshop 25.09.2023
- Fraunhofer ISE News (30.07.2024): Soltec and Fraunhofer ISE jointly develop cost competitive prototype for next-generation concentrating photovoltaics <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/news/2024/prototype-for-next-generation-concentrating-photovoltaics.html> [Trackerentwicklung außerhalb des micro-CPV Projekts]
- *CPV: Is a resurgence inevitable?*, Compound Semiconductor (International Magazine), 2024. 30(7): pp. 14-15. https://compoundsemiconductor.net/article/120001/CPV_Is_a_resurgence_inevitable (23.08.2024)
- Veranstaltung des „8. CPV Forum“ am Fraunhofer ISE, Workshop 07.11.2024
- Sebastian Lehmann, Hakan Okan, Alexander Wölfel, Karin Scheidt: *Glaskugeln als optische Elemente in der Konzentration-Photovoltaik*, Whitepaper Sigmund Lindner, 2024. https://www.sili.eu/wp-content/uploads/2024/12/2024_12_17-Whitepaper_Glaskugeln-als-optische-Elemente_DE.pdf

Referenzen

1. Green MA, Dunlop ED, Yoshita M, Kopidakis N, Bothe K, Siefer G, Hao X, Jiang JY. Solar Cell Efficiency Tables (Version 66). *Prog Photovolt Res Appl.* 2025; **33(7)**: 795–810, DOI: 10.1002/pip.3919.
2. Höhn O, Schygulla P, Klitzke M, Lackner D, Schön J, Oliva E, Schachtner M, Siefer G, Helmers H, Dimroth F. Wafer-Bonded Four-Junction Solar Cell with 47.6% Conversion Efficiency for High Concentrating Photovoltaics. In: *52nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. Conference Record; 2024, pp. 117–119.
3. Steiner M, Siefer G, Schmidt T, Wiesenfarth M, Dimroth F, Bett AW. 43% Sunlight to Electricity Conversion Efficiency Using CPV. *IEEE J. Photovolt.* 2016; **6(4)**: 1020–4, DOI: 10.1109/jphotov.2016.2551460.
4. IEC. Photovoltaic concentrators (CPV) - Performance testing: Part 3: Performance measurements and power rating; **27.160(62670-3)**; 2017. Available at: <https://webstore.iec.ch/en/publication/27047>.
5. Wiesenfarth M, Anton I, Bett AW. Challenges in the design of concentrator photovoltaic (CPV) modules to achieve highest efficiencies. *Appl. Phys. Rev.* 2018; **5(4)**: 041601-1 bis 041601-27, DOI: 10.1063/1.5046752.
6. van Riesen S, Neubauer M, Boos A, Rico MM, Gourdel C, Wanka S, Krause R, Guernard P, Gombert A. New module design with 4-junction solar cells for high efficiencies. In: *11th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-11)*. Melville, N.Y.: American Institute of Physics; 2015, p. 100006.
7. Rumyantsev VD, Andreev VM, Bett AW, Dimroth F, Hein M, Lange G, Shvarts MZ, Sulima OV. Progress in Development of All-Glas Terrestrial Concentrator Modules Based on Composite Fresnel Lenses and III-V Solar Cells. In: *28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. Conference Record: IEEE; 2000, pp. 1169–1172.
8. Gombert A. From 0.01 to 44 MWp with Concentrix technology. In: *12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-12)*. Melville, N.Y.: American Institute of Physics; 2016, p. 30001.
9. Domínguez C, Jost N, Askins S, Victoria M, Antón I. A review of the promises and challenges of micro-concentrator photovoltaics. In: *13th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-13)*. Melville, N.Y.: American Institute of Physics; 2017, p. 80003.
10. Ghosal K, Lilly D, Gabriel J, Whitehead M, Seel S, Fisher B, Wilson J, Burroughs S. Semprius field results and progress in system development. *IEEE J. Photovolt.* 2014; **4(2)**: 703–8, DOI: 10.1109/jphotov.2013.2288026.
11. Ghosal K, Fisher B, Lilly D, Gabriel J, Seel S, Burroughs S. Ultrahigh Efficiency HCPV Modules and Systems. *IEEE J. Photovolt.* 2016; **6(5)**: 1360–5, DOI: 10.1109/JPHOTOV.2016.2590884.
12. Hayashi N, Terauchi M, Aya Y, Kanayama S, Nishitani H, Nakagawa T, Takase M. Thin concentrator photovoltaic module with micro-solar cells which are mounted by self-align method using surface tension of melted solder. In: *13th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-13)*. Melville, N.Y.: American Institute of Physics; 2017, p. 80005.
13. Schroth P, Löckenhoff R, Fuhrmann D, Meusel M, Frey A, Steiner M, Siefer G. AZUR's new 5C46 CPV cell: Final design for optimized outdoor performance. In: *17th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-17)*. Melville N.Y.: American Institute of Physics; 2021, p. 20008.
14. Dimroth F, Tibbits TND, Niemeyer M, Predan F, Beutel P, Karcher C, Oliva E, Siefer G, Lackner D, Fuskailuweit P, Bett AW, Krause R, Drazek C, Guiot E, Wasselin J, Tauzin A, Signamarcheix T. Four-

- Junction Wafer-Bonded Concentrator Solar Cells. *IEEE J. Photovolt.* 2016; **6(1)**: 343–9, DOI: 10.1109/jphotov.2015.2501729.
15. Helmers H, Höhn O, Lackner D, Schygulla P, Klitzke M, Schön J, Pellegrino C, Oliva E, Schachtner M, Beutel P, Heckelmann S, Predan F, Ohlmann J, Siefer G, Dimroth F. Advancing solar energy conversion efficiency to 47.6% and exploring the spectral versatility of III-V photonic power converters. In: Freundlich A, Hinzer K, Collin S, Sellers IR, (eds). *Physics, Simulation, and Photonic Engineering of Photovoltaic Devices XIII*: SPIE; 2024 - 2024, p. 36.
 16. Kotz F, Schneider N, Striegel A, Wolfschläger A, Keller N, Worgull M, Bauer W, Schild D, Milich M, Greiner C, Helmer D, Rapp BE. Glassomer-Processing Fused Silica Glass Like a Polymer. *Adv. Mater.* 2018; e1707100, DOI: 10.1002/adma.201707100.
 17. Menard E, Sullivan M, Wilson J, Fisher B, Seel S, Meitl M, Ghosal K, Burroughs S. Optics development for micro-cell based CPV modules. In: VanSant K, Sherif RA, (eds). *Proc. SPIE 8108, High and Low Concentrator Systems for Solar Electric Applications VI*: SPIE; 2011, p. 810805.
 18. Braun T, Becker K-F, Wohrmann M, Topper M, Bottcher L, Aschenbrenner R, Lang K-D. Trends in Fan-out wafer and panel level packaging. In: *International Conference on Electronics Packaging (ICEP)*: IEEE; 2017, pp. 325–327.
 19. Green MA, Dunlop ED, Yoshita M, Kopidakis N, Bothe K, Siefer G, Hao X, Jiang JY. Solar Cell Efficiency Tables (Version 65). *Prog Photovolt Res Appl.* 2025; **33(1)**: 3–15, DOI: 10.1002/pip.3867.
 20. Kaiser E. *High-Efficiency Concentrating PV Modules – Miniaturization and Advanced Manufacturing Technologies*. Dissertation. Freiburg im Breisgau; 2025.
 21. Wiesenfarth M, Steiner M, Helmers H, Bett AW. Voltage losses due to the perimeter and dark area in micro-concentrator solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2021; **219**: 110791, DOI: 10.1016/j.solmat.2020.110791.
 22. Wiesenfarth M, Iankov D, Martínez JF, Nitz P, Steiner M, Dimroth F, Helmers H. Technical boundaries of micro-CPV module components: How small is enough? In: *17th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-17)*. Melville N.Y.: American Institute of Physics; 2021, p. 30008.
 23. Kaiser E, Schöttl P, Wiesenfarth M, Nitz P, Helmers H. Effects of manufacturing tolerances on micro-CPV module performance. In: *18th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-18) and 13th World Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity (TPV-13)*. Melville N.Y.: American Institute of Physics; 2022, p. 30002.
 24. Kaiser E, Wiesenfarth M, Schöttl P, Steiner M, Glunz SW, Helmers H. Effect of manufacturing tolerances on Micro-CPV assemblies: A quantitative approach based on statistical modeling. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2025; **279**: 113256, DOI: 10.1016/j.solmat.2024.113256.
 25. Kaiser E, Wiesenfarth M, Schöttl P, Steiner M, Glunz SW, Helmers H. Two-step nested optical-electrical Monte-Carlo approach to analyze the influence of tolerances on Micro-CPV module performance. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2025; **279**: 113257, DOI: 10.1016/j.solmat.2024.113257.
 26. Wiesenfarth M, Thaller S, Jaus JC, Eltermann F, Passig M, Bett AW. Investigations on interconnection technologies for CPV systems. In: *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion: Joint World Conference of 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 36th US IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 20th Asia/Pacific PV Science and Engineering Conference*. Proceedings; 2010, pp. 147–151.
 27. Domínguez C, Antón I, Sala G. Solar simulator for concentrator photovoltaic systems. *Opt. Express* 2008; **16(19)**: 14894–901, DOI: 10.1364/oe.16.014894.
 28. Peharz G, Rodriguez JPF, Siefer G, Bett AW. Indoor Characterization of CPV modules at Fraunhofer ISE. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity*; 2008.

29. Peharz G, Ferrer-Rodriguez JP, Siefer G, Bett AW. Temperature Coefficients of FLATCON® Modules. In: *6th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems (CPV-6)*. Melville, N.Y.: American Institute of Physics; 2010, pp. 213–216.
30. Rapp C, Steiner M, Siefer G, Bett AW. Stepwise measurement procedure for the characterization of large-area photovoltaic modules. *Prog Photovolt Res Appl*. 2015; **23(12)**: 1867–76, DOI: 10.1002/pip.2635.
31. Treumann L, Schöttl P, Schmidt T, Nitz P. Characterization of anti-reflective coatings on a spherical lens secondary optical element. In: *18th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-18) and 13th World Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity (TPV-13)*. Melville N.Y.: American Institute of Physics; 2022, p. 40002.
32. IEC. 82/429/CDV: 62108: International Electrotechnical Commission; 2006.
33. Vareilles V, Kaiser E, Voarino P, Wiesenfarth M, Cariou R, Dimroth F, Veschetti Y, Amara M, Helmers H. Experimental and Simulative Correlations of the Influence of Solder Volume and Receptor Size on the Capillary Self-Alignment of Micro Solar Cells. *J. Microelectromech. Syst.* 2024; **33(2)**: 290–5, DOI: 10.1109/JMEMS.2024.3352396.
34. Kaiser E, Wiesenfarth M, Vareilles V, Helmers H. Impact of Pad Layouts and Solder Volume on Self-Alignment of Micro Solar Cells. In: *24th European Microelectronics & Packaging Conference (EMPC 2023): 11-14 September 2023, Cambridge, UK*. Piscataway, NJ: IEEE; 2023, pp. 1–5.
35. Kaiser E, Wiesenfarth M, Vareilles V, Schneider-Ramelow M, Glunz SW, Helmers H. Forced Motion Activated Self-Alignment of Micro-CPV Solar Cells. *IEEE J. Photovolt.* 2024; **14(2)**: 288–95, DOI: 10.1109/JPHOTOV.2024.3355403.
36. Risse A. *Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätetechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner; 2012.
37. Kaiser E, Wiesenfarth M, Steiner M, Siefer G, Nitz P, Schöttl P, Glunz SW, Helmers H. Power Rating of a Novel Micro-CPV Module Concept and Operational Influences. *IEEE J. Photovolt.* 2025; **15(3)**: 434–41, DOI: 10.1109/JPHOTOV.2025.3547046.
38. Vareilles V. *Highly integrated photovoltaic micro-concentrator for space applications*. Dissertation. Lyon, France; 2023.
39. Jost N. *Development of micro-concentrator concepts and technologies enabling mass production of high efficiency photovoltaic modules*. Tesis doctoral; 2022.
40. Jost N, Askins S, Dixon R, Ackermann M, Domínguez C, Anton I. Array of micro multijunction solar cells interconnected by conductive inks. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2022; **240**: 111693, DOI: 10.1016/j.solmat.2022.111693.
41. Jacobo-Martín A, Jost N, Hernández JJ, Domínguez C, Vallerotto G, Askins S, Antón I, Rodríguez I. Roll-to-roll nanoimprint lithography of high efficiency Fresnel lenses for micro-concentrator photovoltaics. *Opt. Express* 2021; **29(21)**: 34135–49, DOI: 10.1364/OE.437803.
42. Jouanneau C, Bidaud T, Ferreol P, Breton B, Hamon G, Darnon M. Fabrication and characterization of high performance sub-millimetric InGaP/InGaAs/Ge solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2025; **282**: 113320, DOI: 10.1016/j.solmat.2024.113320.
43. Darnon M, Lafontaine M de, Volatier M, Fafard S, Arès R, Jaouad A, Aimez V. Deep germanium etching using time multiplexed plasma etching. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena* 2015; **33(6)**, DOI: 10.1116/1.4936112.
44. Grede AJ. *Microscale Concentrated Photovoltaics and Soft Matter Lasers*: ProQuest Dissertations & Theses; 2022.
45. Lasich J, Grayson K, Payne R, Baker S, Mosley W, Kitchener A. Central receiver photovoltaics – A source of firm solar power. In: *17th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-17)*. Melville N.Y.: American Institute of Physics; 2021, p. 60001.

46. Gorjian S, Jalili Jamshidian F, Gorjian A, Faridi H, Vafaei M, Zhang F, Liu W, Elia Campana P. Technological advancements and research prospects of innovative concentrating agrivoltaics. *Appl. Energy* 2023; **337**: 120799, DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120799.