

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

 **Fraunhofer**
ISE

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE

ABSCHLUSSBERICHT

QuintuMod - Entwicklung eines kostengünstigen und gleichzeitig hocheffizienten Solarmoduls unter Verwendung einer 5fach-Stapelsolarzelle;
Teilvorhaben: Modulperformance

Förderkennzeichen: 03EE1088B

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
in Freiburg

Projektleitung: M. Wiesenfarth
maike.wiesenfarth@fraunhofer.ise.de

Laufzeit: 01.02.2021 bis 31.01.2024

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

Juli 2024

Danksagung

Das Forschungsprojekt « QuintuMod » wurde in der Zeit vom 01.02.2021 bis zum 31.01.2024 durch den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 03EE1088B betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, wofür wir uns herzlich bedanken.

Hinweis:

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg und dem Verbundpartner AZUR SPACE Solar Power (Projektkoordinator) gemeinsam durchgeführt. Dieser Bericht beinhaltet eine Beschreibung der Arbeiten und Ergebnisse des Verbundpartners Fraunhofer ISE im Teilprojekt 03EE1088B. Für die Arbeiten in den angeschlossenen Teilprojekten wird ein separater Abschlussbericht von den Verbundpartnern eingereicht.

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

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

Zusammenfassung	4
I Ausgangssituation des Vorhabens	5
1 Aufgabenstellung	5
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	6
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn	8
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	10
II Eingehende Darstellung der Projektergebnisse.....	11
6 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	11
6.1 AP 1: Verbesserungen identifizieren	11
6.2 AP2: Optimierung der Modulkomponenten	30
6.3 AP3: Fertigung und Charakterisierung von Demonstratoren (CPV-Module).....	33
6.4 AP4: Entwicklung einer Berechnungsmethode für Energieertragsprognosen AZUR/ISE	40
7 Notwendigkeit der Arbeit.....	60
8 Zahlenmäßiger Nachweis und Notwendigkeit der Arbeit	60
9 Voraussichtlichen Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des Verwertungsplans	61
10 Relevante Ergebnisse von dritter Seite.....	61
11 Erfolgte Veröffentlichung der Ergebnisse	62
11.1 Veröffentlichungen auf Konferenzen	62
11.2 Bachelor-, Masterarbeiten	62
11.3 Projektdarstellung im Internet	63
III Literatur	64

Zusammenfassung

Im Projekt QuintuMod wurden erstmalig neuartige Fünffachsolarzellen erfolgreich in Module der Konzentradorphotovoltaik (CPV) des Projektpartner AZUR SPACE Solar Power GmbH integriert. Diese Solarzellen bieten ein erheblich höheres Wirkungsgradpotential im Vergleich zu herkömmlichen Dreifachsolarzellen bei nur geringfügig erhöhtem Herstellungsaufwand. Durch die höhere Anzahl an Teilsolarzellen, steigt jedoch die Sensitivität der Leistung bezüglich unterschiedlichen spektralen Bedingungen. Daher sind neben der Bewertung bei Standardbedingungen die Analyse bei Betriebsbedingungen wie erhöhter Solarzellentemperatur und die Vorhersage des Energieertrags über den Jahresverlauf mit unterschiedlichen Umgebungsbedingungen von entscheidender Bedeutung.

Das Fraunhofer ISE unterstützte die Weiterentwicklung der CPV-Modulkomponenten des Projektpartners AZUR SPACE und die Anpassung auf die neue Fünffachsolarzelle durch optische Simulationen. Mithilfe des inhouse-entwickelten Simulationswerkzeugs Raytrace 3D wurden Matrizen der Strahlungsverteilung für verschiedene Geometrien und Materialeigenschaften der Sekundäroptik sowie der Solarzellengröße simuliert, die fundierte Designentscheidungen beim Projektpartner ermöglichten. Die mechanische Belastbarkeit der Module wurde experimentell untersucht; alle Module haben ein Mehrfaches der Belastung aus der Norm überstanden.

Zudem wurden die Fünffachsolarzellen und ihre Komponentenzellen elektrisch charakterisiert. Durch Erweiterungen der Messmöglichkeiten konnten erstmals umfassende Messungen der Externen Quanteneffizienz (EQE) und IV-Kennlinien bei Temperaturen bis 90 °C durchgeführt werden. Spektral aufgelöste Elektrolumineszenz (EL)-Messungen ermöglichten die Bestimmung der Temperaturkoeffizienten der offenen Klemmenspannung für die ersten vier Teilsolarzellen unter verschiedenen Konzentrationsfaktoren. Die unterste Teilsolarzelle kann im EL-Signal nicht aufgelöst werden.

Für mehrere CPV-Module wurde die Leistungsbestimmung gemäß IEC 62670-3 durchgeführt. Ein maximaler Wirkungsgrad von 35.6 % unter Konzentrador-Standard-Testbedingungen (CSTC) und 31.7 % unter Konzentrador-Betriebsbedingungen (CSOC) wurde erreicht, was eine beeindruckende Leistungssteigerung von 14.1 % (relativ, CSTC) und 17.6 % (relativ, CSOC) im Vergleich zu herkömmlichen AZUR SPACE CPV-Modulen mit Dreifachsolarzellen darstellt. Bezieht sich der Wirkungsgrad auf die aktive Linsenfläche ergeben sich sogar Wirkungsgrade von 36.6 % (CSTC) bzw. 32.6 % (CSOC). Langzeitmessungen bestätigten die elektrische Performance der CPV-Module unter unterschiedlichen, realen Umgebungsbedingungen. Basierend auf diesen Daten wurden Eingabeparameter (PAN-Files) für die Software PVSyst zur Modellierung des Energieertrags erstellt – ein weiterer Projektschwerpunkt. Ziel war es, die Methoden der Simulation des Energieertrags für die Module mit den neuen Fünffachsolarzellen zu bewerten. Simulationen des Energieertrags an verschiedenen Standorten mit der in der PV weltweit genutzten Software PVSyst und dem in-house entwickelten, auf physikalischen Parametern basierenden Tool „YieldOpt“ zeigten eine gute Übereinstimmung mit Abweichungen zwischen -0.6 % und 3 %. Lediglich an Standorten mit hoher Aerosoldichte (AOD), die nicht typisch für CPV sind, wurden Abweichungen bis 4.5 % festgestellt, da PVSyst die Aerosoldichte nicht berücksichtigt. Darüber hinaus wurde die Energieertragsprognose mittels PVSyst durch Außenmessungen über mehrere Monate an einem Standort in Südafrika verifiziert, wobei eine leichte Überschätzung des Energieertrags um 1.7 % festgestellt wurde. Die Untersuchungen sollen zukünftig fortgesetzt werden.

Durch das Projekt QuintuMod konnte der Projektpartner AZUR in der Designentwicklung des Modulkonzeptes durch Simulationen, Messungen und experimentelle Untersuchungen grundlegend unterstützt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse zur Energieertragsmodellierung und zum Verhalten der Fünffachsolarzellen vertiefen das Verständnis und sind auch auf andere CPV-Modulkonzepte übertragbar.

I Ausgangssituation des Vorhabens

1 Aufgabenstellung

Im Vorhaben „QuintuMod“ werden zuverlässige, kosteneffektive und hocheffiziente CPV-Module entwickelt und optimiert. In der konzentrierenden Photovoltaik (CPV) werden die höchsten Wirkungsgrade erzielt. Darüber hinaus hat sie zusätzliche Vorteile bzgl. Transport, Recycling und Nachhaltigkeit. Durch das Projekt wird die Technologie konkurrenzfähig zu allen anderen aktuellen PV-Technologien. Im Projekt wird eine neue Fünffachsolarzelle mit auf die Betriebsbedingungen optimierter Effizienz in das AZUR CPV Modulkonzept integriert. Damit soll im Projekt ein Modul-Wirkungsgrad von 34 % (CSTC-Rating) erreicht werden. Durch die Evaluierung der Modulperformance in Feldtests wird eine Berechnungsmethode entwickelt, mit welcher die Modulperformance für dedizierte Standorte berechnet werden kann und somit belastbare Energieertragsprognosen ermöglicht.

Im Teilprojekt ist das Fraunhofer ISE verantwortlich für die elektrische Charakterisierung der Fünffachsolarzellen, der Module in Außenmessungen und der Bewertung des Energieertrags. Dazu werden vorhanden Messplätze wie der EQE-Messplatz oder der Zell-Linsen-Messaufbau erweitert, um Messungen bei Zelltemperaturen, wie sie auch im Betrieb vorherrschen durchzuführen. Im Rahmen des Projekts können damit verschiedene Technologiegenerationen bewertet und das Verständnis des Modulverhaltens erhöht werden. Des Weiteren unterstützt das Fraunhofer ISE den Projektpartner in der Evaluierung des Moduldesigns mit Durchführung von Alterungsversuchen und optischen und thermischen Simulation der Primäroptik. Darüber hinaus werden am Fraunhofer ISE Methoden zur Berechnung des Energieertrags wissenschaftlich untersucht und damit die Vorhersagegenauigkeit des Energieertrags für das CPV-Modul verbessert.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) wird zu zahlreichen Themen im Bereich der Solarenergie geforscht. Ein wichtiges Geschäftsfeldthema ist die konzentrierende Photovoltaik (CPV). Neben der Solarzellenentwicklung besteht langjährige Erfahrung in der Entwicklung weiterer Komponenten für CPV-Module und die Untersuchung von Modulen im Gesamten. Die Grundlage für die erfolgreichen Forschungsarbeiten ist eine umfangreiche Laborausstattung und die langjährige Expertise der dort arbeitenden Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen.

Ein Schwerpunkt im Projekt ist die elektrische Charakterisierung von AZUR CPV-Modulen im Außen-teststand am Fraunhofer ISE. Aus den Außenmessungen kann nach der Norm IEC 62670-3 der kalibrierte Wirkungsgrad bei Konzentrador-Standardtestbedingungen (CSTC) bestimmt werden. Für die Untersuchungen der Langzeitperformance, die notwendig sind für die Generierung von Input-Parametern für die Energieertragsberechnung, steht eine kontinuierliche Messung der relevanten Umgebungsbedingungen (Einstrahlung, Temperatur, Spektrum) zur Verfügung. Zur Bewertung von CPV-Komponenten steht ein Test-Aufbau zur Variation des Zell-Linsenabstands bei definierter Linsen-Temperatur zu Verfügung. Dieser wurde im Projekt erweitert, so dass auch die Solarzellentemperatur eingestellt werden kann.

Außerdem wurden im Projekt die Fünffachsolarzellen im Labor unter definierten Bedingungen im ISE CalLab PV Cells vermessen. Das „ISE CalLab PV Cells“ ist eines der wenigen Prüfcentren weltweit, die derzeit die kalibrierte Vermessung von III-V Mehrfachkonzentratorsolarzellen durchführen können. Die Rückkopplung durch die schnelle und präzise Vermessung der hergestellten Konzentradorzellen ist ein wesentlicher Grund für die hervorragende Stellung des Fraunhofer ISE auf dem Gebiet der Herstellung

und Entwicklung von III-V Mehrfachkonzentratorsolarzellen. Die dabei verwendeten Teststände wurden im Projekt erweitert, so dass die Solarzellen bei Temperaturen bis mindesten 90 °C vermessen werden können.

Die Alterungstest werden im TestLab PV Modules durchgeführt. Das Technologie und Evaluations-Center (TEC) ist eine nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 akkreditierte und als CB Testing Laboratory nach IEC 61851-1:2014-11, IEC 61851-2:2012-06 gemäß IEC 61851-1 System anerkannte Einrichtung für vielfältigste Zuverlässigkeitsuntersuchungen an PV-Modulen. Viele dieser Untersuchungen lassen sich (hier mit Anpassungen) auch an CPV-Modulen durchführen.

Neben der Laborinfrastruktur und die damit verbundenen Erfahrungen stehen weitreichende Methoden und Werkzeuge im Bereich der computergestützten Simulation für das theoretische Verständnis von CPV-Modulen und Komponenten (z.B. Optiken) zur Verfügung. Diese wurden durch Optiksimulationen und Energieertragssimulationen im Projekt eingebracht.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Gesamtziel war die Entwicklung und Untersuchung eines CPV-Moduls mit einer Fünffachsolarzelle. Der Schwerpunkt der Arbeiten am Fraunhofer ISE war die Unterstützung der Entwicklung des Moduldesigns (insbesondere der Optik) und die Untersuchung zur mechanischen Belastung und Langzeitstabilität. Das Fraunhofer ISE war verantwortlich für die Charakterisierung der Solarzellen und Module sowie die Untersuchung der Vorhersage des Energieertrags. Die Arbeitspakete mit Beteiligung des Fraunhofer ISE und die Meilensteine sind in den folgenden Tabellen aufgeführt.

1. AP1: Potentiale der Fünffach-Zellstruktur in CPV-Modulen identifizieren und evaluieren

Titel AP	Titel (Verantwortung)	AP 1: Verbesserungen identifizieren Stichworte zu den Inhalten
1.1	Ausbau Sim-Tools (ISE)	<ul style="list-style-type: none"> • Optische Raytracing und FEM Simulationen
1.2	Weiterentwicklung der Mess-methoden f. 5J (ISE)	<ul style="list-style-type: none"> • EQE und IV-Messungen bei erhöhten Temperaturen • Erweiterung Außenmesstand auf >300V
1.3	Aufrüstung des vorhandenen Spezialaufbaus ‚Einer-Modul‘ (ISE)	<ul style="list-style-type: none"> • Aufrüstung des vorhandenen Spezial-Messaufbaus, um eine Temperierung der Solarzelle zu ermöglichen; Gegebenenfalls Anpassung für neue Primärlinse und neues EFA
1.4	Abgleich und Evaluierung der Simulations- & Messergebnisse (AZUR/ISE)	<ul style="list-style-type: none"> • Datenanalyse und Auswertung • Bewertung der Simulations- und Messdaten • Evaluierungsbericht

2. AP2: Optimierung der Modulkomponenten

Titel		AP 2: Optimierung der Modulkomponenten
AP	Titel (Verantwortung)	Stichworte zu den Inhalten
2.3	Design und Material-optimierung der Modulteile (AZUR)	<ul style="list-style-type: none"> • Test verschiedener Metall-Legierungen und Materialstärken für den Modul-Trog • Anpassung der Primärlinsenabmessungen (ca. 3% Stromgewinn wird erwartet) • Anpassung der Fresnel-Struktur auf realistische Linsentemperatur im Betrieb • Test und Vergleich von Primärlinsen verschiedener Lieferanten

3. AP3: Fertigung und Charakterisierung von Demonstratoren (CPV-Module)

Titel		AP 3: Fertigung und Charakterisierung von Demonstratoren (CPV-Module)
AP	Titel (Verantwortung)	Stichworte zu den Inhalten
3.3	Modulmessungen & Feldtests (AZUR/ISE)	<ul style="list-style-type: none"> • Modulcharakterisierung / Ratings am ISE • Mechanische Last-Tests
3.4	Alterungstests (ISE)	<ul style="list-style-type: none"> • Thermische Zyklen • Dichtigkeitsprüfung

4. AP4: Entwicklung einer Berechnungsmethode für Energieertragsprognosen

Titel		AP 4: Entwicklung einer Berechnungsmethode für Energieertragsprognosen
AP	Titel (Verantwortung)	Stichworte zu den Inhalten
4.1	Spektrale Einstrahlung für Energieertrags-Berechnungen an CPV-typischen Standorten (ISE)	<ul style="list-style-type: none"> • Recherche zur Verfügbarkeit spektraler Einstrahlungsdaten • Definition Referenzdatensatz • Spectrafy Sensor prüfen
4.2	Detaillierte Energieertrags-Berechnungen für 5J-basierte CPV-Module (ISE)	<ul style="list-style-type: none"> • Parametrierung detailliertes Energieertragstool • Ertragsberechnung verschiedene CPV-Standorte • Generierung von Referenzwerten für PVsyst Energieertrag
4.3	Erstellung & Validierung von PVsyst PAN-Files (ISE/AZUR)	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung PVsyst PAN-Files • Prüfung PAN-Files anhand Langzeitmessungen • Untersuchung Thermal Transient Measurement (TTM)-Methodik

Der Fortschritt des Projekts wurde anhand von Meilensteinen überprüft (siehe Tabelle 1). Alle Meilensteine wurden erreicht.

Tabelle 1: Liste der Meilensteine:

Meilenstein	Titel	Art	Verantw.
M3	Evaluierung von Simulations- und Messergebnissen	Dokument	AZUR/ISE
M6	Fertigstellung & Charakterisierung der 5-fach Solarzellen	Hardware	AZUR/ISE
M7	Fertigstellung & Prüfung der Demonstratormodule	Hardware	AZUR/ISE
M8	Auswertung der Felddaten an min. 2 Standorten	Dokument	AZUR/ISE
M9	Ergebnisse der Alterungstests	Dokument	ISE
M10	PAN-File Erstellung zur Nutzung in Ertragsprognose-Software	Dokument	ISE/AZUR

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn

Mit Wirkungsgraden von bis zu 42% [1] unter konzentriertem Sonnenlicht wurde vor einigen Jahren die praktische Wirkungsgradgrenze für gitterangepasste Epitaxie-Zellstrukturen mit drei Teilzellen erreicht. Durch Entwicklung von diversen Zelltechnologien, welche die Beschränkungen der Gitteranpassung umgehen können, wurden deutlich höhere Wirkungsgrade von bis zu 47.1 % [2, 3] erreicht.

Allerdings werden zum Teil für derartige Rekordzellen äußerst aufwendige Prozessschritte eingesetzt und auch Teilzellkombinationen aufgebaut, die für den praktischen Einsatz in CPV-Modulen nur bedingt geeignet sind. Zudem wurden sie speziell auf die Labor-Testbedingungen angepasst, um hohe Werte zu erreichen, wodurch im realen Einsatz (z.B. inhomogene Beleuchtung) keine optimale Effizienz mehr erreicht werden konnte. Ähnliches gilt für Rekord-CPV-Module. Auf Modulebene liegt der Wirkungsgradrekord aktuell bei 41.4% [4]. Dies wurde mit beidseitig entspiegelten hochtransparenten Vollglaslinsen von höchster Qualität und durch den Einsatz von besonderen Stapelsolarzellen erreicht, die zwei Epitaxie-Prozesse und einen sogenannten direkten Halbleiterbond erfordern. Damit wird das Potential der CPV-Technologie zwar erneut untermauert, wobei aber sowohl die verwendete Zelltechnologie als auch die Modultechnologie aus heutiger Sicht nicht wirtschaftlich darstellbar bzgl. einer Industrialisierung sind.

Um die CPV-Technologie zum wirtschaftlichen Erfolg zu führen, entwickelte AZUR ein neues eigenes Modulkonzept, wobei neben der elektrischen und optischen Effizienz der Einzelkomponenten eine ganzheitliche Abstimmung der Komponenten aufeinander erfolgt und insbesondere die Kosten das zentrale Thema darstellen [5]. Bei dieser Entwicklung setzt AZUR auf das sogenannte UMM (‘upright metamorphic’) Zellkonzept, wobei zwar ein etwas aufwendigerer Epitaxie-Prozess im Vergleich zur gitterangepassten Zelle nötig ist, aber ansonsten keine zusätzlichen Prozessschritte erforderlich sind. Dies ist im Vergleich zu anderen nicht-gitterangepassten Zellkonzepten, die zusätzliche Bonding- und/oder Ablöse-Verfahren oder sogar Epitaxie-Prozesse auf mehreren Wafern erfordern, ein erheblicher Kostenvorteil. Dieses Zellkonzept wird seit geraumer Zeit bei AZUR entwickelt und bereits erfolgreich sowohl für CPV-Produkte (3C44 Technologie) als auch für Raumfahrtprodukte (4G32 Technologie) angewendet. Mit dieser Technologie bietet AZUR weltweit die höchste Zellperformance für CPV-Solarzellen und Weltraumsolarzellen kommerziell an.

Bezüglich der Modul-Typen existieren ebenfalls verschiedene Konzepte, die das Licht entweder mit Spiegeloptiken oder Linsenoptiken auf die Solarzellen bündeln. Fresnel-Optiken hergestellt mit der ‘Silikon-auf-Glas’ (SoG) Technologie sind am weitesten verbreitet [6]: Durch das Glassuperstrat sind sie robuster als Kunststoff-Linsen und erlauben gleichzeitig eine hochgenaue Strukturierung der Silikonlinse. AZUR nutzt in dem Modulkonzept C3PV eine solche Optik als Primäroptik [5].

Des Weiteren werden zusätzlich zur Primäroptik zumeist Sekundäroptiken verwendet, die direkt auf den Solarzellen montiert werden. Damit kann die Verteilung der Solarstrahlung auf der Solarzelle homogenisiert werden oder zusätzliches Licht auf die Zelle fokussiert werden, und damit der elektrische Wirkungsgrad erhöht werden. Auch hier gibt es mehrere Ausführungsformen, die sowohl Spiegeloptiken (Spiegeltrichter) als auch Glaslinsen, die mit der Zelle verklebt werden, umfassen. Die aufgeklebten Glasoptiken bieten einen zusätzlichen Schutz vor äußeren Einflüssen und sind vielversprechender bzgl. der Langzeitstabilität. Abbildung 1 zeigt eine Nachführeinheit, die mit acht C3PV Modulen von AZUR SPACE bestückt ist (links) und eine Zell-Receiver-Einheit mit aufgeklebter Sekundär-Optik aus Glas (rechts).

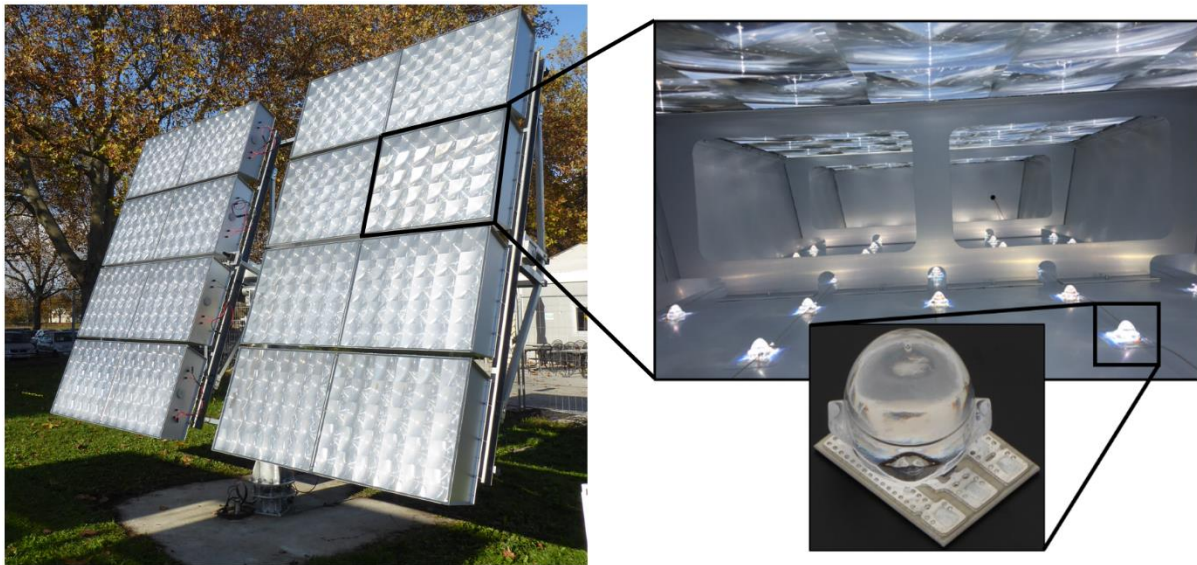


Abbildung 1: Links: Nachführeinheit mit 8x C3PV Modulen, die mit 3C44-Zellen bestückt sind; Standort: Bühl (DE). Rechts: Zell-Receiver-Einheit mit Sekundär-Optik aus Glas (sogenanntes EFA: 'Enhanced Fresnel Assembly' einzeln und im Modul verbaut).

Bei Projektbeginn waren schon erste Fünffachsolarzellen [7] hergestellt worden, allerdings noch nicht im Modulverbund integriert und getestet. Außerdem war eine akkurate Charakterisierung dieser Zellen eine besondere Herausforderung bzw. noch nicht hinreichend genau möglich. Dies galt insbesondere unter konzentriertem Licht. Schon bei der Messung einer 4fach-Zelle unter Konzentration kann keines der führenden Institute (Fraunhofer ISE, NREL (USA) und AIST (Japan)) eine zufriedenstellende Genauigkeit erreichen. Als Basis für erste Messungen unter nicht-konzentriertem Licht existieren bei AZUR SPACE und am Fraunhofer ISE Sonnensimulatoren mit 4 bzw. 6 unterschiedlichen Spektralzonen zu der Vermessung von 4fach- bzw. bis zu 6fach-Zellen bei einer Sonne. Es besteht jedoch – wie oben bereits erwähnt – bisher auch international sehr wenig Erfahrung im Bereich der Charakterisierung von Mehrfachzellen mit mehr als vier Teilzellen und im Besonderen deren Charakterisierung unter Konzentration.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Gesamtvorhaben „QuintuMod - Entwicklung eines kostengünstigen und gleichzeitig hocheffizienten Solarmoduls unter Verwendung einer Fünffach-Stapelsolarzelle“ bearbeitete das Fraunhofer ISE das Teilvorhaben: Modulperformance.

Das Fraunhofer ISE arbeitete sehr eng mit dem Projektpartnern AZUR SPACE zusammen, wobei AZUR SPACE die Messobjekte und ergänzend Langzeit-Messdaten bereitstellte. Das ISE unterstützte den Industriepartner in der experimentellen und wissenschaftlichen Untersuchung der Komponenten und Module. In den regelmäßigen Projekt- und Arbeitstreffen wurden alle Ergebnisse zwischen den Projektpartnern diskutiert.

Um die Aufgaben bestmöglich erfüllen zu können, wurde das Fraunhofer ISE zusätzlich durch den Projektpartner AZUR SPACE durch Zufinanzierung unterstützt, wofür das Fraunhofer ISE sehr dankbar ist.

II Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

6 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Das Projekt war in vier Arbeitspakete (siehe auch Abschnitt 3) aufgeteilt:

- AP1: Verbesserungspotentiale identifizieren, bewerten und evaluieren
- AP2: Optimierung der Modulkomponenten
- AP3: Fertigung & Charakterisierung von Demonstratoren
- AP4: Entwicklung einer Berechnungsmethode für Energieertragsprognosen

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse dargestellt.

6.1 AP 1: Verbesserungen identifizieren

AP1.1: Ausbau der Sim.-Modelle (AZUR) und Sim-Tools (ISE)

Überarbeitung des Ray Tracing-Simulationsmodells für die zweistufige AZUR-Optik

Für optische Bewertungen von CPV-Optiken wird am Fraunhofer ISE die hauseigene Simulationssoftware Raytrace3D [8, 9] eingesetzt. Zur Anknüpfung an frühere Simulationsstudien (z.B. aus dem BMWi-geförderten Projekt „CPVMod“ FkZ: 0324140B) wurde das vorhandene Simulationsmodell für die AZUR-Optik weiter überarbeitet. In Abbildung 2 ist exemplarisch eine der untersuchten Geometrien abgebildet.

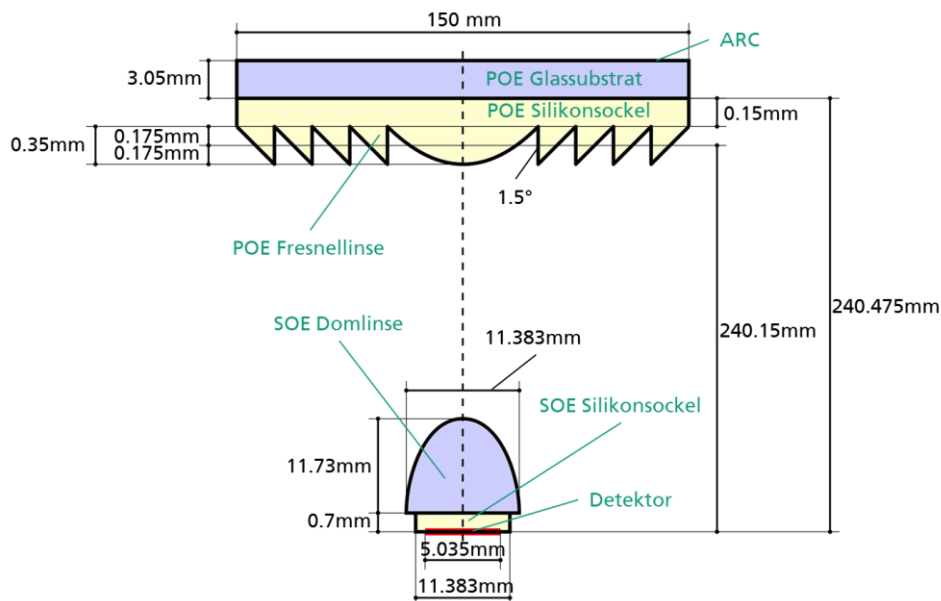


Abbildung 2: Geometrie-Beschreibung einer der untersuchten AZUR-Optiken mit einer Silikon-auf-Glas Fresnellinse als Primäroptik (POE) und einer mit Silikon auf dem Detektor (Solarzelle) befestigten Domlinse als Sekundäroptik (SOE). Die POE ist mit einer Antireflex-Beschichtung (ARC) versehen. Abbildung nicht maßstabsgetreu!

Es wurden mehrere Modellverbesserungen eingeführt:

- Durch Einführung eines objektorientierten Ansatzes wurde das Simulationsmodell flexibler und robuster gemacht. Simulationsstudien mit Variation von Parametern lassen sich damit deutlich einfacher durchführen.
- Die Inputdaten für die optische Schnittstelle Glassubstrat/Silikon im Primary Optical Element (POE) wurden so angepasst, dass die Reflexionsverluste korrekt den vorliegenden Brechungsindices entsprechen.
- Der Parallelisierungsansatz für das Ray Tracing wurde verbessert, wodurch insbesondere gewichtete Simulationen für das relevante Solarspektrum deutlich schneller durchgeführt werden können.

Konzentrationsmatrizen für verschiedene Sekundäroptiken

Um den Projektpartner AZUR SPACE bei der Auswahl einer neuen Sekundäroptik (SOE) zu unterstützen, wurde eine Raytracing-Studie mit dem überarbeiteten Simulationsmodell durchgeführt. Dabei wurden drei verschiedene Konfigurationen verglichen, die sich in der SOE-Geometrie, den SOE-Glaseigenschaften und der Zellgröße unterschieden:

- Referenzdesign „2020“: nominaler SOE-Glasbrechungsindex $n = 1,56$, Zellfläche = $(5,035 \text{ mm})^2$
- Design „2021, small“: $n = 1,52$, Zellfläche = $(5,035 \text{ mm})^2$
- Design „2021, large“: $n = 1,52$, Zellfläche = $(5,45 \text{ mm})^2$

Für jede Konfiguration wurden Vollspektrum-Simulationen für zwei verschiedene POE-Temperaturen (Betriebstemperatur 32 °C, Abformtemperatur 45 °C) und zwei verschiedene Verkippungen des Moduls (der optischen Achse des Moduls) gegen die Einstrahlrichtung (0°, 0.25° um beide Hauptachsen) durchgeführt. Auf Basis der Simulationsergebnisse wurde von AZUR die Konfiguration „2021, large“ für die weitere Entwicklung ausgewählt.

Exemplarisch sind in Abbildung 3 die Konzentrationsverteilungen auf der Zelle und auf einem größeren Schirm für die Betriebstemperatur 35 °C und die Verkippung 0.25° dargestellt, für die Konfiguration „2021, large“.

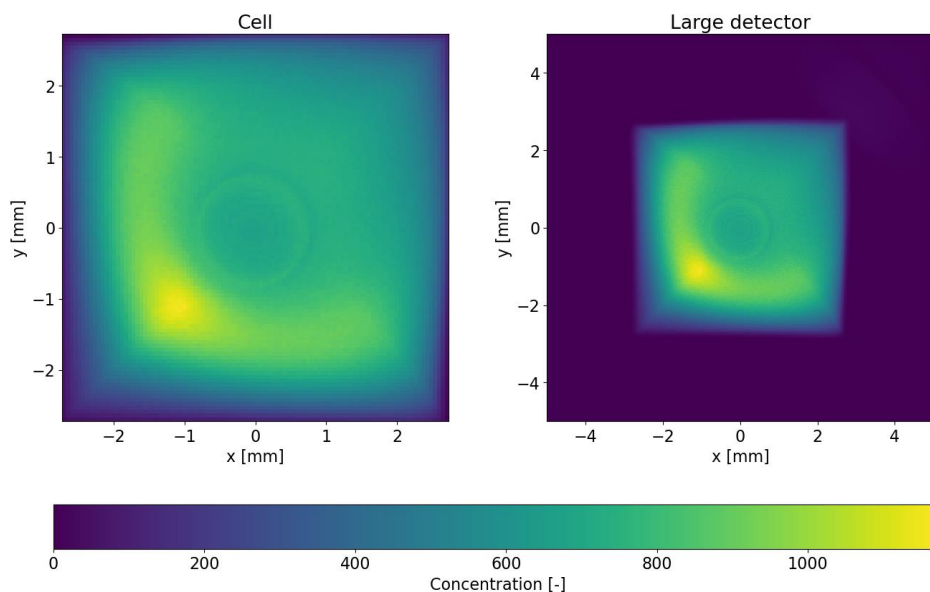


Abbildung 3: Konzentrationsverteilungen für Konfiguration "2021, large", POE-Temperatur 32 °C, Verkippung 0.25°.

Thermo-optisches Design der Primäroptik

Im Projekt wurden konturgefräste Wirkflanken der Primäroptik – also Wirkflanken, die nicht aufgrund des Herstellungsprozesses (abschnittsweise) flach sein müssen – untersucht. Die Idee ist, das Fresnellinsen-Profil entsprechend anzupassen, so dass die thermische Ausdehnung zwischen Abformtemperatur (hier 62 °C) und Betriebstemperatur (hier 32 °C) ausgeglichen wird. Dies erfolgt durch einen Temperaturvorhalt. Erst bei Betriebstemperatur (üblicherweise niedriger als die Abformtemperatur) stellt sich durch Schrumpfung dann eine Linsengeometrie ein, die nahe an der Idealform liegt. Eine Vorgabe ist dabei, dass die Störflanken der Fresnellinse (1° im Bereich der Linsen-Vollkreise, 2° im Außenbereich) bei Abformtemperatur flach sein müssen, damit eine saubere Entformung gewährleistet werden kann.

Ein mehrstufiger Designprozess wurde bei Fraunhofer ISE für diese Aufgabe etabliert:

1. Design eines Fresnellinsen-Idealprofils bei Betriebstemperatur 32 °C, Designmethode „constant height“ mit einer Profilhöhe von 0.35 mm; die nominale Brennweite bei einer Wellenlänge von 535 nm und 32 °C liegt bei 241 mm, gemessen von der Mitte der Fresnelstufen zur Brennebene.
2. Verformungsanalyse des Idealprofils für eine Temperaturdifferenz von 32 °C nach 62 °C mit Finite-Elemente (FEM)-Simulation in der Software COMSOL; das erwärmte Linsenprofil hat sowohl gekrümmte Wirk- als auch Störflanken.
3. Begradigung der aufgewärmten (62 °C) Störflanken durch Beschneiden mittels eines Pythonscripts; vom Tal des Linsenprofils wird in gerader Linie gemäß des vorgegebenen Störflankenwinkels (1° oder 2°) Material entfernt.
4. Verformungsanalyse des aufgewärmten und beschnittenen Profils für eine Temperaturdifferenz von 62 °C nach 32 °C mit FEM-Simulation; es wird angenommen, dass bei Betriebstemperatur das resultierende Profil im CPV-Modul vorliegt.

Beschreibung des FEM-Modells:

- Ein 2D-FEM-Modell (siehe Abbildung 4a) wurde verwendet und – unter Annahme von Axialsymmetrie – der diagonal größte Querschnitt des Linsenprofils simuliert, was eine Näherung für die tatsächliche Linsengeometrie mit rechteckiger Grundfläche darstellt. Die Simulation nutzt ca. 218000 Dreiecks-Elemente, welche im Bereich der Linsenkontur deutlich verdichtet sind (siehe Abbildung 4b).
- Das Glassubstrat der Silikon-auf-Glas-Fresnellinse wurde als Festlager-Randbedingung berücksichtigt.
- Ein dünner Silikonsockel zwischen dem eigentlichen Linsenprofil und dem Glassubstrat wurde im Modell integriert.
- Die Materialparameter des Silikons wurden als konstant angenommen (Elastizitätsmodul: 5.5 MPa, Poisson-Zahl: 0.49, linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient: 0.0003 1/K, Dichte 2000 kg/m³)
- Die bei der Verformung entstehenden thermischen Spannungen im Bauteil wurden beim Export aus der FEM-Simulation nicht berücksichtigt und somit im Beschneide- und Abkühlschritt vernachlässigt. Diese Annahme wird im Folgenden in Ray Tracing-Simulationen validiert.

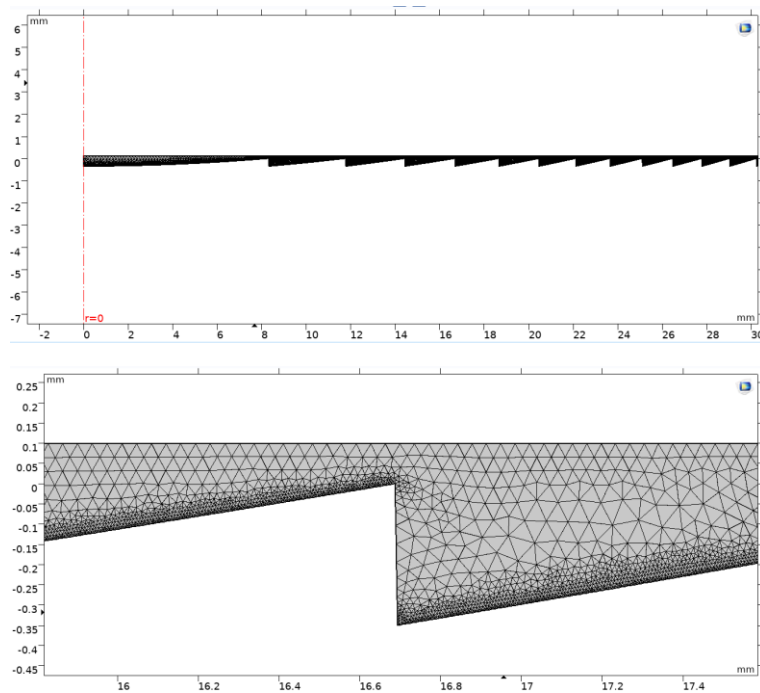


Abbildung 4: Großer Ausschnitt (a) und Detailansicht (b) des für die FEM-Verformungssimulation erzeugten Dreiecks-Netztes.

In Abbildung 5 ist der Vergleich des idealen Fresnellinsen-Profiles und des aus den Prozessschritten resultierenden Profils dargestellt.

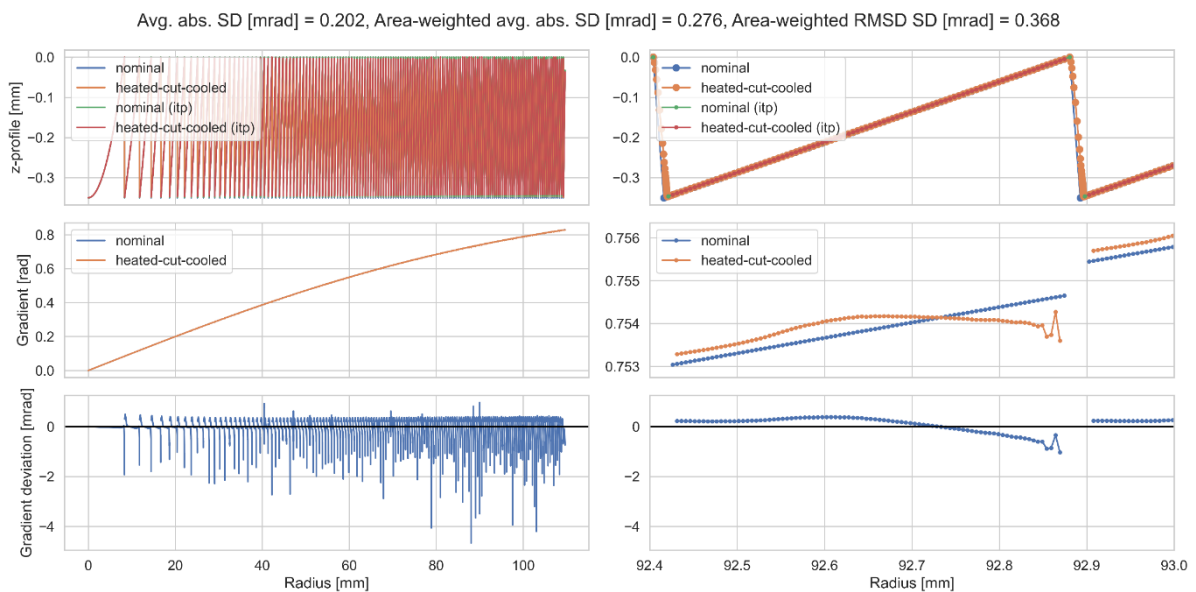


Abbildung 5: Darstellung von z-Profil (obere Reihe), Gradient (mittlere Reihe) und Gradientenabweichung vom Idealgradient (untere Reihe) des idealen Fresnellinsen-Profiles („nominal“) und des Profils nach allen Prozessschritten („heated+cut+cooled“). Darstellung über den gesamten Radius (linke Spalte) und Detailansicht bei Radius 92.4-93 mm (rechte Spalte).

Es ist ersichtlich, dass durch die Vernachlässigung der thermischen Spannungen beim Profilexport Gradientenabweichungen entstehen, die nicht die Realität repräsentieren und als numerisches Artefakt zu verstehen sind. Ein (nicht dargestellter) Testlauf „heated+cooled“ ohne Beschneideschritt („cut“) weist vergleichbare Abweichungen auf. Ferner zeigt die Detailansicht, dass aus dem Beschneide-

Schritt zur Störflanken-Begradigung bei Abformtemperatur eine Reduktion der Wirkflankenfläche und damit der effektiven Apertur bei Betriebstemperatur resultiert.

Um den Einfluss dieser Aspekte im CPV-Modul bewerten zu können, wurden die jeweils aus den Prozessschritten resultierenden Fresnellinsen-Profile mittels Ray Tracing in der Fraunhofer ISE-Software Raytrace3D [8] in das CPV-Modul integriert und in Vollspektrum-Simulationen optisch bewertet (siehe Abbildung 6). In diesen optischen Simulationen wurde außerdem die Temperaturabhängigkeit des Silikon-Brechungsindex mittels einer linearen, auf Messergebnissen basierenden Korrelation berücksichtigt.

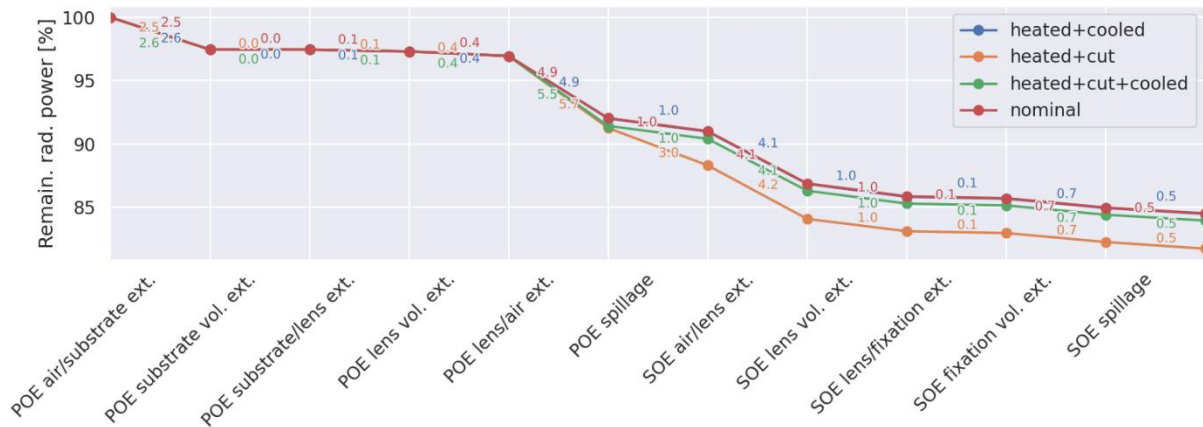


Abbildung 6: Vollspektrum-Simulation, Verluste und Effizienz in den verschiedenen Komponenten des optischen Systems. Vergleich für verschiedene POE-Fresnellinsen-Profile: ideale Linsengeometrie („nominal“), aufgewärmte+beschnittene Linsengeometrie („heated+cut“), aufgewärmte+beschnittene+abgekühlte („heated+cut+cooled“) Linsengeometrie, aufgewärmte+abgekühlte („heated+cooled“) Linsengeometrie als Vergleichsreferenz.

Der Vergleich der Ergebnisse für die ideale Linsengeometrie „nominal“ und die ausschließlich zu Validierungszwecken erstellte Variante „heated+cooled“ (ohne Beschneideschritt) zeigt, dass Verluste und optische Effizienz nahezu identisch sind. Damit ist nachgewiesen, dass die Vernachlässigung der thermischen Spannungen beim Export aus der FEM-Simulation keinen relevanten Effekt hat. Eine Reduktion der optischen Effizienz von 0.62 % ergibt sich im Vergleich der für Betriebstemperatur resultierenden Geometrie „heated+cut+cooled“ mit der Idealgeometrie „nominal“. Dies ist auf die Reduktion der effektiven Apertur durch den Beschneideschritt zurückzuführen. Abschließend kann durch den Vergleich der Profile „heated+cut“ und „heated+cut+cooled“ ein Temperatureffekt von mehr als 2 % aufgezeigt werden, was die Wichtigkeit des Temperaturvorhalts im Designprozess unterstreicht.

Toleranzuntersuchungen der Primäroptik

Für die Primäroptik Azur2 (und teilweise für Azur0) wurden verschiedene kombinierte Toleranzfälle und Abweichungen vom Idealdesign mittels Ray Tracing und thermischer FEM-Simulation untersucht. Diese betreffen:

- die Positionierung der Einheit aus Sekundärkonzentrator und Solarzelle (Enhanced Fresnel Assembly EFA) relativ zur Primäroptik (Primary Optical Element POE)
- Temperatureffekte am POE
- das Verbesserungspotential durch den Einsatz eines Anti-Reflective Coatings (ARC) auf dem Sekundärkonzentrator (Secondary Optical Element SOE)

Um Temperatureffekte der POE abzubilden, wurde einerseits die Temperaturabhängigkeit des Silikon-Brechungsindex über eine lineare Korrelation basierend auf Messdaten integriert. Andererseits wurde

die thermische Verformung der POE mittels eines FEM-Modells untersucht. Das Modell wurde in der kommerziellen Software COMSOL implementiert und ist in „Thermo-optisches Design der Primäroptik“ beschrieben. Ausgehend von einer Abformtemperatur von 45 °C (bei welcher die nominelle Linsenform vorliegt) wurde die Abkühlung und die resultierende Formänderung der POE auf 32 °C und auf 19 °C simuliert. Die POE-Linsendesigns *Azur0* und *Azur2* berücksichtigen keinen direkten Temperaturvorhalt, um Temperatureffekte bei Betriebstemperatur auszugleichen. Ein indirekter Temperaturvorhalt ist bei *Azur2* allerdings über die Brennweite vorgesehen worden.

Abbildung 7 zeigt die Geometrie und die Dimensionen der untersuchten Modul-Designs, sowie die variierten Größen. Nach Vorgaben von Azur wurden im Modell die SOE-Variante „2021, large“ und eine Solarzelle mit (5.45 mm)² abgebildet. Weiterhin ist hervorzuheben, dass die POE *Azur2* im Gegensatz zu *Azur0* eine rechteckige und keine quadratische Apertur hat, was die Ausnutzung von Symmetrien in der Simulation einschränkte.

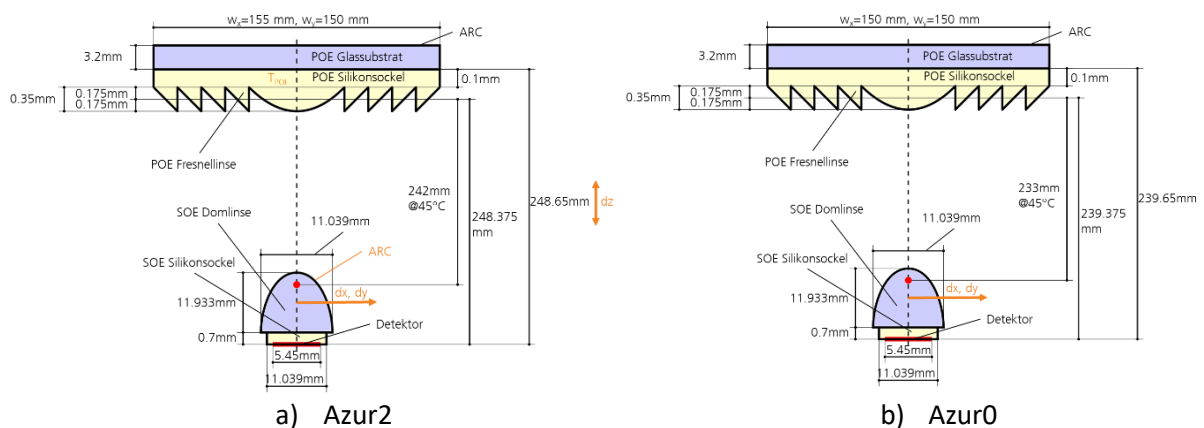


Abbildung 7: Haupt-Modulabmessungen für die Designs *Azur2* (a) und *Azur0* (b), nicht maßstabsgetreu. In orange eingezeichnet sind die variierten Größen Temperatur T_{POE} der POE, Modulhöhentoleranz dz , laterale EFA-Positionstoleranzen dx/dy und ARC auf der SOE.

Das entscheidende Ergebnis für Projektpartner AZUR SPACE sind die resultierenden spektralen Konzentrationsverteilungen auf und um die Zelle, die als Input für Netzwerksimulationen zur Berechnung des Stromertrags genutzt wurden. Bei Fraunhofer ISE wurden daher keine Auswertungen unter Berücksichtigung der spektralen Empfindlichkeit der Zelle vorgenommen. Um die Ergebnisse auf Plausibilität zu überprüfen und den Einfluss der Toleranzen auf die mit Sonnenspektrum gewichtete optische Effizienz (OE) und verschiedene Verlustkanäle zu untersuchen, wurden die Ergebnisse der verschiedenen Simulationsreihen im Folgenden grafisch aufbereitet.

Azur2, Verschiebung der EFA relativ zur Primäroptik

Abbildung 8 zeigt die Abhängigkeit der optischen Effizienz (OE) von Verschiebungen der EFA relativ zur POE. Da die POE-Apertur nicht quadratisch ist, liegt keine Symmetrie bezüglich dx/dy vor und die OE-Werte bei ($dx=2$ mm, $dy=0$ mm) und bei ($dx=0$ mm, $dy=2$ mm) sind nicht gleich.

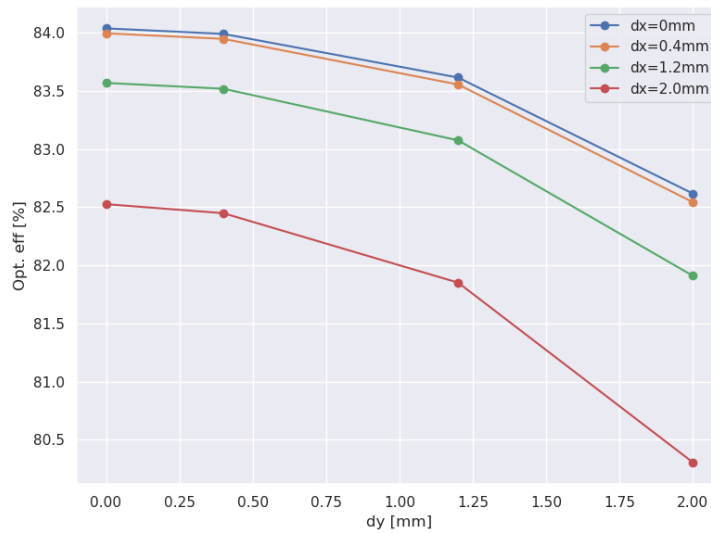


Abbildung 8: Azur2. Optische Effizienz als Funktion der lateralen Positionstoleranzen dx (Kurvenschar) und dy (hor. Achse) der EFA relativ zur POE. POE-Temperatur 32 °C, dz=0 mm, keine ARC auf der SOE.

Eine genauere Untersuchung bei Variation von dy ist in Abbildung 9 dargestellt. Verschiebungstoleranzen der EFA führen primär zu zusätzlichen Verlusten durch POE-Spillage (Strahlung von der POE verfehlt die SOE) und durch größere Fresnelreflektion an der SOE (andere Einfallswinkel).

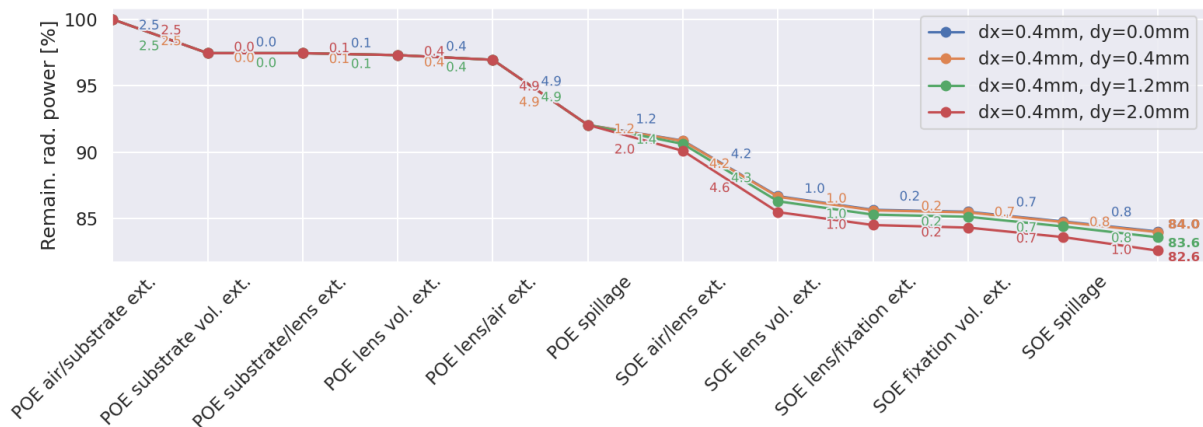


Abbildung 9: Azur2. Optische Effizienz und Verlustkanäle als Wasserfall-Diagramm für dx=0.4 und verschiedene dy Werte. POE-Temperatur 32 °C, dz=0 mm, keine ARC auf der SOE.

Azur2, Variation der POE-Temperatur bei festgelegtem EFA-Versatz

Durch Variation der POE-Temperatur ändern sich der POE-Silikon-Brechungsindex und die POE-Linsenform. Die Auswirkungen sind in Abbildung 10 dargestellt. Die Abkühlung von der nominalen Abformtemperatur (= 45 °C) führt einerseits zu größeren Verlusten am POE-Fresnellinse/Luft-Interface, was durch die Verformung der Störflanken und eine daraus resultierende vergrößerte Störflankenapertur bewirkt wird. Andererseits führt die Abkühlung zu einer Brechungsindex- und Brennweitenänderung und zu einer leichten Verformung der Wirkflanken, was deutlich vergrößertes POE-Spillage induziert.

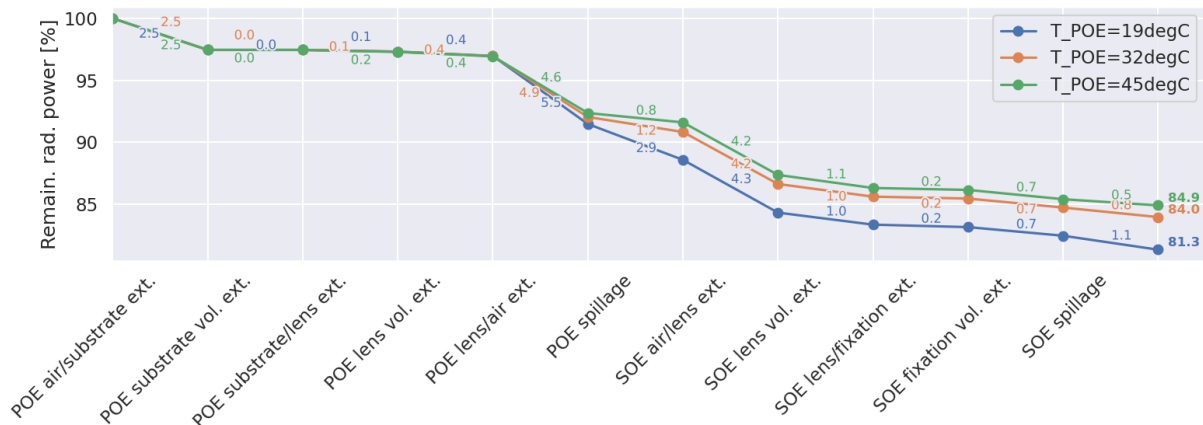


Abbildung 10: Azur2. Optische Effizienz und Verlustkanäle als Wasserfall-Diagramm für POE-Temperaturvariation. $dx=dy=0.4$ mm, $dz=0$ mm, keine ARC auf der SOE.

Eine separate Sensitivitätsanalyse zeigte, dass das Maximum der optischen Effizienz bei 32 °C vorliegt, wenn die Modulhöhe genau dem nominalen Wert entspricht (Modulhöhentoleranz = 0 mm). Bei 45 °C liegt das Maximum bei einer leicht größeren Modulhöhe (Modulhöhentoleranz = 2 mm), was die Wirksamkeit des Temperaturvorhalts in der Brennweite aufzeigt.

Azur2, Variation der Modulhöhe und der EFA-Verschiebung

Die Auswirkungen der Änderung der Modulhöhentoleranz dz sind in Abbildung 11 visualisiert. Da sich positive und negative Effekte bei POE- und SOE-Spillage in etwa die Waage halten, ist der Einfluss auf die OE für den betrachteten Parameterbereich vergleichsweise klein. Es kann konstatiert werden, dass das Design bezüglich Modulhöhentoleranzen insensitiv ist.

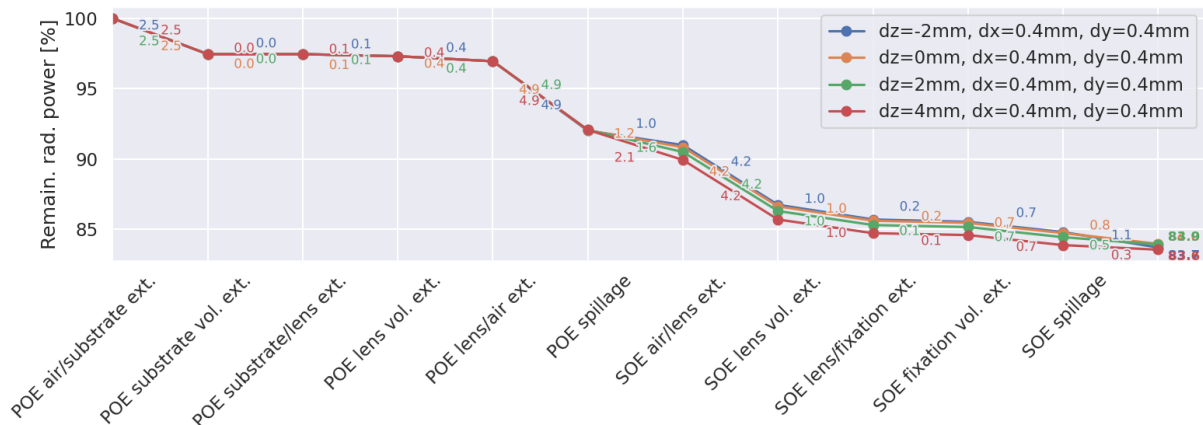


Abbildung 11: Azur2. Optische Effizienz und Verlustkanäle als Wasserfall-Diagramm für eine Variation der Modulhöhentoleranz dz und EFA-Verschiebung $dx=dy=0.4$ mm. POE-Temperatur 32 °C, keine ARC auf der SOE.

Für jeden Wert von dz wurden außerdem mehrere Kombinationen von dx/dy betrachtet, hier jedoch nicht als separate Abbildung dargestellt.

Azur2, ARC auf SOE bei Variation der Modulhöhe

Für die SOE wurde ein Einzelschicht-ARC basierend auf Magnesiumfluorid (MgF2) für eine Designwellenlänge von 550 nm ($n_{MgF2}(550\text{ nm}) = 1.3785$) berechnet. Die optimale Schichtdicke für vollständige Auslöschung der reflektierten Strahlung bei orthogonalem Strahlungseinfall ist $th_{ARC}=99.745\text{ nm}$. In Abbildung 12 ist der Einfluss einer ARC-Schichtdicken-Variation im Bereich des Designwerts gezeigt. Es zeigt sich, dass die idealisierte Rechnung für orthogonalen Einfall eine gute Näherung darstellt und die tatsächlich optimale Schichtdicke mit ca. $th_{ARC}=115\text{ nm}$ nur geringfügig abweicht. Generell ist die Sensitivität bezüglich der Schichtdicke im betrachteten Bereich nicht sehr stark, was für den ARC-Fertigungsprozess vorteilhaft ist, da sich die Genauigkeitsanforderungen reduzieren.

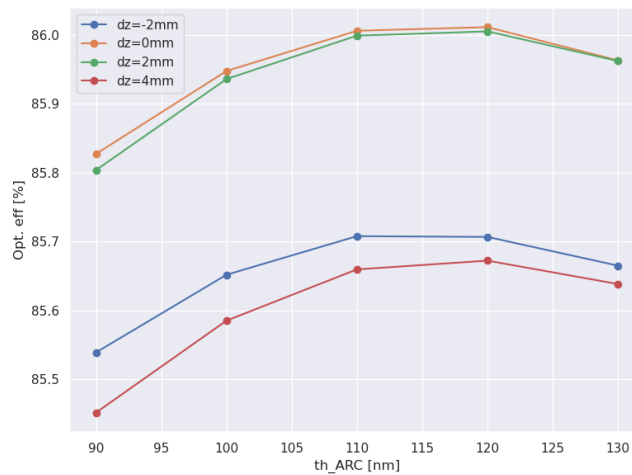


Abbildung 12: Azur2. Optische Effizienz als Funktion der ARC-Schichtdicke (hor. Achse) und der Modulhöhentoleranz dz (Kurvenschar). POE-Temperatur 32 °C, dx=dy=0.4 mm.

Azur0, Verschiebung der EFA relativ zur Primäroptik

Die zusätzliche Untersuchung von Azur0 war wichtig, um Vergleiche mit Messungen möglich zu machen. Abbildung 13 zeigt die Abhängigkeit der OE von Verschiebungen der EFA relativ zur POE. Durch die quadratische Apertur von Azur0 konnten weitere Symmetrien in der Simulation ausgenutzt werden.

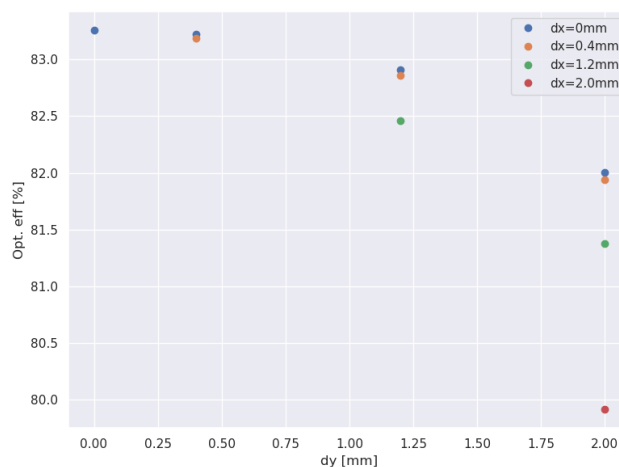


Abbildung 13: Azur0. Optische Effizienz als Funktion der lateralen Positionstoleranzen dx (Kurvenschar) und dy (hor. Achse) der EFA relativ zur POE. POE-Temperatur 32 °C, dz=0 mm, keine ARC auf der SOE.

In Abbildung 14 ist ein Vergleich der POE-Varianten *Azur0* und *Azur2* dargestellt. Durch Verwendung von *Azur2* kann die OE um etwa 0.8%-Punkte gesteigert werden, was primär auf einen kleineren Störflankenwinkel von 1° bei *Azur2* (1.5° bei *Azur0*) zurückgeführt werden kann (niedrigere Verluste am POE-Fresnellinse/Luft-Interface). Durch die insgesamt größere, rechteckige Aperturfläche sind auch der Strahlungsfluss und die Konzentration höher.

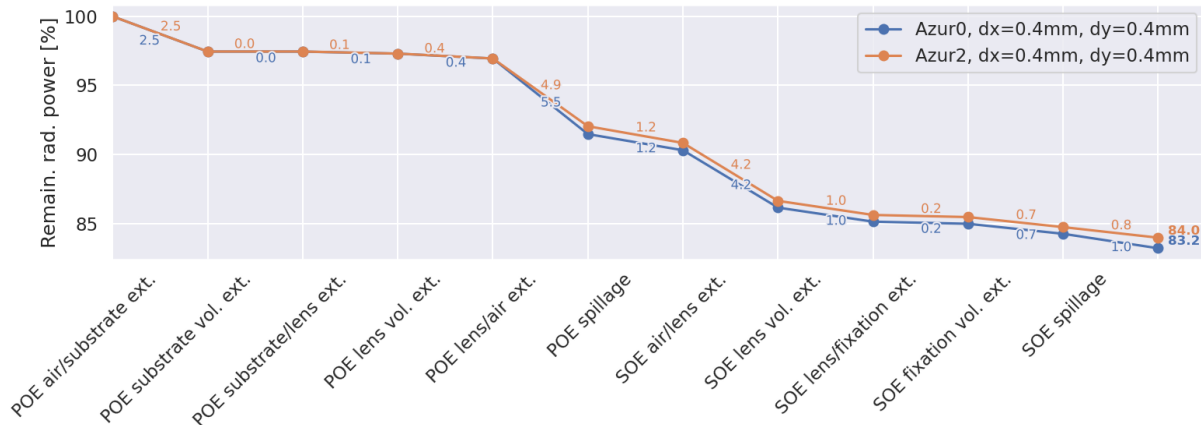


Abbildung 14: Vergleich *Azur2* und *Azur0*. Optischen Effizienz und Verlustkanäle als Wasserfall-Diagramm. POE-Temperatur 32 °C, dx=dy=0.4 mm, dz=0 mm, keine ARC auf der SOE.

AP1.2: Weiterentwicklung der Messmethoden f. 5J (AZUR/ISE)

Die Arbeiten in Unterarbeitspaket AP1.2 am Fraunhofer ISE beinhalteten neben der eigentlichen Durchführung von Messung auch die Erweiterung der Messmöglichkeiten, um einerseits Solarzellenmessungen im Labor bei mindestens 90 °C zu ermöglichen (siehe diesen Abschnitt weiter unten) und andererseits am Außenmessplatz CPV-Module mit Fünffachsolarzellen mit Ausgangsspannungen von über 300 V präzise vermessen zu können (die Modulmessungen in AP4 wurden mit der neuen elektronischen Last durchgeführt).

Zu Beginn des Projektes wurden am Fraunhofer ISE zwei Fünffachsolarzellen (5J) von AZUR SPACE unter hohen Einstrahlungen vermessen. Es zeigte sich eine Abweichung im gemessenen Wirkungsgrad von 3.2 %_{relativ}. Die Hauptursache ist im Strom zu finden, der 2 % der Abweichungen erklärt. Es fanden intensive Diskussionen statt, mit dem Ziel die Abweichungen in den Messungen zu verstehen und zu verkleinern. Ein Hauptaugenmerk lag auf der Kalibrierung des Stromes der Solarzellen. Konsequenterweise fokussierten sich die Arbeiten am Fraunhofer ISE daher im Folgenden primär auf den Punkt „Isotype Messungen“, um AZUR SPACE bestmöglich passende Referenzsolarzellen zur Verfügung zu stellen. Mehrere Sets von Komponentensolarzellen (englisch auch Isotypes genannt) wurden im Rahmen des Projektes am Fraunhofer ISE kalibriert und AZUR SPACE inklusive Messergebnisse übergeben zur Nutzung als Kalibrierstandard für die IV-Messungen dort.

Neben der Externen Quanteneffizienz (EQE) und der Strom-Spannungskennlinie (IV) bei Standardtestbedingungen lag ein Augenmerk auf der Überprüfung der Linearität der Komponentensolarzellen, da diese bei AZUR SPACE auch als Einstrahlungssensor unter Konzentration verwendet werden sollen. Die Untersuchung der Linearität am Fraunhofer ISE wurde dabei mit unterschiedlichen Messmethoden untersucht. Zum einen wurden EQE Messungen bei unterschiedlich starker Biasbestrahlung durchgeführt (siehe Abbildung 15). Für eine lineare Solarzelle darf sich die EQE nicht verändern, wenn die zusätzliche Biasbestrahlung variiert wird. Diese Messmethode eignet sich speziell für niedrige Bestrahlungsstärken bis maximal wenige Sonnenäquivalente, da bei höheren Biasbestrahlungen

aufgrund von ungünstigerem Signal-Rausch-Verhältnis die EQE Messung nicht mehr sinnvoll möglich ist.

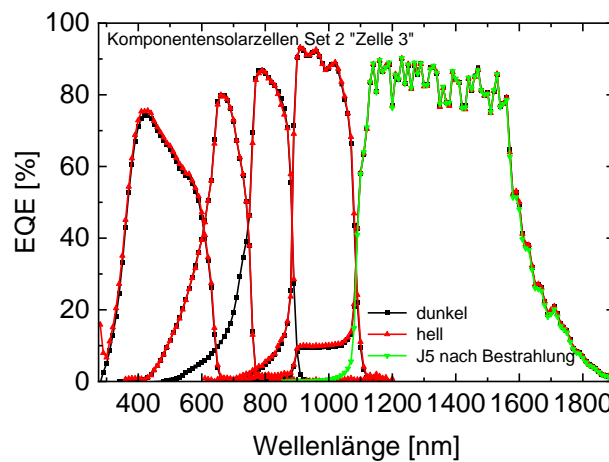


Abbildung 15: EQE Messungen der Komponentenzellen von „Set2“ unter Variation der Biasbestrahlungsstärke (es wurde jeweils „Zelle 3“ jedes Solarzellentyps gemessen). Gezeigt sind die Messungen ohne Biaseinstrahlung (dunkel) sowie maximaler Biaseinstrahlung (ca. 130 mA/cm²). Lediglich für die J1 zeigt sich eine merkliche Änderung (Zunahme) der EQE mit Biasbestrahlung. Für die J5 ist eine zusätzliche Messkurve nach Bestrahlung mit Elektronen gezeigt. Durch die Bestrahlung mit Elektronen wurde gezielt das J4 Filtermaterial degradiert, um den Photonrecycling Anteil in der J5 EQE zwischen 900 und 1100 nm zu beseitigen.

Wie aus Abbildung 15 ersichtlich, zeigt in erster Linie nur die J1 Zelle ein merkliches Anzeichen für eine Nichtlinearität. Da wie oben erwähnt diese Methode sich lediglich für kleine Bestrahlungsstärken einsetzen lässt, wurde für höhere Bestrahlungsstärken daher das bekannte Superpositionsprinzip angewandt: Für mehrere Lichtquellen L₁, L₂...L_n muss gelten, dass die Summe der Ströme, die von den einzelnen Lichtquellen generiert werden, gleich dem Strom ist, den die Solarzelle generiert, wenn sie von allen Lichtquellen gleichzeitig beleuchtet wird:

$$I_{sc}(L_1) + I_{sc}(L_2) + \dots + I_{sc}(L_n) = I_{sc}(L_1 + L_2 + \dots + L_n)$$

Es wurde mit drei Lichtleitern gearbeitet, die einzeln abgeschattet werden konnten (es handelt sich dabei um die ungefilterten Lichtleiter der Biasbeleuchtung des EQE Gittermonochromatormessplatzes GiMo). Dieser Ansatz zeigte sich in früheren Experimenten als sehr zuverlässig und belastbar. Zusätzlich zu den fünf Komponentenzellen J1 bis J5, wurde auch eine als linear erwartete ungefilterte GaAs Solarzelle als Referenz mit vermessen. In Abbildung 16 sind links beispielhaft die Messwerte für die GaAs Referenz und die J1 Komponentenzelle gezeigt, sowie rechts die Abweichungen der letzten Spalte der Tabelle gegen Konzentration. Wichtig dabei: die Abweichungen von der Linearität gelten nur für den Einzelschritt und sind nicht aufsummiert.

C1759-1	L1 [mA]	L2 [mA]	L3 [mA]	sum [mA]	All [mA]	All / Summe
Isc@AM1.5	0.1193	0.0322	0.0516	0.2031	0.2031	1.000
- 1.1mA	0.6133	0.1710	0.3083	1.0926	1.0927	1.000
	0.6391	0.2926	0.2994	1.2311	1.2300	0.999
	1.7494	0.4987	0.9663	3.2144	3.2170	1.001
	2.3499	1.1052	1.265	4.7201	4.7112	0.998
	4.4446	2.1133	2.555	9.1129	9.1038	0.999
	9.6266	4.6350	5.9770	20.2386	20.2880	1.002
	20.4190	9.9680	13.7100	44.0970	44.1230	1.001
2496-018-J1	L1 [mA]	L2 [mA]	L3 [mA]	sum [mA]	All [mA]	All / Summe
Isc@1sun	0.27055	0.26907	0.27183	0.8115	0.81311	1.002
- 2.41mA	0.804	0.79626	0.8277	2.4280	2.4351	1.003
	2.388	2.361	2.5146	7.2636	7.301	1.005
	5.821	7.2334	8.2255	21.2799	21.4	1.006
	13.55	16.795	19.33	49.6750	50.246	1.011

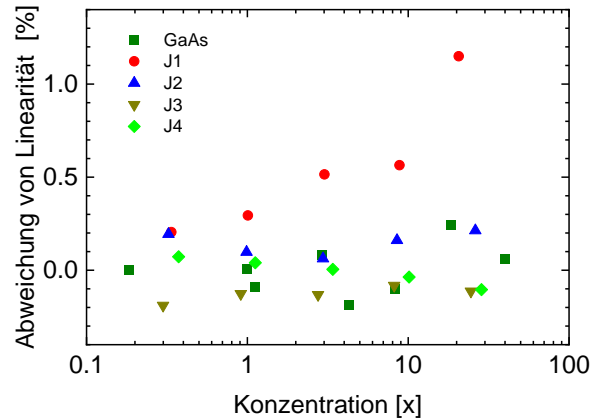


Abbildung 16: Links: Es sind beispielhaft die Messwerte für die GaAs Referenz und die J1 Komponentenzelle in Tabellenform gezeigt. Rechts: Abweichungen der letzten Spalte der Tabelle gegen Konzentration. Die Abweichungen von der Linearität gelten nur für den Einzelschritt und sind nicht aufsummiert.

Die Messungen zeigen, dass im Konzentrationsbereich bis 30x lediglich die J1 Zelle eine signifikante Abweichung vom linearen Verhalten zeigt, die sich mit den EQE Messungen oben deckt.

Temperaturabhängige Solarzellenmessungen

Die Temperierung von Solarzellen bei Labormessungen auf dem Messblock wird am Fraunhofer ISE üblicherweise mit Hilfe von Peltierelementen realisiert. Die Temperatur der Rückseite der Peltierelemente wird dabei mittels Wasserdurchfluss konstant gehalten. Die Messplätze im Kalibrierlabor sind dabei an das Hauskühlwasser (~17 °C) angeschlossen. Da herkömmliche Peltierelemente in der Regel eine maximale Temperaturdifferenz zwischen Vorder- und Rückseite von ca. 60 K erlauben, ist die maximal erreichbare Messblocktemperatur auf ca. 75 °C limitiert. Dieses Limit lässt sich umgehen, indem die Temperatur auf der Rückseite der Peltierelemente erhöht wird. Hierfür wurde im Rahmen des Projektes ein Umwälztemperierbad beschafft, mit dem die maximale Wassertemperatur nun nur noch materialseitig (Schläuche und Verbindungen) auf ca. 80 °C begrenzt ist. Ebenso ist die maximale Messblocktemperatur nun nicht mehr geräteseitig begrenzt, sondern aufgrund der im Messblock verwendeten Kunststoffe auf ca. 90 – 100 °C. An allen relevanten Messplätzen wurden Schnellverschlüsse integriert, womit nun ein einfacher Wechsel von Hauskühlwasser auf Umwälztemperierbad möglich ist. Es konnten im Rahmen des Projektes hiermit wie geplant Solarzellenmessungen bei 90 °C durchgeführt werden.

Neben gezielten Messungen bei 25 und 90 °C wurde im Rahmen des Projektes auch eine Masterarbeit zu temperaturabhängigen Messungen von Mehrfachsolarzellen betreut (Theodore Sowah, Solar Energy Engineering Studiengang an der Universität Freiburg). Die im Rahmen der Masterarbeit verwendete Fünffachsolarzelle Q5-25 wurde von AZUR SPACE zur Verfügung gestellt. Zum besseren Handling für die Messung war die Solarzelle auf einem Keramiks substrat montiert. Außerdem wurde zum Schutz der Solarzelle gegen während der Messungen eventuell auftretende negative Spannungen eine Bypassdiode angeschlossen. Folgende Messungen wurden jeweils bei Temperaturen von 25, 50, 70 und 90 °C durchgeführt:

- Externe Quanteneffizienz EQE
- Strom-Spannungskennlinie bei „einer Sonne“ AM1.5d, mit dem X-Sim Sonnensimulator
- Konzentrationsabhängige Strom-Spannungskennlinien mit dem QuadFlash Messplatz
- Spektral aufgelöste Elektrolumineszenz (EL) zur Bestimmung der Zellspannungen

Exemplarisch sind im Folgenden einige der Ergebnisse aufbereitet.

Externe Quanteneffizienz – EQE

Die EQE der Solarzelle Q5-25 wurde am Gittermonochromatormessplatz im ISE Callab gemessen (siehe Abbildung 17, links). Die EQE's wurden im anschließenden Schritt zur Spektralkorrektur an den Sonnensimulatormessplätzen verwendet. Durch die Verwendung der bei der eingestellten Temperatur gemessenen EQE werden Messunsicherheiten bei erhöhter Solarzellentemperatur minimiert. Aus den gemessenen EQE's können zusätzlich die Stromdichten der Teilzellen bestimmt werden (siehe Abbildung 17, rechts).

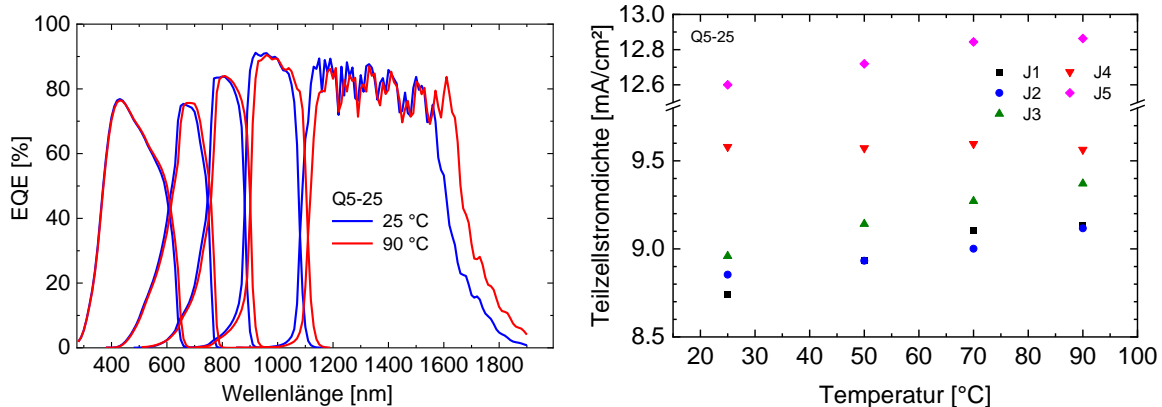


Abbildung 17: Links exemplarisch gezeigt sind die gemessenen EQE's der Fünffachszelle Q5-25 bei niedrigster und höchster Temperatur (25 und 90 °C). Rechts: Teilzellströme gegen Temperatur bestimmt aus EQE – beachte die Unterbrechung der y-Achse. Es zeigt sich, dass die Fünffachzelle bei hohen Temperaturen – wie geplant – besser stromangepasst ist als bei niedrigen Temperaturen. Unter Berücksichtigung der Moduloptik ergibt sich bei 90°C eine nahezu eine Stromanpassung der obersten 4 Teilzellen im Modul.

Die Teilzellstromdichten in Abbildung 17 (rechts) verdeutlichen anschaulich, wie das Designziel der Solarzelle erreicht wurde. Die Germaniumteilzelle J5 hat immer einen hohen Überschussstrom, der auch nicht wesentlich beeinflusst werden kann. Für die oberen vier Teilzellen war daher das Ziel die Solarzelle für hohe Temperaturen zu optimieren. D.h. eine bessere Stromanpassung zwischen den Teilzellen bei hohen Temperaturen zu realisieren als bei 25 °C (entsprechend Standardtestbedingungen). Bei 90 °C sind die beiden oberen Teilzellen J1 und J2 nahezu stromangepasst und J3 und J4 zeigen einen wesentlich niedrigeren Überschussstrom als bei 25 °C, welcher gerade die höhere optische Effizienz des Moduls im Bereich der J1 und J2 kompensiert – die Solarzelle ist daher wie geplant für optimales Verhalten unter hohen Temperaturen angepasst.

Strom-Spannungskennlinien bei einer Sonne AM1.5d (1000 W/m²)

Die Messungen bei einer Sonne AM1.5d (1000 W/m²) wurden am Sonnensimulator X-Sim durchgeführt. Der Simulator verfügt über sechs spektral variable Lichtkanäle, die automatisiert in der Intensität variiert werden können. Zudem verfügt der Messplatz über zwei in der Intensität fixen Boostkanälen, die jedoch in erster Linie bei Messungen unter Weltraumbedingungen zum Einsatz kommen. Mit den sechs Lichtkanälen kann für die Fünffachszelle von AZUR SPACE bei allen Teilzellen die Stromdichte analog zu AM1.5d Bedingungen eingestellt werden. In der folgenden Abbildung 18 sind die IV-Kennlinien bei einer Sonne AM1.5d sowie die normierten IV-Parameter Leerlaufspannung V_{OC} , Füllfaktor FF und maximale Leistung P_{MPP} gezeigt.

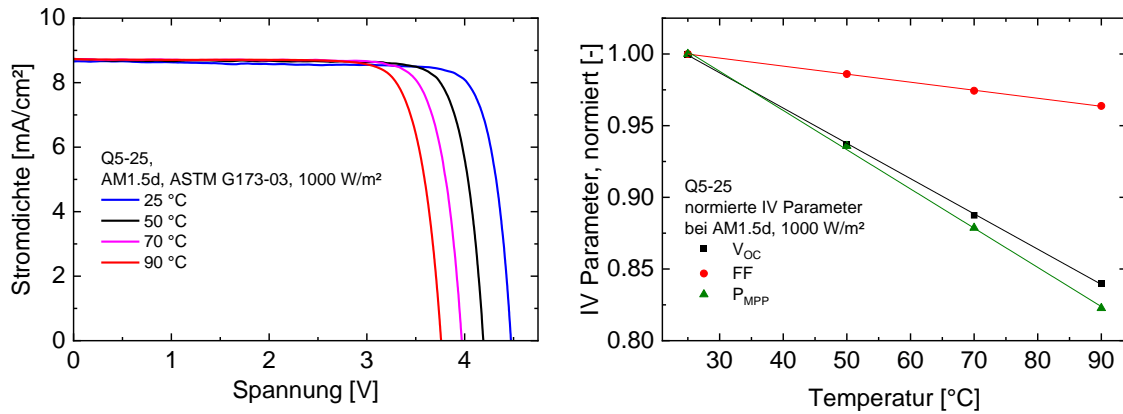


Abbildung 18: Links: IV-Kennlinien der Fünffachsolarzelle Q5-25 bei einer Sonne, gemessen am X-Sim Messplatz. Rechts: IV Parameter Leerlaufspannung V_{OC} , Füllfaktor FF und maximale Leistung P_{MPP} jeweils normiert auf ihren Maximalwert bei 25 °C.

Die IV-Parameter in der Abbildung 18 (rechts) legen im betrachteten Temperaturbereich einen linearen Zusammenhang mit Temperatur nahe – Temperaturkoeffizienten wurden mittels linearer Regression bestimmt. Quantitative Ergebnisse werden am Ende des nachfolgenden Abschnitts angegeben zusammen mit den Ergebnissen der Messung unter Konzentration gezeigt.

Messungen unter Konzentration

Die IV-Messungen bei hohen Intensitäten wurden am QuadFlash Messplatz durchgeführt. Da für jede Temperatur eine separate Spektralkorrektur durchgeführt wurde, fanden die Messungen bei den unterschiedlichen Temperaturen nicht bei exakt der gleichen Konzentration statt. Daher wurden im Anschluss die Messwerte mittels linearer Interpolation (in Auftragung gegen logarithmische x-Achse) auf gleiche Konzentrationswerte interpoliert – siehe Abbildung 19. Im Rahmen der Masterarbeit wurden die Messungen wie allgemein üblich unter dem Normspektrum AM1.5d durchgeführt, was den Vorteil einer bewährten Systematik und Vergleichbarkeit bietet. Allerdings ist die Zelle nicht für den Einsatz unter 25°C unter dem Normspektrum in Luft optimiert, wodurch sich der moderate Spitzenwirkungsgrad von 41% in Abbildung 19 erklärt. Ihre eigentliche Qualität zeigt die Solarzelle im realen Einsatz im Modul.

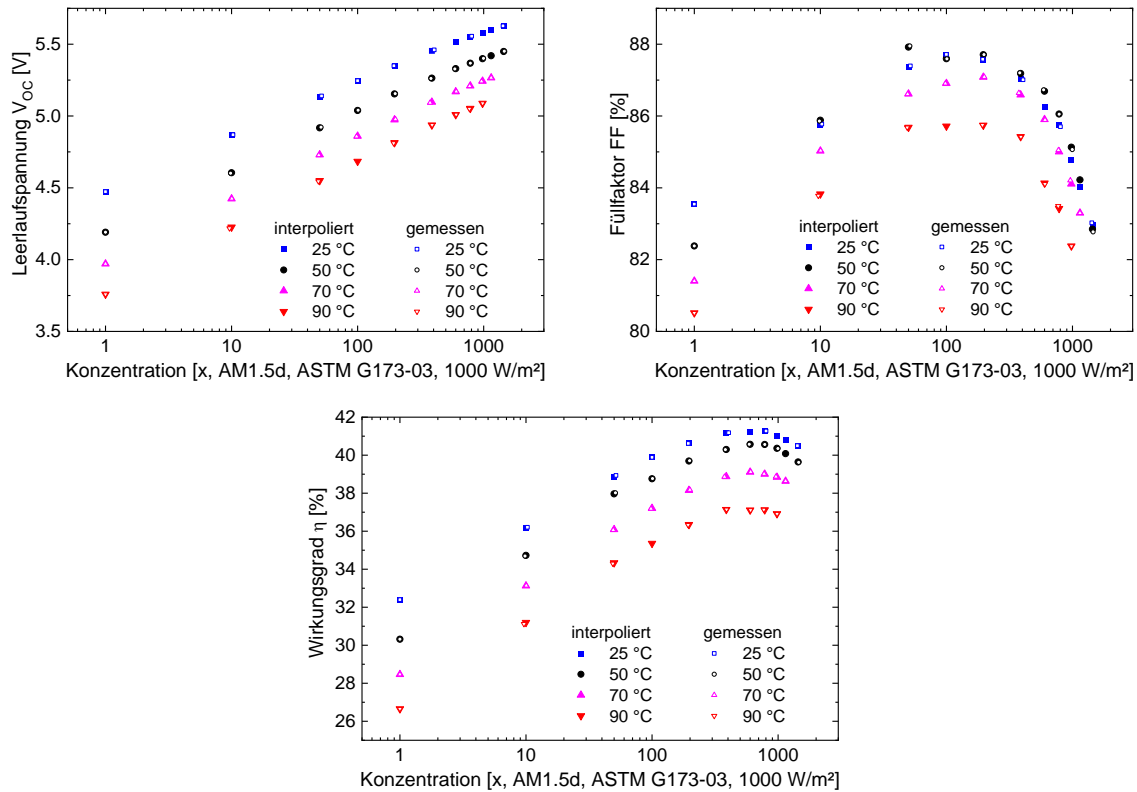


Abbildung 19: IV-Parameter aufgetragen gegen Konzentration bei 25, 50, 70 und 90 °C. Die offenen Symbole entsprechen den gemessenen Werten und die gefüllten Symbole den interpolierten Werten. Diese wurden in der semi-logarithmischen Auftragung (wie in den Abbildungen) durch lineare Interpolation bestimmt. Bei einer Sonne liegen gemessene und interpolierte Werte übereinander. Links oben: Leerlaufspannung V_{oc} , rechts oben Füllfaktor FF, unten: Wirkungsgrad η . Die Zelle wurde nicht für den Einsatz unter AM1.5d bei 25°C optimiert. Dies erklärt den moderaten Wirkungsgrad von 41% unter Normbedingungen.

Die Beleuchtungseinheit des QuadFlash Messplatzes besteht aus vier voneinander unabhängig in der Intensität variierbaren Blitzröhren, die mit unterschiedlichen optischen Filtern ausgestattet sind und synchron gezündet werden können. Die Tatsache, dass der Messplatz lediglich vier spektral unterschiedliche Lichtquellen, die Fünffachszelle jedoch fünf Teilzellen aufweist, hat zwei direkte Auswirkungen auf die Messungen bei variierter Temperatur: Einerseits kann nicht erwartet werden, dass das Verhältnis der Teilzellströme für alle fünf Teilzellen analog AM1.5d eingestellt werden kann. Zudem ist davon auszugehen, dass sich diese Stromfehlanspassung mit Solarzellentemperatur und damit ändernden EQE und Absorptionsverhalten wiederum selbst ändern wird. Bei der Spektralkorrektur für die Messungen am QuadFlash bestätigten sich diese Annahmen. Dabei ergab sich bei allen Temperaturen, dass die oberen vier Teilzellen J1 bis J4 den designierten Strom bei der entsprechenden Temperatur generieren werden. Ebenso hatte bei allen berechneten Einstellungen des QuadFlash Messplatzes die fünfte Teilzelle J5 einen Überschussstrom, wie es auch bei AM1.5d Bedingungen der Fall ist (vergleiche Abbildung 17). Die Höhe des Überschussstromes der J5 Teilzelle weicht jedoch in allen Fällen von AM1.5d Bedingungen ab und die Höhe dieser Abweichung wiederum variiert mit der eingestellten Solarzellentemperatur.

In Abbildung 20 (links) sind Überschussströme der Teilzelle J5 bei AM1.5d und am QuadFlash Messplatz für die vier betrachteten Temperaturen gezeigt (jeweils prozentual bezogen auf die strombegrenzende Teilzelle). Abbildung 20 (rechts) zeigt die am QuadFlash gemessenen Füllfaktoren im Vergleich zum Füllfaktor bei einer Sonne (gemessen mit AM1.5d entsprechender Stromanpassung für alle Teilzellen,

inklusive J5). Dabei wurden der besseren Erkennbarkeit wegen einzelne Konzentrationen ausgelassen. Der Verlauf gegen Temperatur ist jedoch bei allen Konzentrationen sehr ähnlich.

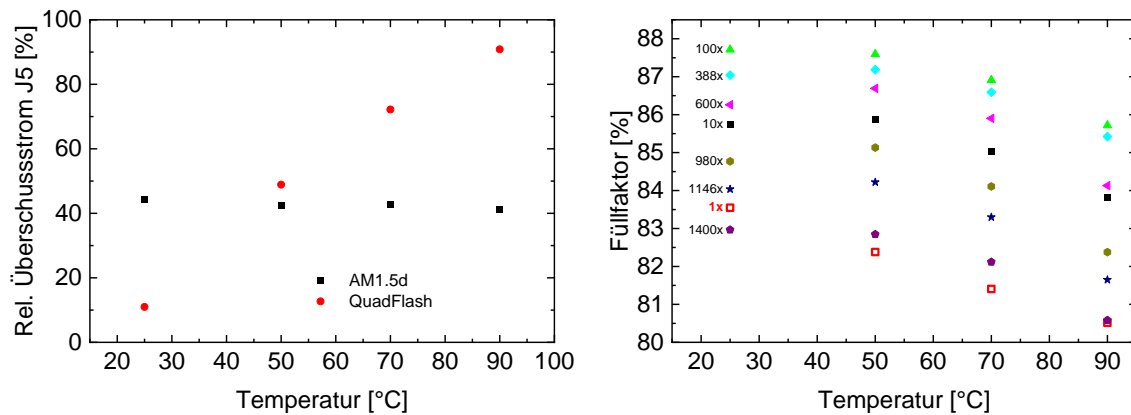


Abbildung 20: Links: Prozentualer Überschussstrom der Germanium Teilzelle J5 bezogen jeweils auf die strombegrenzende Teilzelle (vergleiche Abbildung 17, rechts: J1 bei 25 °C, J2 bei 50, 70 und 90 °C). Im Gegensatz zu AM1.5d, wo der Überschussstrom der J5 Teilzelle zwischen 41 und 44 % liegt, steigt dieser Wert am QuadFlash von 11 % bei 25 °C auf 91 % bei 90 °C. Rechts: Verlauf des gemessenen Füllfaktors gegen Temperatur bei verschiedenen Konzentrationen (es wurden zur besseren Erkennbarkeit einzelne gemessene Konzentrationen ausgelassen, der Verlauf bei diesen ist analog zu den gezeigten Daten).

Wie aus Abbildung 20 ersichtlich, variiert der Überschussstrom am QuadFlash Messplatz stark mit der Solarzellentemperatur (11 % bei 25 °C, 91 % bei 90 °C), wohingegen dieser bei AM1.5d wesentlich weniger schwankt (41 bis 44 %). Dies hat Auswirkungen auf den gemessenen Füllfaktor (siehe Abbildung 20, rechts): Während sich bei einer Sonne (X-Sim Messung mit AM1.5d entsprechendem J5 Strom, offene rote Quadrate) ein linearer Verlauf des Füllfaktors ergibt, weisen alle Messungen unter Konzentration eine „Verbiegung“ auf. Würde man einen linearen Verlauf ansetzen, so könnte dieser erreicht werden, indem die Werte bei 25 °C leicht nach oben, die Werte bei 70 und 90 °C leicht, bzw. etwas mehr nach unten verschoben würden. Dies würde dem Einfluss des nicht zu AM1.5d passenden J5 Teilzellstrom entsprechen. Der Überschussstrom in J5 führt zu einer Erhöhung des Füllfaktors der Fünffachszelle, da eine Teilzelle mit Überschussstrom am MPP der Fünffachzelle bei einer Spannung oberhalb ihres eigenen Teilzell-MPP’s betrieben wird. Diese Erhöhung des Füllfaktors fällt am QuadFlash bei 25 °C zu niedrig aus (weniger Überschussstrom in J5 als bei AM1.5d), bei 50 °C ähnlich wie bei AM1.5d, bei 70 und 90 °C jedoch höher als bei AM1.5d (deutlich zu hoher Überschussstrom im Vergleich zu AM1.5d). Dies erklärt zumindest phänomenologisch den gemessenen nicht-linearen Verlauf des Füllfaktors in Abbildung 20 (rechts). Aus diesem Grund wurde im Folgenden für den Füllfaktor kein Temperaturkoeffizient bestimmt. Ansonsten wurden mittels linearer Regression gegen Temperatur die Temperaturkoeffizienten (TK) der Leerlaufspannung und des Wirkungsgrades gegen Konzentration bestimmt. Zusätzlich zu den so ermittelten Temperaturkoeffizienten in absoluten Werten (mV/K und %_{abs}/K) wurden relative Temperaturkoeffizienten (in %_{rel}/K) berechnet, wobei die Normierung mit dem jeweiligen Wert der Leerlaufspannung, bzw. des Wirkungsgrades bei 25 °C erfolgte. Die auf diese Art bestimmten Temperaturkoeffizienten sind in Abbildung 21 gegen Konzentration aufgetragen.

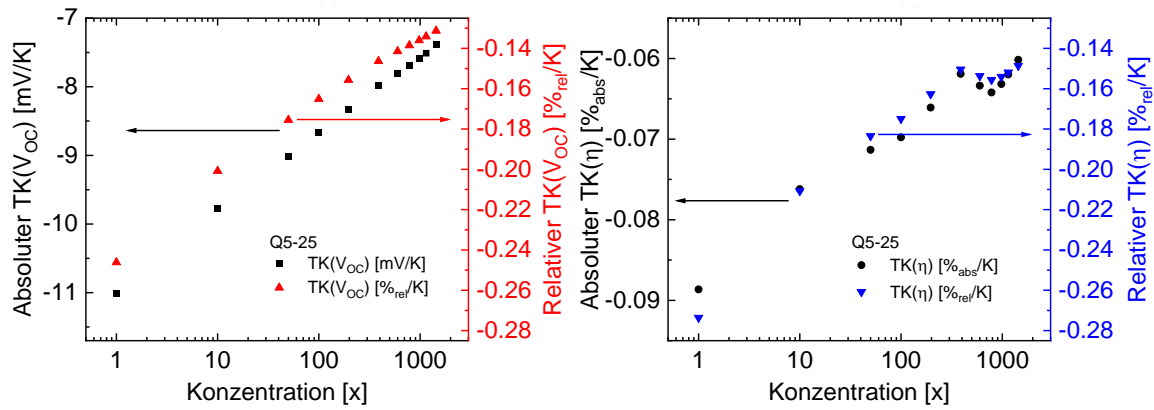


Abbildung 21: Temperaturkoeffizienten aufgetragen gegen Konzentration. Die linke y-Achse zeigt jeweils den TK in absoluten Werten (mV/K, bzw. %_{abs}/K), wohingegen die rechte x-Achse den TK in relativen Werten zeigt (in %_{rel}/K, normiert jeweils mit dem entsprechenden Wert bei 25 °C).

Die in Abbildung 21 gezeigten Temperaturkoeffizienten verdeutlichen anschaulich einen der Hauptvorteile des Betriebs von Solarzellen unter hohen Bestrahlungsstärken. Neben den grundsätzlich höheren erreichbaren Wirkungsgraden (vergleiche Abbildung 19) nimmt mit Konzentration die Temperaturabhängigkeit der Leistung der Solarzelle ab – die temperaturbedingten Verluste sind (bei gleichem Temperaturunterschied) unter Konzentration deutlich kleiner als bei einer Sonne. Betrachtet man in Abbildung 21 jeweils die rechte y-Achse, so wird deutlich, dass der Haupttreiber für die Temperaturabhängigkeit der Solarzelle die Leerlaufspannung ist. Die Beiträge des Stromes und des Füllfaktors sind (in der Regel) wesentlich kleiner. Grob gerundet ergibt sich für die Leerlaufspannung und den Wirkungsgrad nahezu eine Halbierung des relativen TK's beim Vergleich zwischen einer Sonne und ~1000facher Konzentration (V_{OC}: -0.25 auf -0.13 %_{rel}/K Wirkungsgrad: -0.27 auf -0.15 %_{rel}/K). Die Werte liegen in ähnlichen Bereichen wie in früheren Arbeiten für III-V Konzentratorsolarzellen bestimmt¹.

Die hier bestimmten Temperaturkoeffizienten auf Fünffachzellebene sind sehr nützlich insbesondere für Abschätzungen der zu erwartenden Verluste in CPV-Modulen. Im QuintuMod Projekt wurden diese Daten z.B. bereits im Rahmen der Energieertragsmodellierung der AZUR SPACE CPV-Module verwendet (siehe weiter unten, Arbeiten zu AP4).

Spektral aufgelöste Elektrolumineszenz / Teilzellspannungen

Neben der reinen IV-Charakterisierung wurde über den ursprünglichen Projektplan hinaus die temperaturabhängige spektrale Elektrolumineszenz aufgenommen. Hierzu wurde das Emissionsspektrum der Fünffachsolarzelle mittels eines Spektralradiometers aufgenommen – siehe Abbildung 22.

¹ Siefer, G. and Bett, A.W. (2014), Analysis of temperature coefficients for III–V multi-junction concentrator cells. Prog. Photovolt: Res. Appl., 22: 515-524. <https://doi.org/10.1002/pip.2285>

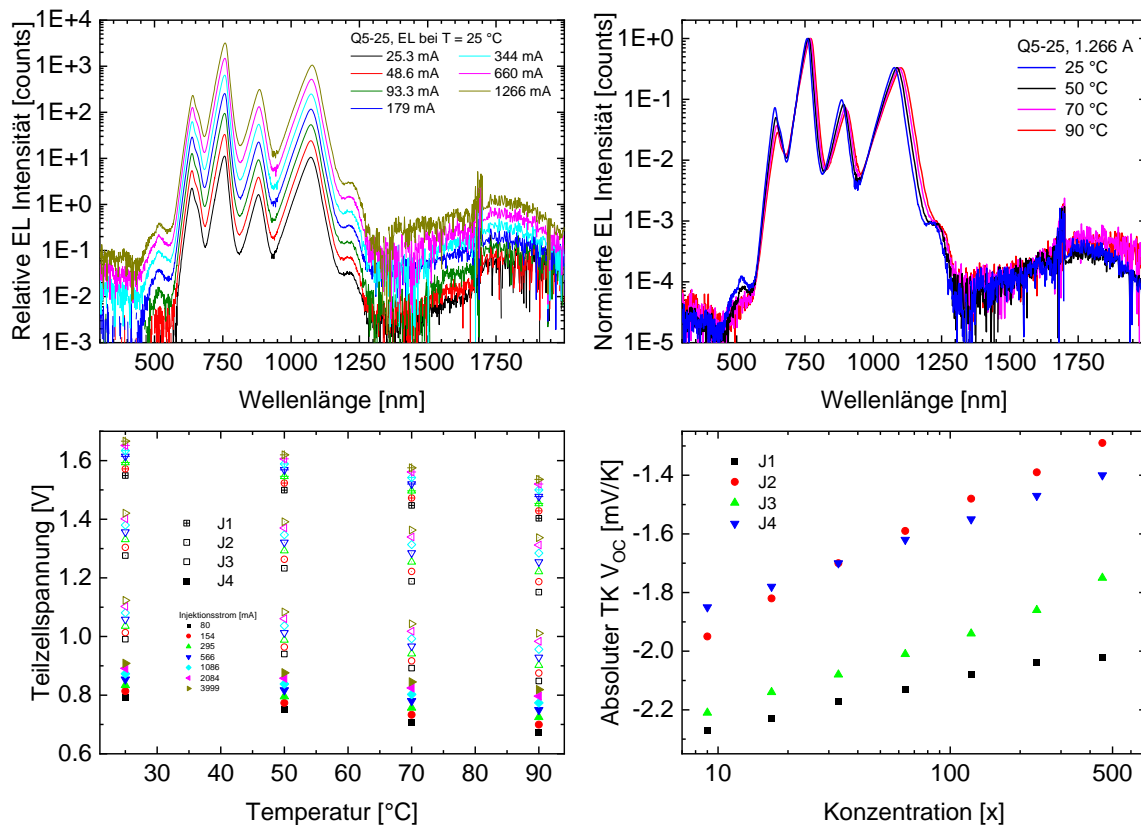


Abbildung 22: Oben: Elektrolumineszenzspektren der Fünffachzelle Q5-25. Links oben: 25 °, bei unterschiedlichen Injektionsströmen, rechts oben: bei höchstem Injektionsstrom von 1.266 A bei den vier betrachteten Temperaturen. Unten: Auswertung der Teilzellspannungen. Links unten: Teilzellspannungen der vier Teilzellen gegen Temperatur bei den verschiedenen Injektionsströmen, rechts unten: mit den Daten links unten bestimmte Temperaturkoeffizienten des V_{oc} auf Teilzellebene.

In den Graphen in Abbildung 22 (oben) sind die Emissionsspitzen der oberen vier Teilzellen J1 bis J4 zwischen 600 und 1200 nm sehr gut erkennbar – die Emission der unteren Germanium Teilzelle ist jedoch kaum zu erkennen. Zudem lässt sich in Abbildung 22 (rechts oben) erkennen, wie das Emissionsspektrum bei höherer Solarzellentemperatur aufgrund der mit steigender Temperatur abnehmenden Bandlücke zu höheren Wellenlängen schiebt. Aus den spektral aufgelösten Elektrolumineszenzmessungen und den weiter oben gezeigten EQE Messungen lassen sich die Leerlaufspannungen der Teilzellen über das Reziprozitätstheorem² bestimmen. Dies ist von daher interessant, da die anderen IV-Parameter oben nur auf Fünffachzellebene bestimmt werden können, jedoch keine Aussage getroffen werden kann, inwiefern welche Teilzelle zur Gesamtspannung der Fünffachzelle beiträgt. In Abbildung 22 (links unten) sind die aus der spektral aufgelösten EL und der EQE bestimmten Teilzellspannungen der oberen vier Teilzellen J1 bis J4 gezeigt. Die J5 wurde wegen der niedrigen EL Intensität (Abbildung 22 oben) nicht ausgewertet. Für jeden Injektionsstrom wurde für jede Teilzelle eine lineare Regression durchgeführt – dies entspricht folglich dem Temperaturkoeffizienten der jeweiligen Teilzelleerlaufspannung. In Abbildung 22 (rechts unten) sind die so bestimmten Teilzell-TKS gezeigt. Die Injektionsströme wurden dabei mit dem Strom der Fünffachsolarzelle bei einer Sonne und 25 °C in Konzentration umgerechnet. Interessanterweise ergeben sich jeweils für die Teilzellen J2 und J4 sowie für J1 und J3 sehr ähnliche Verläufe des Temperaturkoeffizienten des V_{oc} . Die komplette Analyse dieser Daten auf Teilzellenniveau und im Besonderen ein möglicher Abgleich mit weiteren

² Rau, Uwe „Reciprocity relation between photovoltaic quantum efficiency and electroluminescent emission of solar cells“ Physical Review B 76 8, doi: 10.1103/PhysRevB.76.085303

temperaturabhängigen Messungen war im Rahmen des QuintuMod Projektes jedoch leider nicht möglich.

AP1.3: Planung und Realisierung von Analysemodulen (AZUR) und Aufrüstung des vorhandenen Spezial ‚Einer-Moduls‘ (ISE)

Der in Abbildung 23 (links) gezeigte Versuchsaufbau „ZScanDevice“ ermöglicht die elektrische Charakterisierung von einzelnen Solarzellen in Verbindungen mit einzelnen Konzentratoroptiken unter realem Sonnenlicht oder am Fraunhofer ISE Sonnensimulator. Dabei kann der Zell-Linsen-Abstand variiert und die Konzentratoroptik auf einer bestimmten Temperatur gehalten werden. Im Rahmen des Projekts wurde dieser Versuchsaufbau um eine Temperierung der Solarzelle erweitert, da im Modul höhere Temperaturen als bei Verwendung von nur einer Zell-Linsen-Einheit auftreten. Entscheidende Untersuchungen wurden innerhalb einer Bachelorarbeit durchgeführt. Der schematische Aufbau der Zelltemperierung ist in Abbildung 23 (rechts) dargestellt. Die Zelltemperierung wurde mit Hilfe eines Peltier-Elements realisiert. Das Peltier-Element und ein PT100-Temperatursensor sind mit einer elektronischen Temperaturregelung verbunden. Dadurch kann gezielt eine Solarzellentemperatur von bis über 100 °C eingestellt werden. Die Temperaturregelung hält dabei die Solarzellentemperatur während der Durchführung von verschiedenen Messreihen auf einer konstanten Temperatur.

Der erweiterte Messaufbau erlaubt nun zum einen genauere Untersuchungen des Einflusses der Zelltemperatur auf die elektrischen Kenngrößen von CPV-Modulen und zum anderen die Charakterisierung einzelner Zell-Linsen-Einheiten unter den gleichen thermischen Bedingungen wie sie im kompletten CPV-Modul vorherrschen. Abbildung 24 zeigt exemplarisch die Abhängigkeit des elektrischen Wirkungsgrads vom Zell-Linsen-Abstand sowie von der Zelltemperatur. Dabei wurde die Verwendung einer Dreifachsolarzelle und einer Fünffachsolarzelle gegenübergestellt.

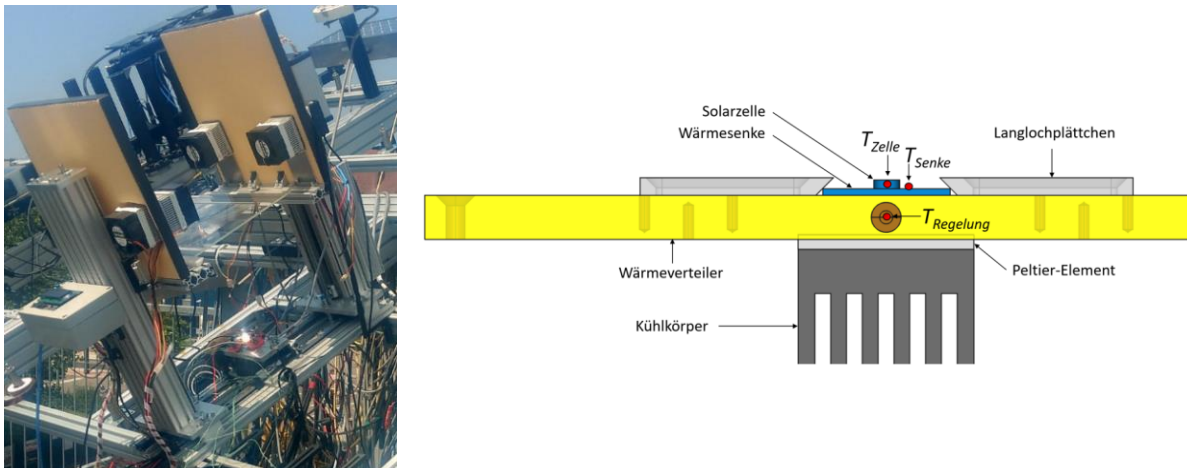


Abbildung 23: Links: Messaufbau zur elektrischen Charakterisierung von Zell-Linsen-Einheiten mit montierter AZUR SPACE Fresnellinse und AZUR SPACE 5J Solarzellenbaugruppe (EFA). Die Temperatur der Linse kann eingestellt werden. Zusätzlich wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit die Temperierung der verwendeten Solarzellenbaugruppe entwickelt. Rechts: Schematischer Aufbau der Zelltemperierung bestehend aus einem Wärmeverteiler, Kühlkörper und einem Peltier-Element.

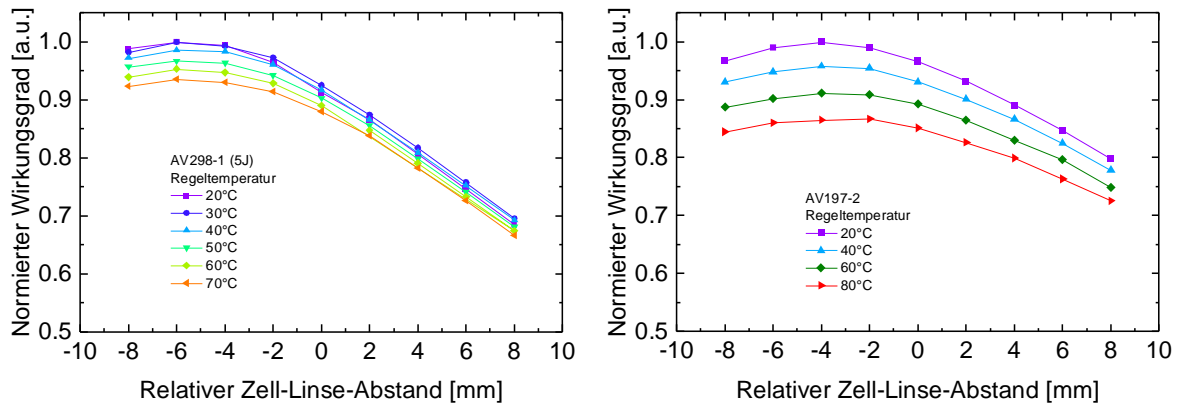


Abbildung 24: Normierter Wirkungsgrad als Funktion des relativen Zell-Linsen-Abstands gemessen an einer AZUR2 Linse in Kombination mit einer AZUR SPACE 5fach (links) und mit einer AZUR SPACE 3fach Solarzelle (rechts). Der Wirkungsgrad ist dabei jeweils auf den maximalen Wirkungsgrad normiert. Die Messwerte wurden auf der Sonnennachführeinheit des Fraunhofer ISE in Freiburg ermittelt. Die beiden Graphen zeigen die Abhängigkeit des elektrischen Wirkungsgrads sowohl vom Abstand Zelle zur Linse als auch von der Zelltemperatur.

AP1.4: Abgleich und Evaluierung der Simulations- & Messergebnisse (AZUR/ISE)

Die Arbeiten dieses Arbeitspakets werden im Rahmen der inhaltlichen Arbeitspakete diskutiert (z.B. AP1.2 und AP1.3 für die Solarzellenmessungen und AP3.3 für die Modulmessungen).

6.2 AP2: Optimierung der Modulkomponenten

Das Fraunhofer ISE war in diesem Arbeitspaket nur in AP2.3 zur Durchführung von mechanischen Belastungstests involviert.

AP2.3: Design und Material-optimierung der Modulteile

In diesem Arbeitspaket wurden am Fraunhofer ISE mechanischen Belastungstests an AZUR-Modulen durchgeführt. Dabei wird das Modul mit Zug- und Druckkräften beaufschlagt und so die mechanische Stabilität getestet. Im Rahmen des Projekts war das Ziel, bis zu einem Versagen zu testen. D.h. die Kräfte wurden schrittweise bis zu einer maximalen Drucklast von 9600 Pa und einer Zuglast von 5400 Pa erhöht. Dadurch wurde die Belastung im Vergleich zu den im IEC-Standard 62108 geforderten Maximal-Lasten von 1600 Pa (ohne Schneelast) bzw. 2400 Pa (für Schneelast) deutlich erhöht. Die Testbedingungen sind in Abbildung 25 aufgeführt.

Drucklast [Pa]	Zuglast [Pa]	Dauer [min]
2400		60
	2400	60
3000		15
	3000	15
3600		15
	3600	15
4200		15
	4200	15
4800		15
	4800	15
5400		15
	5400	15
6000		15
	5400	15
6600		15
	5400	15
7200		15
	5400	15
7800		15
	5400	15
8400		15
	5400	15
9000		15
	5400	15
9600		15

Abbildung 25: Lasten und Haltedauern während des mechanischen Belastungstests.

AZUR SPACE hat vier Module (M02, M03, M04, M05) zur Untersuchung der Stabilität gegenüber mechanischer Belastung an das ISE übergeben. An den Modulen wurden konstruktive Veränderungen bezüglich des Rahmenaufbaus und der Materialwahl im Vergleich zum Modulaufbau bei Projektstart vorgenommen. Die vier Testproben unterschieden sich außerdem in der Wahl des Klebermaterials für die Dichtung zwischen Linsenglas und Modulrahmen sowie der Primäroptik.

In Abbildung 26 ist Modul M04 im Teststand sowie beispielhaft die Lastkurve mit Abweichung (Auslenkung, Deformation) über den Test gezeigt. In der Abweichung ist die Deformation unter Druck bzw. Zuglast zu erkennen. Wie zu erwarten, nimmt sie mit Zunahme der Kraft in positive (Druck) bzw. negative (Zug) Richtung zu. Im letzten Testschritt bei Druckbelastung von 9600 Pa tritt eine plötzliche, starke Deformation (Ausschlag der Abweichung) auf und der Test wird beendet. Modul M03 zeigt ein ähnliches Ergebnis. Beide Module zeigen nach dem Test eine plastische Deformation im Bereich der Modulaufhängung. Modul M02 zeigt keine ruckartige Deformation und nur eine sehr geringe plastische Deformation an der Aufhängung nach dem Test. Nur bei Modul M05, ist eine der zwei Linsen des Moduls gebrochen. Der Bruch trat während der Drucklast von 8400 Pa nach einer Testzeit von etwa 5 Minuten auf.

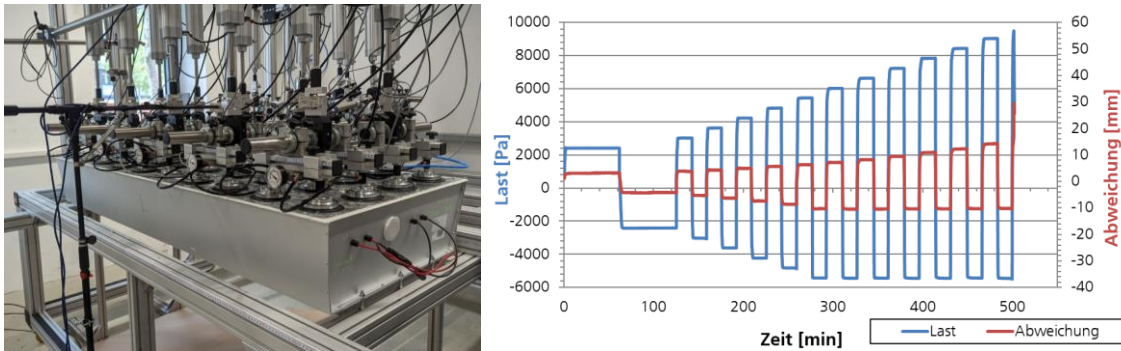


Abbildung 26: Links: Modul (M04) während des mechanischen Lasttests am Fraunhofer ISE. Rechts: Last und Abweichung während des Tests. Im letzten Testschritt bei Druckbelastung 9600 Pa tritt eine ruckartige Deformation auf und der Test wird beendet.

Die Deformation am Beispiel Modul M04 ist auch anhand eines Fotos an einer Seite der Aufhängung in Abbildung 27 gezeigt. Es ist zu erkennen, dass bis zur Testsequenz 9000 Pa die Deformation zu Beginn der Druckbelastung nicht sichtbar ist, d.h. sie geht nach Belastung wieder zurück. Zu Beginn der Testsequenz 9600 Pa ist bereits eine Deformation an den Aufhängungen (markiert durch grüne Kreise) zu erkennen. Während der letzten Testsequenz wird die plastische Deformation noch deutlicher.

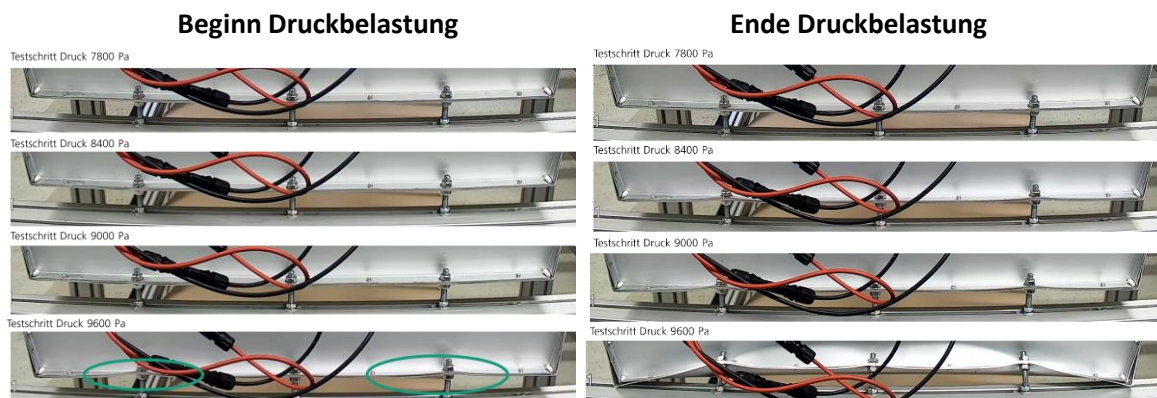


Abbildung 27: Das Modul M04 zu Beginn (links) und am Ende (rechts) des Belastungsschritt durch Druckkraft. In der Testsequenz 8400 Pa (Ende) ist eine Deformation erkennbar. Diese ist allerdings nicht mehr sichtbar beim Bild zu Beginn der Testsequenz 9000 Pa und ist daher elastisch. In der Testsequenz 9600 Pa ist bereits zu Beginn eine geringe plastische Deformation an den linken und rechten Aufhängungen erkennbar. Die Deformation nimmt in dieser letzten Testsequenz noch zu (und bleibt dann auch nach Belastung bestehen).

Wie Abbildung 28 zeigt, tritt die Deformation bei Modul M05 an der Seitenwand und nicht wie bei Modul 03 und 04 an der Modulaufhängung auf, was zum Bruch der Lin senplatte in diese Modulhälfte geführt hat. Ein möglicher Grund des Versagens könnte an der Klebung zwischen der Lin senplatte und dem Rahmen liegen. Die zweite Lin senplatte des Moduls hat der Belastung standgehalten.

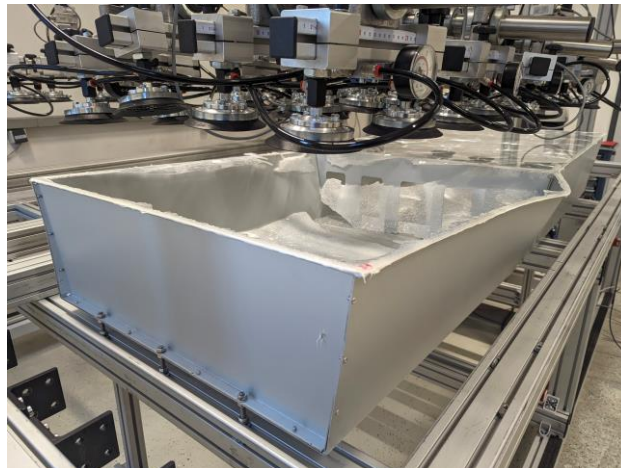


Abbildung 28: Das Modul M05 nach dem Bruch der Glasplatte bei einer Druckbelastung von 8400 Pa.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die plastischen Deformationen erst bei extrem hohen Druck-Lasten auftreten. Ebenfalls positiv hervorzuheben ist, dass nur bei einer Linseplatte der fünf getesteten Module Glasbruch der Linseplatte auftrat. Das ist eine Verbesserung gegenüber von früheren Ergebnissen im Projekt CPVMod (FKz: 0324140B) und bedeutet, dass sich die konstruktiven Anpassungen bewähren. Diese Verbesserungen sind vor allem beachtlich, wenn man mit einbezieht, dass gleichzeitig die Materialstärke der Aluminiumteile von 2 auf 1.5 mm verringert wurde bei gleichzeitig leicht erhöhter Glasfläche.

6.3 AP3: Fertigung und Charakterisierung von Demonstratoren (CPV-Module)

AP3.3: Modulmessungen & Feldtests

Innerhalb von AP3.3 wurden am Fraunhofer ISE zwölf AZUR SPACE 5J CPV-Module elektrisch unter Außenbedingungen charakterisiert. Dazu wurden diese CPV-Module auf einer der Sonnen-nachführeinheiten montiert, wie exemplarisch in Abbildung 29 dargestellt. Daraufhin wurden entweder sogenannte „SideBySide“ Messungen durchgeführt oder die nominelle Ausgangsleistung nach IEC Standard 62670-3 ermittelt. „SideBySide“ Messungen werden in der Regel verwendet, um Unterschiede in der Ausgangsleistung mehrerer CPV-Module unter realistischen Arbeitsbedingungen zu quantifizieren oder die nominelle Ausgangsleistung eines Testmoduls anhand eines Referenzmoduls zu bestimmen. Die nominelle Ausgangsleistung des Referenzmoduls wurde hierbei nach IEC Standard 62670-3 ermittelt.



Abbildung 29: AZUR 5J CPV-Module am Fraunhofer ISE montiert auf einer Sonnennachführeinheit zur elektrischen Charakterisierung unter Außenbedingungen in Freiburg. Hierbei wurde entweder die nominelle Ausgangsleistung nach IEC Standard 62670-3 ermittelt oder sogenannte „SideBySide“ Messungen durchgeführt.

An vier 5J CPV-Modulen (SN4920042101, SN21032216, SN4921031701 und SN4921061701) wurde die nominelle Ausgangsleistung bei Normbedingungen (CSTC, Concentrator Standard Test Conditions) IEC 62670-3 folgend ermittelt. Die Messprozedur basiert im Wesentlichen auf Außenmessungen der Strom-Spannung-Charakteristik bei gleichzeitiger Bestimmung der wichtigsten Umgebungsbedingungen, wie z.B. Direkte Einstrahlungsstärke (DNI, Direct Normal Irradiance), Umgebungstemperatur und Zusammensetzung des Sonnenspektrums. Dabei ergaben sich hervorragende nominelle Modulwirkungsgrade bei CSTC von 35.6 % (SN4920042101), 34.2 % (SN21032216), 35.3 % (SN4921031701) und 33.3 % (SN4921061701), womit ein wichtiges Projektziel erreicht wurde. Die Angabe der Wirkungsgrade ist bezogen auf die gesamte Linsenaperturfläche. Die Unterschiede zwischen den Modulen liegen im Bereich des typischen Messfehlers dieser Messprozedur. Gründe für die Unterschiede sind z.B. Messunsicherheiten bei der Bestimmung der Modultemperaturkoeffizienten (siehe AP4.3) und der nachfolgenden Temperaturkorrektur.

Die Strom-Spannungs-Messreihe der Module SN4921031701 und SN4921061701 wurden nach erfolgter Bestimmung der nominellen Ausgangsleistung fortgesetzt und in AP4.3 zur Erstellung eines PVsyst Eingabeparametersatzes (PAN-File) und dessen Überprüfung verwendet. Nach Prüfung wurden die PAN-Files an AZUR SPACE übergeben.

Eine der am Fraunhofer ISE durchgeführten „SideBySide“ Messungen wurde an den AZUR SPACE CPV-Modulen SN4923072005 und SN4923072002 durchgeführt. Beide Module sind mit gleichem 5J AZUR SPACE Zelltyp bestückt, das Modul SN4923072005 hat größere Linsen und eine größere Linsenplatte im Vergleich zum Modul SN4923072002. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass das Modul mit 3.3% größerer Linsenfläche auch 3.2% mehr elektrische Ausgangsleistung generiert. Tabelle 2 zeigt die detaillierten Ergebnisse als Mittelwerte bei CSOC ohne Temperaturkorrektur. Wirkungsgrade basieren auf aktiver Linsenfläche. Bei diesem Modulvergleich wurden in beiden Modulen die gleichen EFAs eingesetzt. Das um 3.3% größere Modul hat eine von 2 mm auf 1.5 mm reduzierte Materialstärke, was zu einer höheren Zelltemperatur und einer niedrigeren Leerlaufspannung V_{OC} führt. Der V_{OC} -Verlust wird durch den Gewinn im Strom mehr als ausgeglichen. Dieser Stromgewinn ist mit 4.63% sogar deutlich höher als der Zuwachs an aktiver Fläche der Primäroptik. Hier zeigt sich die höhere optische

Effizienz der größeren, neuen Primärlinse AZUR2. Für das Modul SN4923072005 wurde kein volles Rating durchgeführt. Es kann jedoch in Gesamtbetrachtung der mit 5-fach-Solarzellen erzielten CSOC-Leistungssteigerung von 17.6% und der erneuten Leistungssteigerung von 3.2% für das neue Moduldesign ein Gesamtpotential einer Leistungssteigerung von 21.3% für das neue 5-fach-Modul im Vergleich zum alten 3-fach-Modul abgeschätzt werden.

Tabelle 2: Ergebnis SideBySide Messung SN4923072005 und SN4923072002 als Mittelwerte über die unkorrigierten Messwerte bei CSOC:

		SNx005	SNx002	1-SNx002/SNx005
Area	m²	1.395	1.35	-3.23% _{rel.}
I_{sc}/DNI	mA/(W/m²)	1.767	1.686	4.63% _{rel.}
I_{sc}/DNI/A	mA/W	1.267	1.249	1.45% _{rel.}
VOC	V	306.7	309.0	-0.75% _{rel.}
FF	%	79.2	79.9	-0.83% _{rel.}
η	%	30.97	31.00	-0.11% _{rel.}

Eine weitere am Fraunhofer ISE durchgeführte „SideBySide“ Messungen wurde im Vergleich zweier AZUR SPACE CPV-Modulen mit 3J Solarzellen (SN4919030705) und mit 5J Solarzellen (SN4921031701) durchgeführt. Dabei konnte ein um ca. 14 % höherer mittlerer Wirkungsgrad unter Arbeitsbedingungen für das 5J Modul gegenüber dem gemessenen 3J Modul nachgewiesen werden.

AZUR SPACE 5J Analysemodul

Ein AZUR SPACE Analysemodul wurde im November 2022 am Fraunhofer ISE in Freiburg auf einer Sonnennachführeinheit montiert und ausgerichtet. Das Analysemodul ist ein AZUR SPACE CPV Modul mit integrierter umfangreicher und automatisierter Datenaufzeichnung von Sensoren und IV-Kennlinien der einzelnen Solarzellen. Diese Daten wurden regelmäßig vom Fraunhofer ISE entnommen und an AZUR SPACE übermittelt - Ergebnisse der Datenauswertung werden von AZUR SPACE berichtet.

AP3.3: Alterungstests

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden am Fraunhofer ISE Alterungstests an AZUR SPACE CPV-Modulen durchgeführt. Die Module wurden im sogenannten „Multi-Zyklus“ Test gealtert. Dieser Mehrfach-Stress-Test hat das Ziel, die Belastungen der (C)PV-Module unter Außenbedingungen realitätsnah abzubilden und Einflüsse von Materialien und Komponenten im Modul untereinander einzubeziehen. Dies erfolgt durch kombinierten Stress von Feuchtigkeit bei 60°C und 85%_{rel.} Feuchte mit gleichzeitiger UV-Beleuchtung von etwa 150 W/m² gefolgt von Temperaturwechseln zwischen -40 °C und 85 °C. Die Module wurden vor und nach dem Klimakammertest elektrisch und auf Dichtigkeit charakterisiert. Der Test-Ablauf ist in Abbildung 30 dargestellt.

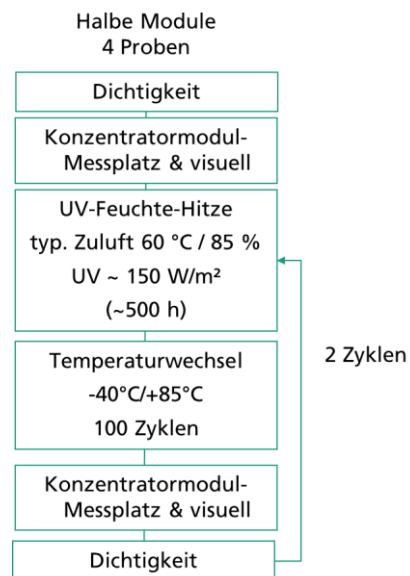


Abbildung 30: Ablauf mit Testsequenzen des Alterungstests „Multi-Zyklus“. Vier halbe AZUR-CPV-Module wurden getestet. Der Multi-Zyklustest besteht aus einer Sequenz mit UV-Beleuchtung und feuchter Hitze gefolgt von einem Temperaturwechselttest. Vor und nach den Zyklen wurden die Module auf Dichtigkeit untersucht und elektrisch charakterisiert.

Die vier untersuchten Module (M01, M02, M03 und M04) haben die halbe Größe eines „Standard“ C3PV Moduls. Dadurch können bei ähnlichem Volumen in der Klimakammer die doppelte Anzahl an Dichtmaterialien (zwischen Linseplatte und Rahmen) untersucht werden. Zu beachten ist, dass bei einem der vier Module (M02) nach dem ersten Teil unter UV-Feuchte-Hitze die Linseplatte gebrochen ist. Die Ursache lag jedoch nicht in der beschleunigten Alterung, sondern in einer mechanischen Beschädigung beim Handling des Moduls in der Klimakammer. Das Modul konnte daher nicht weiter getestet und charakterisiert werden.

Die relative Dichtigkeit der Module zueinander zwischen den Alterungssequenzen hat sich nicht geändert und keines der Module wird durch den Test komplett undicht. Aufgrund hoher technischer Komplexität ist nicht vorgesehen, ein hermetisch dichtes Modul zu bauen. Ein Luftaustausch auch für Druckausgleich ist durch eine Gore-Membran vorgesehen.

In Abbildung 31 ist die elektrische Messung dargestellt. Die Module wurden durch Aufnahme einer IV-Kennlinie am Konzentrator modul-Messplatz elektrisch bei gleicher Einstrahlungsintensität (ca. 810 W/m²) charakterisiert.

Die IV-Kennlinien im rechten Diagramm zeigen eine Abnahme im Strom nach Zyklus 1. Die Abnahme setzt sich nach Zyklus 2 fort. Insbesondere bei Modul M01 sind Stufen mit zunehmender Spannung zu erkennen. Diese entstehen durch Unterschiede im Strom zwischen Solarzellen-Linseneinheiten und dadurch aktivierte Bypassdioden in der Serienschaltung.

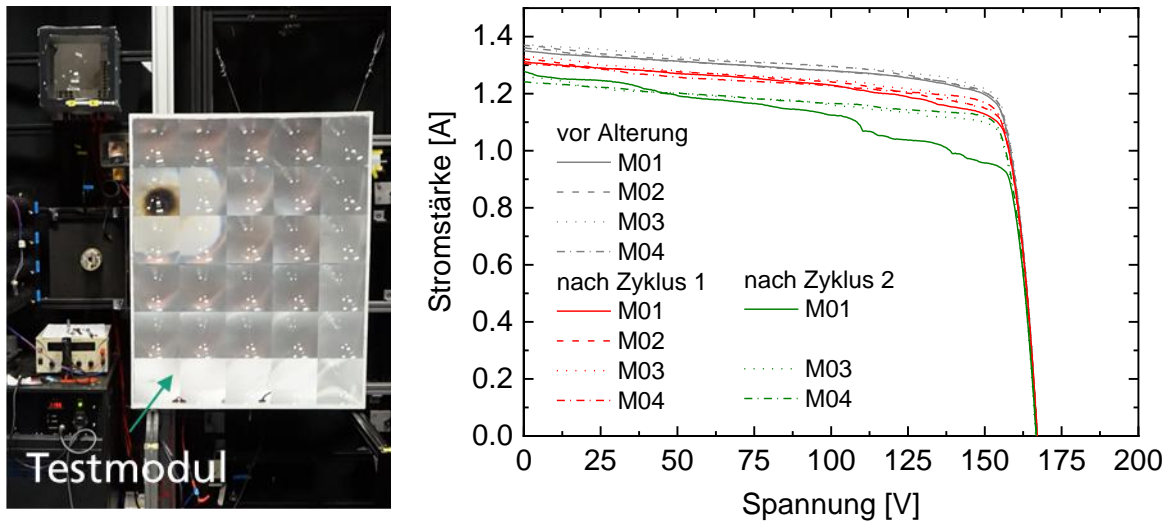


Abbildung 31: Charakterisierung der getesteten Module. Links: Testmodul im Teststand. Rechts: IV-Kennlinien gemessen am Konzentratormodul-Messplatz. Eine Abnahme im Strom für Zyklus 1 und Zyklus 2 ist zu erkennen.

Für eine detaillierte Bewertung werden die charakteristischen Kenngrößen relativer Kurzschlussstrom (normiert auf den Strom vor der Alterung $I_{SC,0}$) ($I_{SC}/I_{SC,0}$), Füllfaktor FF und offene Klemmenspannung V_{OC} verglichen. Diese sind in Abbildung 32 gezeigt.

Die offene Klemmenspannung ist zwischen den Modulen ähnlich und ändert sich auch nach den Alterungssequenzen nicht messbar. Dagegen sinkt der relative Kurzschlussstrom des gemessenen Kurzschlussstroms zum Strom vor Alterung ($I_{SC}/I_{SC,0}$) auf 94 % nach dem 1. Zyklus und auf bis zu 82 % nach dem 2. Zyklus. Der Kurzschlussstrom gibt den I_{SC} der besten Solarzelle in der Serienschaltung wieder, also die Solarzellen-Linseneinheit mit der höchsten optischen Effizienz. Der Füllfaktor zeigt die Solarzellen-Linseneinheit mit der geringsten optischen Effizienz im Verhältnis zur besten Solarzellen-Linseneinheit der jeweiligen Messung, also die Homogenität der Einheiten im Modul. Der Füllfaktor für das Modul M01 nimmt deutlich ab. Der FF für Modul M03 nimmt nur leicht ab und für Modul M04 sogar leicht zu. Das bedeutet, dass die Abnahme der Ströme der Zell-Linsen-Einheiten in Modul 02 und Modul 03 homogener verteilt sind. Die Kennlinie in Abbildung 31 für das Modul 01, zeigt, dass in diesem Modul die größte Abnahme im Strom einzelner Solarzellen-Linsen-Einheiten auftritt.

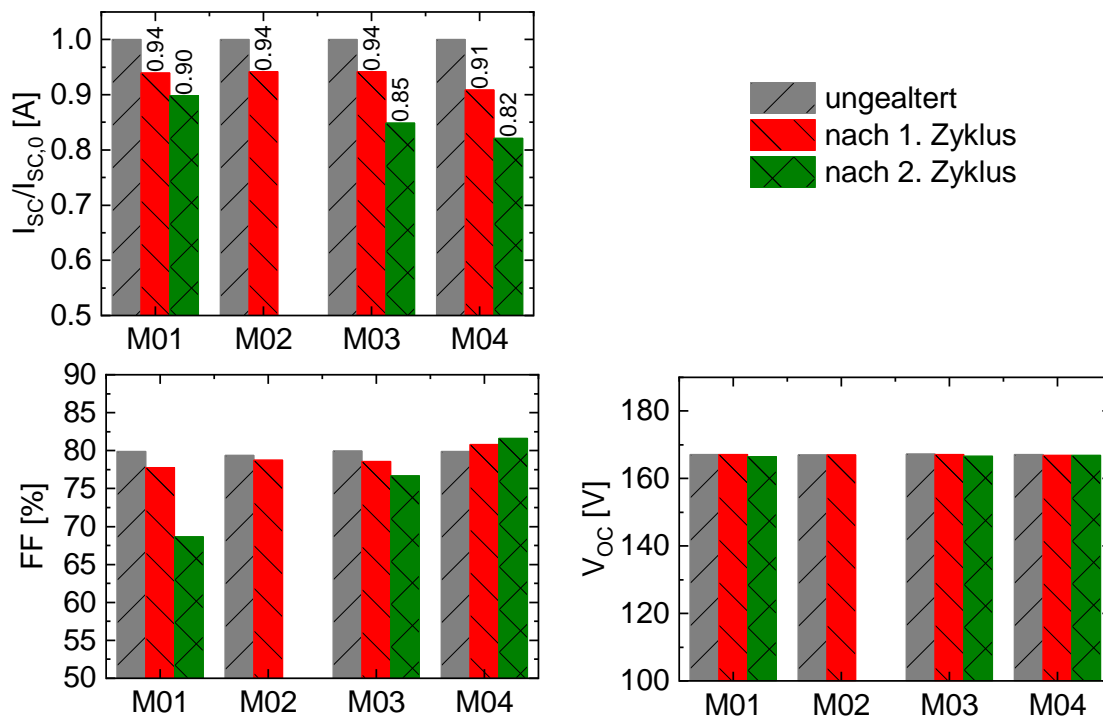
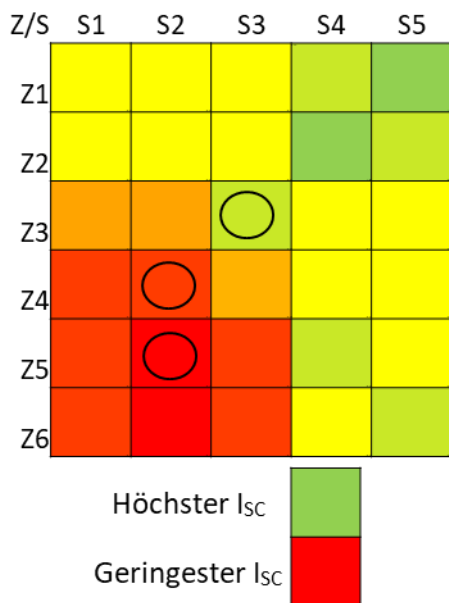


Abbildung 32: Änderung der charakteristischen Kenngrößen relativer Kurzschlussstrom ($I_{sc}/I_{sc,0}$), Füllfaktor FF und offene Klemmenspannung V_{oc} für alle Module.

Eine Reduktion des Stroms könnte durch optische Verluste im Strahlengang (Primäroptik, Sekundäroptik, Kleber zwischen Sekundäroptik und Solarzelle, Antireflexbeschichtung der Solarzelle) oder die Solarzelle selbst verursacht werden. Die Verluste können entweder im Bulk-Material oder an den Grenzflächen entstehen.

Um die Ursache weiter einzugrenzen, wurden weitere Messungen an Modul M01 durchgeführt. Zunächst wurde durch sequenzielle Messung [10] der Spalten und Zeilen der Linienplatte die Zell-Linsen-Einheiten mit hohem und niedrigem Strom lokalisiert. Somit konnte ein Ranking der Einzellinsen über die Modulbodenplatte erstellt werden, das in Abbildung 33 gezeigt ist. Zu beachten ist, dass nicht alle Linsen eindeutig zugeordnet werden können. Trotzdem kann aus den Messungen geschlossen werden, dass die Solarzellen-Linseneinheiten in den oberen und mittleren Zeilen und rechten Spalten S4 und S5 besser (grüne Einfärbung) sind und es lokale Unterschiede gibt.

Die Zellopseneinheiten mit den geringsten Strömen (rote Einfärbung) treten im linken unteren Bereich auf. Daher wurde die Linienplatte vom Modul separiert und die Linsen der Primäroptik an Position Z3/S3 (geringere Verluste), Z4/S2 und Z5/S2 (höchste Verluste) im Linsenmessplatz [11] des Fraunhofer ISE charakterisiert. Der optische Verlust der optischen Effizienz zu einer ungealterten Referenzlinse ist ebenfalls Abbildung 33 für diese drei Linsen gezeigt. Die Messung bestätigt, dass Z5/S2 höhere optische Verluste aufweist, als Z4/S2 und wiederum Z3/S3 die geringsten Verluste aufweist. Im Vergleich zur IV-Kennlinie in Abbildung 31 mit einem maximalen Verlust von 33 % sind die optischen Verluste geringer. Allerdings wird in der optischen Messung nur ein Ausschnitt mit einer kreisförmigen Maskenöffnung mit einem Durchmesser von 138 mm gemessen. Damit werden die Bereiche in den Ecken der Linse in dieser Messung nicht berücksichtigt.



Position Zeile/Spalte	Relative Abweichung in % zur Referenzlinse
Z3/S3	-11.0
Z4/S2	-18.2
Z5/S2	-24.0

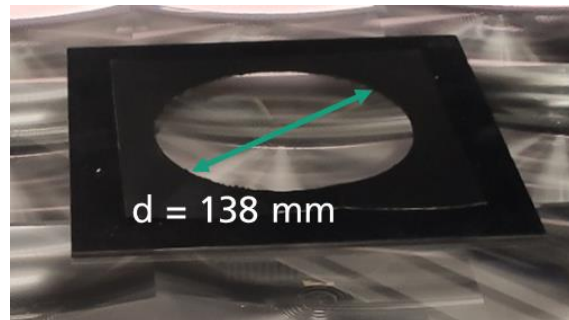


Abbildung 33: Weitere Charakterisierung zur Lokalisierung von Solarzellen-Linseneinheiten mit geringeren Stromertrag. Links: Ranking nach sequenzieller Messung der Spalten und Zeilen auf der Linsenplatte. Die Kreise die Linsen, die auch optisch im Linsenmessplatz charakterisiert wurden. Rechts: Verlust der optischen Effizienz von drei Linseneinheiten auf der Linsenplatte gegenüber einer ungealterten Referenzlinse. Es wurde nur ein Kreisausschnitt der Linse mit einem Durchmesser von 138 mm gemessen.

Bei einem Vergleich der Brennpunktverteilung der Linsenmessung kann eine erhöhte Streuung festgestellt werden. Damit kann durch die detaillierte Charakterisierung die Degradation auf eine Abnahme der optischen Effizienz in der Primäroptik zurückgeführt werden. Die Erhöhung der Streuung kann im Bulk-Material oder an den Grenz- und Oberflächen durch zum Beispiel Ablagerungen oder eine Änderung der Oberflächeneigenschaften durch Korrosion auftreten. Aktuell wird eine Vergilbung ausgeschlossen. Für eine weitere Analyse wäre eine spektrometrische Vermessung notwendig.

Die Ergebnisse wurden auch mit den Ergebnissen eines ähnlichen Tests aus dem Projekt CPVMod (FkZ.: 0324140B) verglichen. In CPVMod konnte gezeigt werden, dass während der Tests Feuchtigkeit in das Modul eintritt. Es wurde ein Dichtmaterial identifiziert, bei dem eine Ausgasung vermutet wurde, die zu Ablagerung oder chemischen Reaktionen führen könnte. In den aktuellen Modulen wurde ein anderes Dichtmaterial eingesetzt bzw. sogar verschiedene Materialien verwendet. Da alle Module eine Reduktion des Stroms zeigen, kann kein Kleber bevorzugt werden.

Zur weiteren Ursachenforschung wurde eine RAMAN-Spektroskopie zur Charakterisierung verschiedener Proben im Modul eingesetzter Materialien durchgeführt. Die Ummantelung der elektrischen Kabel zeigt in den Messungen eine Änderung des RAMAN-Spektrums nach der Alterung. Allerdings zeigt die Silikonprobe der Primäroptik nach einer Alterung im Vergleich zu einer Referenzprobe keinen Unterschied in dem chemischen Aufbau.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich eine über das Modul inhomogene Abnahme des Stroms in den Solarzellen auftritt. Durch detaillierte Charakterisierung konnte als Ursache eine Reduktion der optischen Effizienz der Primäroptik identifiziert werden. Zu beachten ist, dass dieses Testverfahren kein Standard-Verfahren der IEC-Norm IEC 62108 ist und, dass das Degradationsverhalten bisher unbekannt ist und sich in Außenmessungen keine derartige Degradation zeigt. Daher ist die Relevanz bezüglich der Anwendung offen. Im hier durchgeführten Test wird das Modul während einer intensiven UV-Bestrahlung auf einer konstanten Temperatur gehalten. Der Luftaustausch durch die Membran beschränkt sich auf Diffusion und einen geringen Luftaustausch bedingt durch

Schwankungen im atmosphärischen Luftdruck. Im regulären Einsatz treten hingegen starke Schwankungen der Lufttemperatur auf, welche einen intensiven Luftaustausch mit der Umgebung fördern. Zudem ist die UV-Bestrahlung auf die Sonnenstunden beschränkt. Insofern ist es plausibel, dass sich im Multizyklustest hohe Konzentrationen von Reaktionsprodukten aus der UV-Zersetzung von Polymeren aufbauen, welche die Primärlinsen schädigen können, während im realen Moduleinsatz derartige Reaktionsprodukte effektiv durch Luftaustausch aus dem Modul entfernt werden. Diese Zusammenhänge erfordern eine eingehendere Untersuchung, welche jedoch nicht mehr im Rahmen dieses Projekts bearbeitet werden können.

6.4 AP4: Entwicklung einer Berechnungsmethode für Energieertragsprognosen AZUR/ISE

AP4.1: Spektrale Einstrahlung für Energieertrags-Berechnungen an CPV-typischen Standorten

Eine Recherche zur Verfügbarkeit von Einstrahlungsdaten wurde durchgeführt und dabei eine Liste von Datenbanken zusammengestellt. Dort sind verschiedene Quellen für solare Einstrahlungsdaten aufgeführt und die jeweils verfügbaren Einstrahlungsgrößen sind angegeben. Dabei werden folgende Größen unterschieden: Direkte Normaleinstrahlung (DNI, Direct Normal Irradiance), Globale Horizontaleinstrahlung (GHI, Global Horizontal Irradiance), Globale Normaleinstrahlung (GNI, Global Normal Irradiance), Globale Geneigte Einstrahlung (GTI, Global Tilted Irradiance), Umgebungstemperatur (T_{amb}). Spektral aufgelöste Daten wurden dabei bisher nur in den Datenbanken von „NRSDB“, „CM SAF“ und im IEC Standard 61853-4 gefunden, jeweils als global geneigte Einstrahlung. Für die Energieertragsberechnung von CPV-Modulen sind allerdings spektral aufgelöste Daten der direkten Normalstrahlung relevant.

Die Recherche zur Verfügbarkeit von Einstrahlungsdaten hat somit ergeben, dass spektral aufgelöste direkte Einstrahlungsdaten nicht ohne weiteres an beliebigen Standorten verfügbar sind. Dem gegenüber ist es gängige Praxis, globale Einstrahlungsdaten aus Satellitendaten zu generieren. In Kombination mit Methoden aus der Meteorologie können diese globalen Einstrahlungsdaten in ihren direkten und diffusen Anteil aufgeteilt werden. Damit könnten spektral aufgelöste direkte Einstrahlungsdaten weltweit verfügbar werden. Um diese Methode für die Anwendung in der Konzentradorphotovoltaik zu evaluieren, wurde dem Fraunhofer ISE vom Deutschen Wetter Dienst (DWD) ein Datensatz Satelliten-basierter Sonnenspektren am Standort Freiburg bereitgestellt. Aktuell könnten Spektren aus Satellitendaten vom DWD in dem in Abbildung 34 links markiertem Bereich bereitgestellt werden. Diese Spektren werden typischerweise in Katobändern verfügbar gemacht. In Abbildung 34 rechts ist beispielhaft das AM1.5d Referenzspektrum in Katobändern dargestellt.

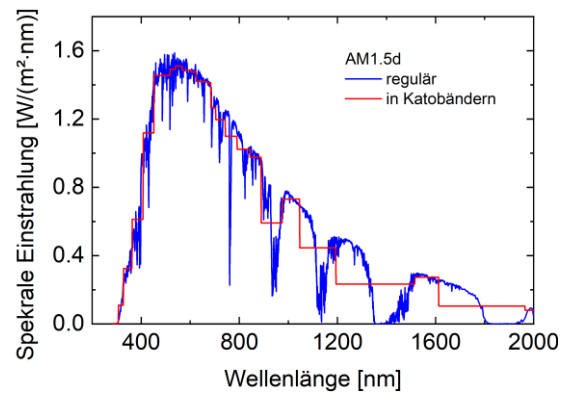
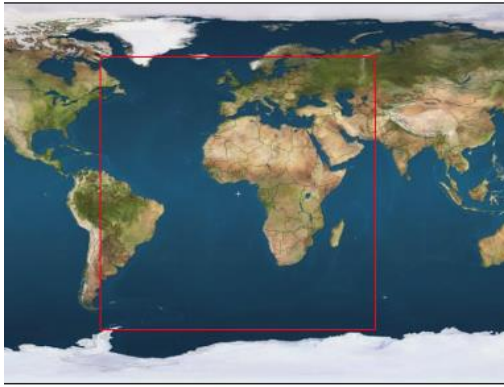


Abbildung 34: Links: Weltkarte mit markiertem Ausschnitt innerhalb dessen der DWD im Moment Sonnenspektren basierend auf Satellitendaten generieren kann. Rechts: AM1.5d Referenzspektrum regulär und beispielhaft dargestellt in Katobändern.

Innerhalb des Projekts wurde ein Datensatz aus Satelliten generierten Sonnenspektren am Standort Freiburg im Zeitraum des Jahres 2020 durch den DWD zur Verfügung gestellt. Die Satelliten generierten Spektren wurden mit am Fraunhofer ISE in Freiburg terrestrisch gemessenen Sonnenspektren verglichen. Gegenübergestellt wurden dabei DNI Werte berechnet als Integral über den gesamten Wellenlängenbereich und SMR Werte. SMR Werte sind dabei integrale Werte in bestimmten Wellenlängenbereichen normiert auf deren integrale Werte beim Referenzspektrum AM1.5d. Dabei werden jeweils zwei Wellenlängenbereiche miteinander verglichen. Ein SMR Wert von eins bedeutet eine zum Referenzspektrum ähnliche Zusammensetzung des Sonnenspektrums. Betrachtet werden drei spektrale Bereiche (300 bis 600, 600 bis 900 und 900 bis 1800 nm), daher sind drei SMR Werte von Relevanz, wobei die Indizes jeweils die beiden miteinander verglichenen Wellenlängenbereiche darstellt. 1 steht für den Bereich ab 300 nm, 2 ab 600 und 3 ab 900 nm.

Abbildung 35 zeigt die Korrelation der DNI (links) und der drei SMR-Werte (rechts) zwischen Werten berechnet mit Satelliten basierten Spektren (DWD) und terrestrisch gemessenen Spektren (ISE). Dabei zeigen sich in einer Vielzahl an Fällen größere Abweichungen zwischen terrestrisch und Satelliten basierten Werten von mehr als 20 %. Daher kann im Moment nicht ohne Weiteres auf diese Satelliten basierten direkten Sonnenspektren zurückgegriffen werden. Weitere Untersuchungen zur Ursache dieser größeren Abweichungen sind notwendig, allerdings in diesem Projekt nicht vorgesehen.

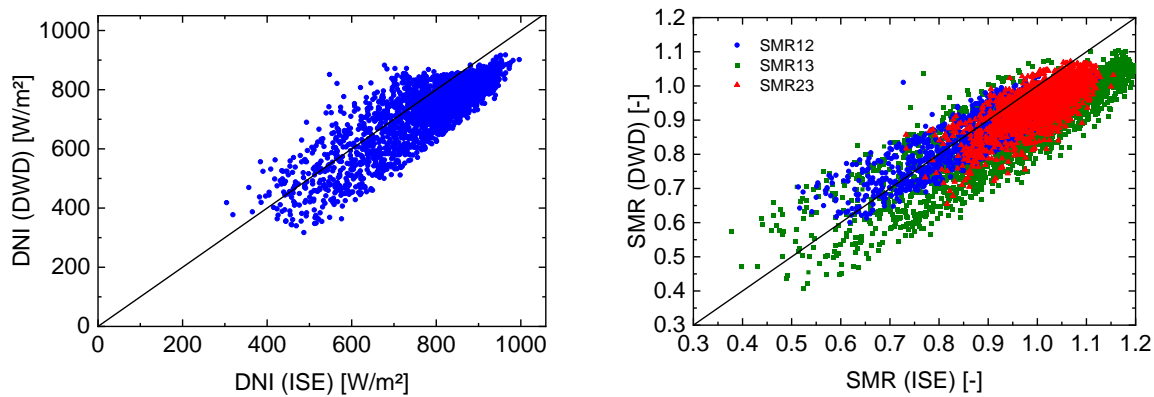


Abbildung 35: Links: „Direct Normal Irradiance (DNI)“ berechnet durch Fraunhofer ISE aus Satelliten basierten Spektren ermittelt durch den DWD gegenüber terrestrisch gemessen am Fraunhofer ISE. Rechts: „Spectral Matching Ratio (SMR)“ berechnet durch Fraunhofer ISE aus Satelliten basierten Spektren ermittelt durch den DWD gegenüber terrestrisch gemessenen SMR Werten am Fraunhofer ISE. Sowohl DNI als auch SMR Werte sind für den Standort Freiburg, Deutschland ermittelt. Die schwarze Linie stellt jeweils die theoretisch bestmögliche Korrelation dar.

Außerdem wurde der simulierte Energieertrag für die in AP4.1 definierten Standorte der Referenzdatensätze und für die Energieertragsberechnung in AP4.2 untersucht. Die Standorte sind in Tabelle 3 und Tabelle 4 aufgelistet. Zu jedem Standort wurden Werte für die optische Dichte der Aerosole (AOD), und der Wassergehalt der Atmosphäre (PW) aus der Aeronet Datenbank & Umgebungstemperatur aus der PVGIS Datenbank extrahiert. Jeder der Standorte umfasst dabei ca. ein Jahr Daten mit einer zeitlichen Auflösung von 5 bis 10 Minuten (Daten aus PVGIS sind stündliche Werte). AOD, PW und Umgebungstemperatur in Freiburg ist lokal am Fraunhofer ISE gemessen. Aus AOD und PW wurde den für jeden Standort im Jahresverlauf Spektren berechnet. Der komplette Datensatz dieser Standorte umfasst ca. 70000 Spektren. Daher stellt sich hier die Frage, inwieweit die Anzahl der Spektren reduziert werden kann. Das Ziel ist es, die Ertragsberechnung basierend auf diesem Datensatz möglichst Zeit reduziert und dennoch ausreichend genau durchführen zu können. Die drei größten Einflussfaktoren auf die spektrale Zusammensetzung der DNI sind dabei AM, AOD und PW. Die 2-dimensionalen Histogramme in Abbildung 37 zeigen die Verteilung der DNI als Funktion der AOD (links) und als Funktion von PW (rechts), kombiniert aus allen Standorten. Über 70 % der Daten haben dabei DNI Werte über 700 W/m² und niedrige AOD und PW Werte unter 0.1 bzw. unter 1.5 cm.

Tabelle 3: Liste der Standorte

Land	Standort	Breitengrad	Längengrad	Höhe	UTC	DNI (TMY)
[-]	[-]	[°]	[°]	[m]	[h]	[kWh/m ² /a]
USA	Kalifornien	34.380	-117.680	2170	-8	2877
Australien	Fowlers Gap	-31.086	141.701	184	11	2756
Deutschland	Freiburg	48.010	7.833	280	1	1005
UAE	Hamim	22.967	54.300	114	4	2446
Mexiko	Hermosillo	29.075	-110.960	202	-7	2851
Pakistan	Karachi	24.946	67.136	46	5	2121
Spanien	Majadas	39.955	-5.776	259	1	2298
Chile	PSDA	-24.090	-69.929	965	-4	3305
Ägypten	Qena	26.200	32.747	75	2	2805
Südafrika	Upington	-28.379	21.156	866	2	2717

Tabelle 4: Liste der Standorte mit Mittelwert für AOD, PW und SMR Werte.

Land	DNI (TMY)	mittlere AOD	mittlere PW	mittlere Tamb	mittlere AM	mittlere SMR12	mittlere SMR23
[-]	[kWh/m2/a]	[-]	[cm]	[°C]	[-]	[-]	[-]
USA	2877	0.034	0.43	18.8	2.77	0.93	0.91
Australien	2756	0.036	1.38	25.2	2.28	0.95	1.00
Deutschland	1005	0.172	1.99	21.8	1.97	0.92	0.98
UAE	2446	0.272	1.70	29.8	2.48	0.81	0.88
Mexiko	2851	0.113	1.96	32.4	2.36	0.91	0.97
Pakistan	2121	0.422	1.88	31.1	2.67	0.73	0.80
Spanien	2298	0.098	1.60	26.8	2.14	0.94	0.99
Chile	3305	0.052	0.79	27.3	2.15	0.96	0.94
Ägypten	2805	0.227	1.36	33.7	2.46	0.83	0.89
Südafrika	2717	0.083	1.23	28.4	2.32	0.93	0.97

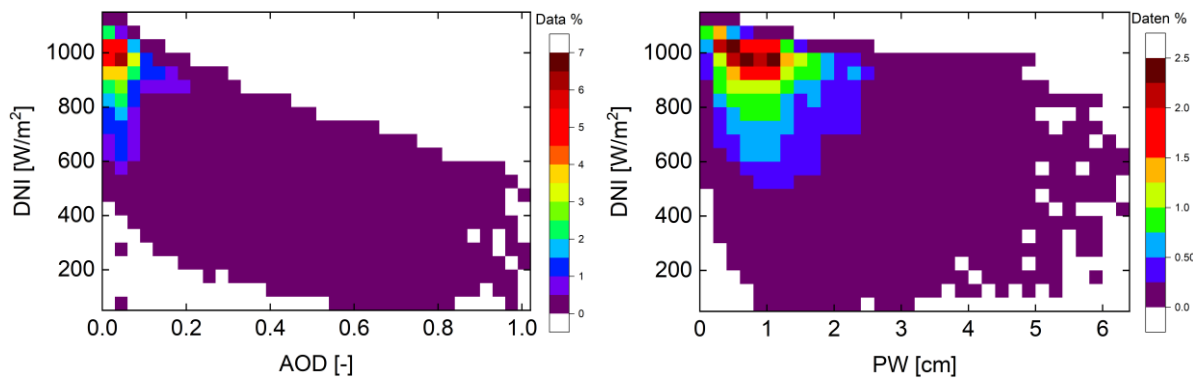


Abbildung 36: 2-dimensionales Histogramm der Verteilung der DNI als Funktion der AOD (links) und als Funktion von PW (rechts), kombiniert aus allen Standorten. Über 70 % der Daten haben dabei DNI Werte über 700 W/m² und niedrige AOD und PW Werte unter 0.1 bzw. unter 1.5 cm.

Der Einfluss der saisonalen und standortabhängigen spektralen Zusammensetzung auf die Modulausgangsleistung aufgrund von AM, AOD und PW ist in Abbildung 37 dargestellt. Dort ist die daraus resultierende Abweichung im Energieertrag gegenüber dem Energieertrag berechnet für eine konstante spektrale Zusammensetzung dargestellt. Als konstante spektrale Zusammensetzung wurde hierbei das AM1.5d Referenzspektrum verwendet, normiert auf die jeweilige DNI. Der Energieertrag wurde jeweils als Summe über die einzelnen Ausgangsleistungen berechnet. Hierbei wurden die einzelnen Ausgangsleistungen als Produkt aus Kurzschlussstromdichte (I_{sc}), offener Klemmenspannung (V_{oc}) und Füllfaktor (FF) berechnet. Dabei wurden I_{sc} , V_{oc} und FF durch Funktionen in Abhängigkeit von DNI, spektraler Zusammensetzung und Umgebungstemperatur und mehreren Fitparametern dargestellt [12]. Dabei ergaben sich Abweichungen im Mittel von 5 % mit einer Bandbreite im Bereich 2 bis 12 %, abhängig vom Standort. Die größeren Abweichungen in Pakistan, Ägypten und UAE gehen einher mit höheren AOD und PW Werten.

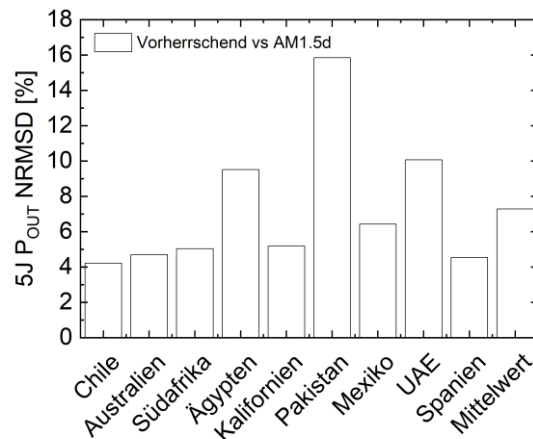


Abbildung 37: Abweichung im Energieertrag bei Berechnung mit der jeweiligen vorherrschenden spektralen Einstrahlung gegenüber einer konstanten spektralen Zusammensetzung (AM1.5 Referenzspektr) für die untersuchten Standorte. Dabei zeigt sich der Einfluss der spektralen Zusammensetzung auf den Energieertrag im Bereich von 2 bis 12 %. Wobei die Standorte mit hohen Abweichungen mit hohen AOD und PW Werten einhergehen.

Im nächsten Schritt wurde nun die Anzahl verwendeter Spektren systematisch reduziert. Diese Reduktion basiert auf einer Einstufung der einzelnen Spektren durch die Parameter DNI, Umgebungstemperatur, AOD, PW, AM und die spektralen Parameter Z_{1-2} und Z_{1-3} . Die spektralen Parameter Z sind dabei analog den SMR Werten ein Maß für die spektrale Zusammensetzung des jeweiligen Spektrums. Die Einstufung in Cluster erfolgte dabei auf Basis des k-Means-Algorithmus. Dieser erlaubt eine Gruppierung der Daten auf Gemeinsamkeiten in allen Freiheitsgraden durch Minimierung des quadratischen euklidischen Abstands zwischen den Datenpunkten und dem Clusterschwerpunkt. Tabelle 5 zeigt dabei als Beispiel ein Vergleich von Clusterschwerpunkten zur Klassifizierung der Daten an allen Standorten in 6 Cluster gegenüber den jeweiligen Werten des Referenzspektrums.

Tabelle 5: Einstufung der Parameter aller Standorte in 6 Cluster basierend auf dem k-Means-Algorithmus

Zentroid # [-]	DNI [W/m ²]	Z1-2 [-]	Z1-3 [-]	Tamb [°C]	AOD [-]	PW [cm]	AM [-]
1	288	-0.352	-0.512	26.9	0.388	1.89	4.98
2	512	-0.188	-0.254	24.4	0.219	1.62	4.25
3	668	-0.114	-0.149	22.8	0.156	1.38	3.52
4	801	-0.050	-0.069	23.2	0.116	1.33	2.46
5	917	-0.004	-0.013	24.0	0.071	1.28	1.72
6	1011	0.018	-0.006	24.3	0.040	0.82	1.34
Ref AM1.5d	900	0.000	0.000	25.0	0.084	1.42	1.50

Abbildung 38 links zeigt nun die spektrale Einstrahlung berechnet für jeden der 6 Datenpunkte aus Tabelle 5. Dazu wurden AOD, PW und AM als Eingabeparameter für SPECTRL2 verwendet. SPECTRL2 ist ein clear-sky Model von Bird et al. [13] für die spektrale Einstrahlung. Dazu werden nun EQEs von verschiedenen Mehrfachsolarzellen verwendet, um in Verbindung mit diesen 6 spektralen Einstrahlungen die Teilzellphotoströme zu berechnen. Damit konnte die Summe der Kurzschlussstromdichte, als Maß für den Energieertrag der AZUR SPACE 5J Solarzelle am jeweiligen Standort

berechnet werden. Diese Summe wurde einmal berechnet unter Verwendung der 6 Cluster Spektren aus Abbildung 38 links und einmal unter Verwendung aller ca. 70000 einzelnen Spektren. Abbildung 38 rechts ist dann das Verhältnis von beiden Summen als Maß für die Abweichung aufgrund der Reduktion der Spektren basierend auf 6 Cluster als Funktion der Anzahl der Cluster dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Verwendung der sechs Clusterspektren Abweichungen von +4 zu -6 % zwischen den einzelnen Standorten generiert. Somit konnte demonstriert werden, dass mit der hier beschriebenen Clusterung von Spektren (bzw. Clusterung der Inputparameter AOD, PW und AM) ein Referenzsatz von 6 Spektren generiert werden konnte, der die meisten typischen CPV Standorte sehr gut widerspiegelt.

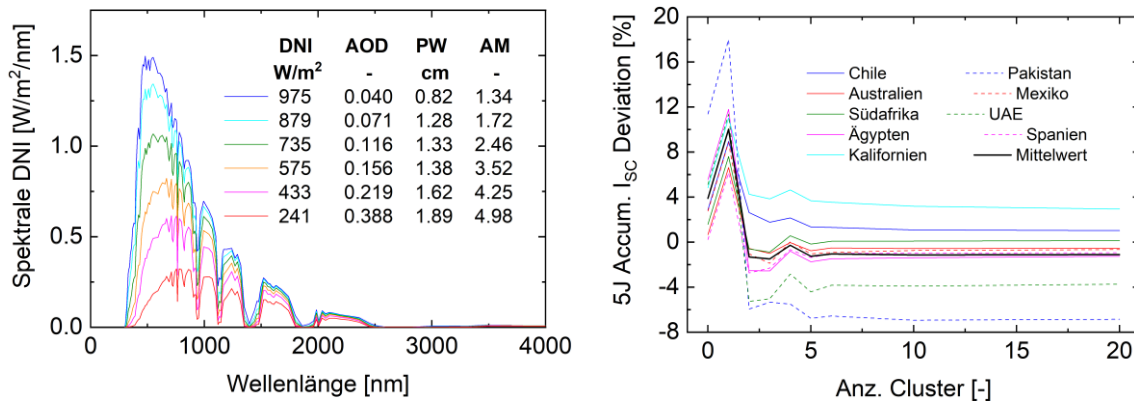


Abbildung 38: Links: Spektrale DNI als Funktion der Wellenlänge berechnet für die sechs Clusterzentroiden unter Verwendung des Modells SPECTRL2 und AOD, PW und AM als Eingabeparameter. Rechts: Abweichung in der Summe von Kurzschlussstromdichten einer AZUR SPACE 5J Solarzelle am jeweiligen Standort. Die Abweichung ist berechnet zwischen der Summe der I_{sc} unter Verwendung der sechs Clusterspektren und der Summe unter Verwendung alle Spektren am jeweiligen Standort.

Des Weiteren wurde in AP4.1 ein Spectrafy SolarSim-D2 Sensor am Fraunhofer ISE evaluiert. Der Sensor basiert auf wenigen schmalbandigen Einzelmessungen der Sonnenintensität, über die das solare Spektrum im gesamten Wellenlängenbereich sowie daraus die integrale Direktnormaleinstrahlung berechnet werden können. Ein solcher Sensor wurde bereitgestellt durch AZUR SPACE und am Fraunhofer ISE auf einer Sonnennachführeinheit montiert (siehe Abbildung 39). Zusätzlich wurden am Fraunhofer ISE automatisiert die Messwerte eines Pyrheliometers, eines Spektralradiometers von Tec5 und eines Komponentenzellensensors aufgezeichnet. Diese Messwerte wurden mit den Ausgabewerten des Spectrafy Sensors verglichen, um dessen Messgenauigkeit zu bewerten. Zunächst wurde aus den Spectrafy Messwerten die vorherrschende DNI ermittelt und mit den Messwerten des Pyrheliometers verglichen. Abbildung 39 rechts zeigt die errechnete Abweichung zwischen beiden Messgeräten in Form eines Histogramms. Der Großteil der Abweichung liegt im Bereich von 0 bis 2.5 %. Dies lässt auf eine etwas höhere Messunsicherheit als bei der Verwendung von Pyrheliometern schließen.

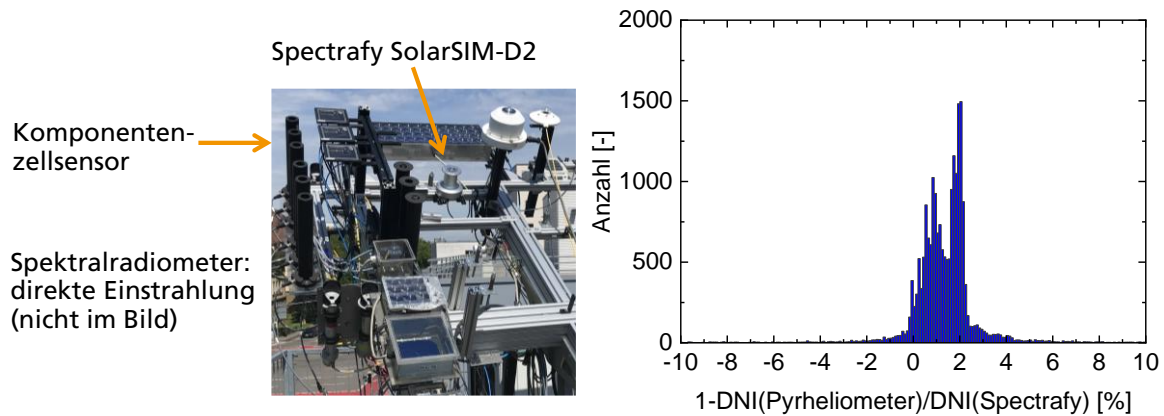


Abbildung 39: Links: Spectrafy Sensor, Pyrheliometer zur Bestimmung der DNI und Komponentenzellsensor zur Bestimmung von SMR-Werten. Alle drei Sensoren sind auf einer Sonnennachführeinheit am Fraunhofer ISE montiert. Zusätzlich ist ein Tec5 Spektralradiometer vorhanden, das ebenfalls zur Bestimmung von SMR-Werten verwendet wurde. Rechts: Abweichung zwischen DNI Werten aus Pyrheliometer Messungen gegenüber Spectrafy DNI Werten. Die Abweichung ist etwas größer als typische Messunsicherheiten von Pyrheliometern im Bereich von 2%.

Neben der Möglichkeit DNI Werte zu bestimmen, erlaubt der Spectrafy Sensor die Berechnung des kompletten Spektrums der Direkteinstrahlung. Daraus können sogenannte „Spectral Matching Ratios“ (SMR) berechnet werden. Diese wurden im QuintuMod Projekt als Vergleichsgröße zwischen Spektralradiometer, Spectrafy und Komponentenzellsensor benutzt. Spektralradiometer und Komponentenzellsensor sind etablierte Messgeräte, die zur Bewertung der Messgenauigkeit des Spectrafy Sensors dienen. Abbildung 40 zeigt die berechnete Abweichung zu den Spektralradiometermessungen (links) und den Komponentenzellenmesswerten (rechts). Die ermittelten Abweichungen der Spectrafy SMR-Werte gegenüber den Vergleichsmesswerten liegt in einer erwartbaren Größenordnung für diese Messmethodik. Allerdings zeigen auch die SMR-Werte im Vergleich zwischen Spektralradiometer und Komponentenzellen kleinere Abweichungen.

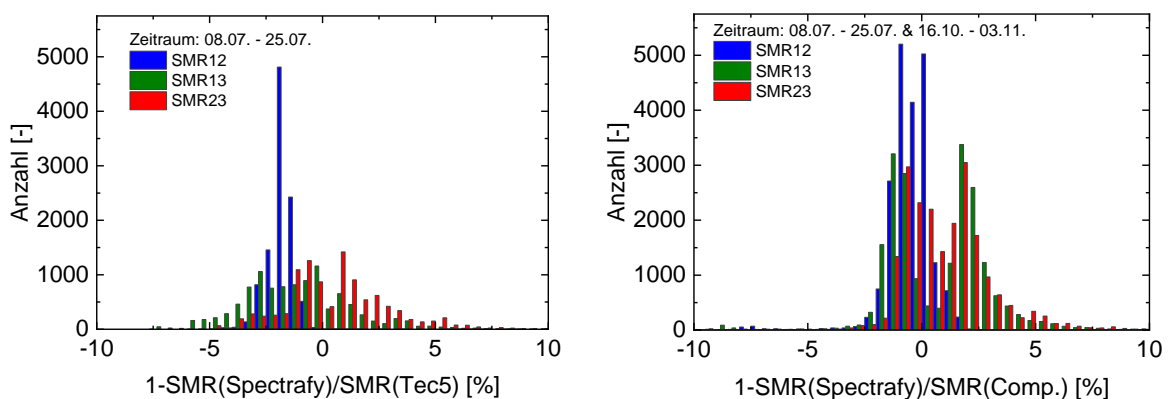


Abbildung 40: Links: Histogramm der Abweichung von SMR-Werten ermittelt aus Spectrafy Messungen gegenüber Tec5 Spektralradiometer Messungen. Rechts: Histogramm der Abweichung von SMR-Werten ermittelt aus Spectrafy Messungen gegenüber Komponentenzellen Messungen.

Letztlich lässt sich dennoch schlussfolgern, dass der Spectrafy Sensor eine durchaus akzeptable Alternative zu Pyrheliometer, bzw. Komponentenzellen/Spektralradiometer Messungen darstellt. Nicht bewertet wurde in dieser Untersuchung die Zuverlässigkeit der Messmethode über einen längeren Zeitraum, bzw. Stabilität des Spectrafy Sensors.

AP4.2: Detaillierte Energieertrags-Berechnungen für 5J-basierte CPV-Module

Zur Evaluierung der Energieertragsbestimmung mit der Software PVsyst anhand von Referenzwerten wurde ein Modell zur detaillierten Energieertrags-Berechnung von AZUR 5J Modulen aufgesetzt und parametrisiert. Dabei wird auf das am Fraunhofer ISE bereits etablierte Modell „YieldOpt“ zurückgegriffen. Dieses ermöglicht die Berechnung der Strom-Spannung-Charakteristik von mehrfachzellbasierten (C)PV-Modulen in Abhängigkeit des Standorts und der Außenbedingungen. Die Berechnung der Teilzellströme basiert auf den beiden entscheidenden Eingabeparametersätzen: der spektralen Einstrahlung und der externen Quanteneffizienz (EQE) der AZUR 5J Module. Die spektrale Einstrahlung ist für verschiedene Standorte unter Verwendung von AM, PW- und AOD-Werten als Eingabeparameter (vergleiche AP 4.1) unter Verwendung des Softwaretools SMARTS2 berechnet. Die 5J Modul-EQE wurde von AZUR berechnet und zur Verfügung gestellt.

YieldOpt verwendet ein 2-Dioden-Modell zur Berechnung der elektrischen Charakteristik der einzelnen Teilzellen einer Mehrfachszelle. Kombiniert werden diese 2-Dioden-Modelle mit den Ergebnissen der Strahlverfolgungssimulation der von AZUR SPACE verwendeten optischen Elemente und einer Berechnung der jeweils Standort und Jahreszeit abhängigen spektralen Einstrahlung. Daraus resultiert ein detailliertes elektrisches Modell des AZUR SPACE CPV-Moduls.

Zur Parametrierung von YieldOpt wurde auf umfangreiche Messungen des Fraunhofer ISE Kalibrierlabors zurückgegriffen. Dabei wurden verschiedene Varianten der AZUR SPACE 5J Solarzelle elektrisch charakterisiert (siehe AP1.2). Unter anderem wurde die Externe Quanteneffizienz und die Strom-Spannungs-Kennlinie bei verschiedenen Solarzelltemperaturen ermittelt. Aus diesen EQEs wurden dann alle notwendigen Parameter extrahiert, um die Kurzschlussstromdichten und die Dunkelstromdichten der einzelnen Teilzellen der 5J Solarzelle innerhalb des YieldOpt Modells zu berechnen, unter Anwendung physikalischer Modelle.

Die Abbildung 41, Abbildung 42 und Abbildung 43 zeigen Vergleiche zwischen Messwerten und simulierten Werten von AZUR SPACE 5J Solarzellen unter Verwendung der ermittelten Eingabeparameter. Dabei zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten Werten im Solarzelltemperaturbereich zwischen 25 und 90 °C. Unter Verwendung der Ergebnisse der Strahlverfolgungssimulation wurden dann mittels YieldOpt Energieerträge von AZUR SPACE 5J Modulen an verschiedenen Standorten berechnet und mit PVsyst Berechnungen verglichen.

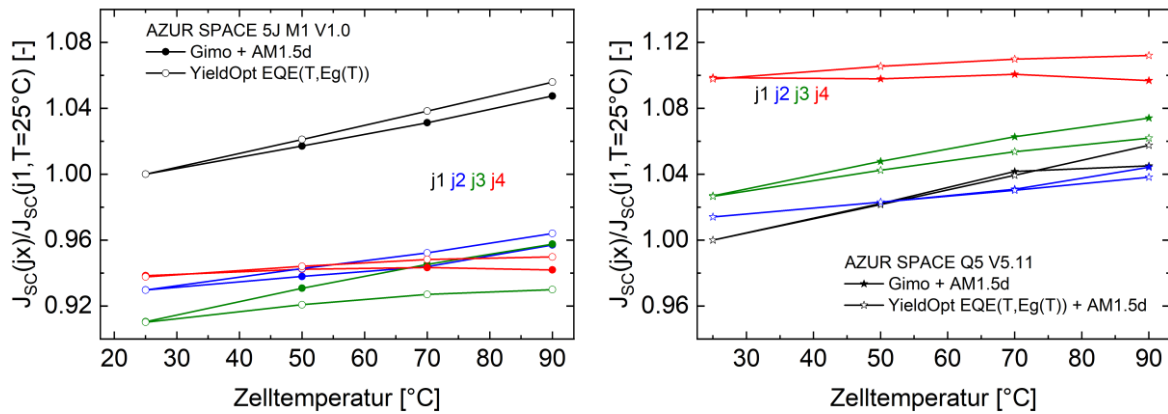


Abbildung 41: Kurzschlussstromdichte J_{sc} geteilt durch die Kurzschlussstromdichte der ersten Teilzelle j_1 bei einer Temperatur von 25 °C. Farblich dargestellt sind die Stromdichten der einzelnen Teilzellen. Die Teilzelle j_5 mit der niedrigsten Bandlücke hat einen großen Überschussstrom und ist daher hier nicht dargestellt. Offene Datenpunkte sind mit YieldOpt berechnet, geschlossene Datenpunkte resultieren aus gemessenen EQE-Daten. Links sind die Ergebnisse für die AZUR 5J Variante V1.0 und rechts für die Variante V5.11 gezeigt. Beide Graphen zeigen eine gute Übereinstimmung von YieldOpt Werten mit den Werten aus gemessenen EQEs.

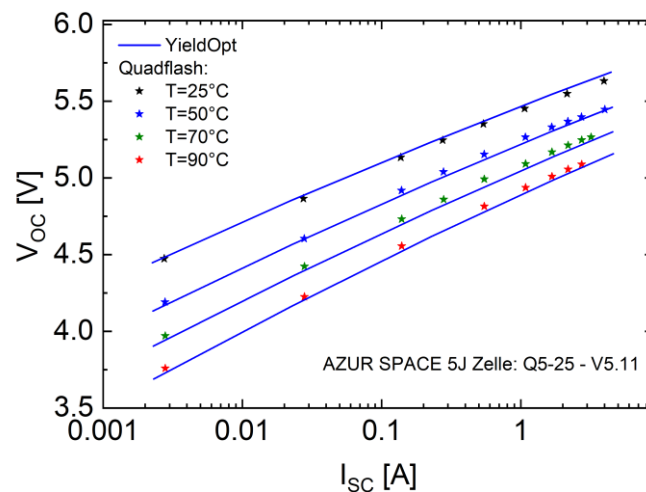


Abbildung 42: Offene Klemmenspannung V_{oc} der AZUR SPACE 5J Solarzelle Q5-25 als Funktion des Kurzschlussstroms I_{sc} . Die Sterne sind Daten gemessen am Fraunhofer ISE QuadFlash Sonnen-simulator [14] und die Linien sind Daten berechnet mit dem Simulationstool YieldOpt. Die V_{oc} - I_{sc} Paare wurden jeweils für vier verschiedenen Zelltemperaturen simuliert und gemessen.

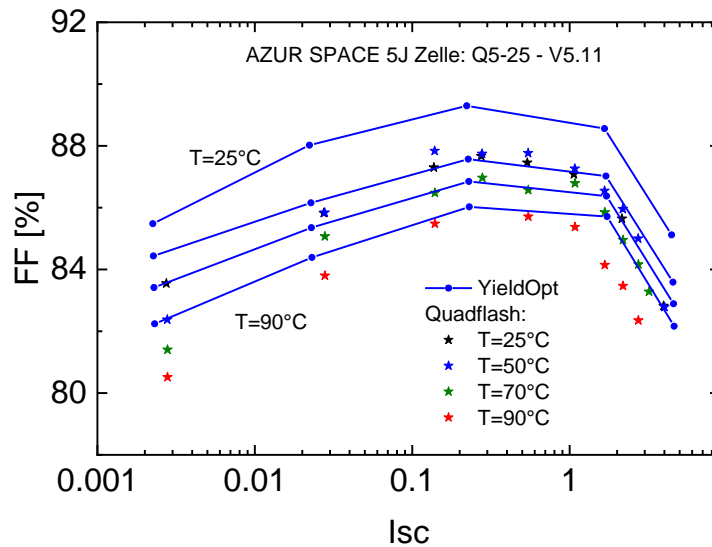


Abbildung 43: Füllfaktor FF der AZUR SPACE 5J Solarzelle Q5-25 als Funktion des Kurzschlussstroms I_{sc} . Die Sterne sind Daten gemessen am Fraunhofer ISE QuadFlash Sonnensimulator und die Linien sind Daten berechnet mit dem Simulationstool YieldOpt. Die FF - I_{sc} Paare wurden jeweils für vier verschiedenen Zelltemperaturen simuliert und gemessen.

Abbildung 44 zeigt als Überprüfung des detaillierten Modells YieldOpt eine Gegenüberstellung von berechneten Daten mit in Freiburg gemessenen Daten im Laufe eines Jahres. Die Abhängigkeit der Modulausgangsleistung von der DNI und der Modulkurzschlussstromdichte von der Zusammensetzung der spektralen Einstrahlung (SMR12) zeigen dabei eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Modell. Der Modulkurzschlussstrom wurde auf die DNI normiert. Die Zusammensetzung der spektralen Einstrahlung ist durch das sogenannte „Spectral Matching Ratio“ SMR12 dargestellt. SMR-Werte kleiner eins stehen für eher „rot-lastige“ und Werte über eins für eher „blau-lastige“ spektrale Bedingungen.

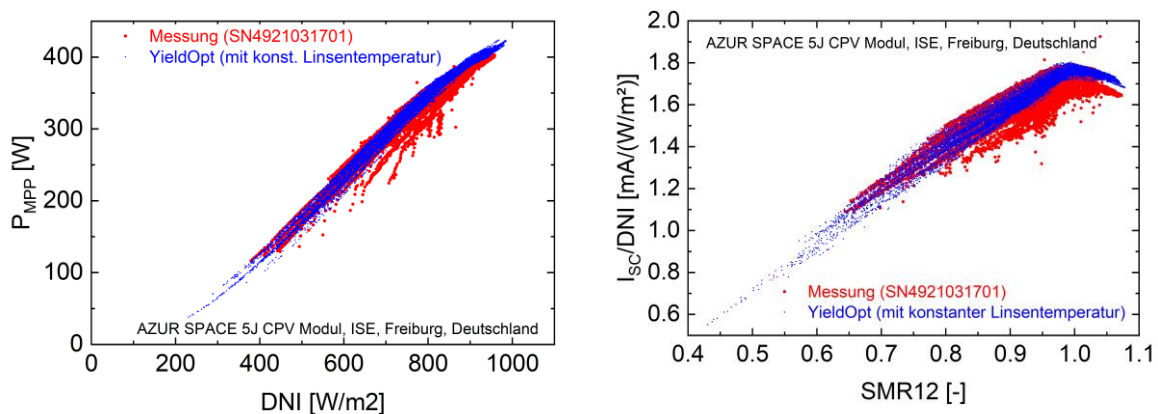


Abbildung 44: Modulausgangsleistung P_{MPP} als Funktion der direkten Normaleinstrahlung und Kurzschlussstrom I_{sc} als Funktion des Spectral Matching Ratios SMR12. Gezeigt ist jeweils ein Vergleich zwischen Messwerten und Werten berechnet mit dem Simulationstool YieldOpt am Standort Freiburg im Laufe eines Jahres. Dabei zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung.

Eine Anwendung des YieldOpt Modells innerhalb des Projekts war die Berechnung der Abhängigkeit der Modulkurzschlussstromdichte von der spektralen Einstrahlung bei Verwendung verschiedener Fünffachzellvarianten. Abbildung 45 zeigt, dass die verschiedenen Zellvarianten ihren jeweiligen normierten maximalen Kurzschlussstrom bei unterschiedlichen spektralen Bedingungen erzielen. Diese

Information ist bei der Optimierung der Modulausgangsleistung relevant. Des Weiteren konnte mit dem detaillierten Modell die in Abhängigkeit der spektralen Bedingungen Strom limitierende Teilzelle aufgezeigt werden. Abbildung 45 rechts zeigt dies exemplarisch für eines der untersuchten AZUR 5J Zelldesigns.

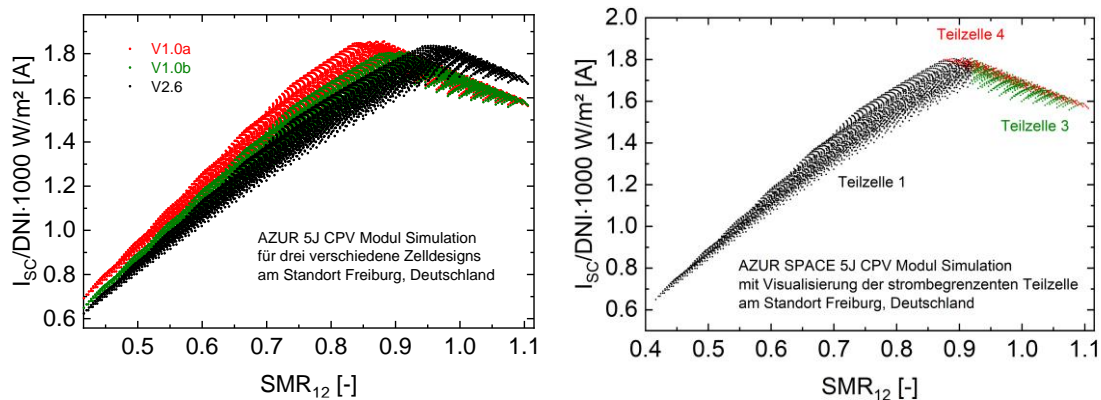


Abbildung 45: Modulkurzschlussstrom (I_{sc}) normiert auf die DNI als Funktion des Spectral Matching Ratio's SMR_{12} . Links: Vergleich verschiedener 5J AZUR Varianten im AZUR CPV-Modul. Das Maximum im normierten Kurzschlussstrom tritt bei unterschiedlichen SMR -Werten auf. Rechts ist die jeweils Strom limitierende Teilsolarzelle exemplarisch für die Zellvariante „V1.0b“ angegeben. Für dieses Design limitieren entweder Teilzelle 1, 3 oder 4 der Fünffachsolarzelle.

Eine weitere Anwendung des Modells YieldOpt ist der Einfluss des Standorts auf die Bestimmung von sogenannten „Utilization Faktoren (UF)“. Die Software PVsyst zur Berechnung von Energieerträgen an beliebigen Standorten verwendet UF, um den Einfluss der spektralen Zusammensetzung des Sonnenlichts auf die Ausgangsleistung von CPV-Modulen zu berücksichtigen. Bei den UF handelt es sich um Dachfunktionen, die in Abhängigkeit von Airmass und DNI die elektrische Modulausgangsleistung gezielt reduzieren. Airmass und DNI sollen dabei stellvertretend den Einfluss der spektralen Zusammensetzung des Sonnenlichts abbilden. Diese spektrale Zusammensetzung ist meist nicht verfügbar, wohingegen Airmass und DNI für nahezu beliebige Standorte erhältlich sind. Die Bestimmung der UF für eine bestimmte Modultechnologie basiert auf gemessenen Strom-Spannungs-Charakteristiken. Dabei stellt sich die Frage, ob die Bestimmung dieser UF abhängig vom jeweiligen Standort ist. Um dies zu untersuchen, wurde mit Hilfe der Fraunhofer ISE eigenen Simulationssoftware YieldOpt Strom-Spannungs-Charakteristiken von 5J CPV-Modulen an vier ausgewählten Standorten generiert. Diese vier Standorte sind in Abbildung 46 links dargestellt. Die Untersuchung wurde anhand von zwei unterschiedlichen AZUR SPACE 5J Modultypen durchgeführt. Dabei unterscheiden sich beide anhand der verwendeten 5J Solarzellen: Modul 1 verwendet 5J Solarzellen deren Stromanpassung zu einem Wirkungsgradmaximum bei rot lastigeren Spektren führt, als bei den in Modul 2 verwendeten Zellen. Abbildung 46 rechts zeigt die normierten Kurzschlussströme von AZUR SPACE 5J CPV-Modul 2 als Funktion der DNI. Die Kurzschlussströme wurden mit Hilfe von YieldOpt für die vier untersuchten Standorte berechnet. Dabei ist in Abbildung 46 rechts bereits ersichtlich, dass die Abhängigkeit der Stromgeneration von CPV-Modulen von der DNI an verschiedenen Standorten durchaus unterschiedlich sein kann.

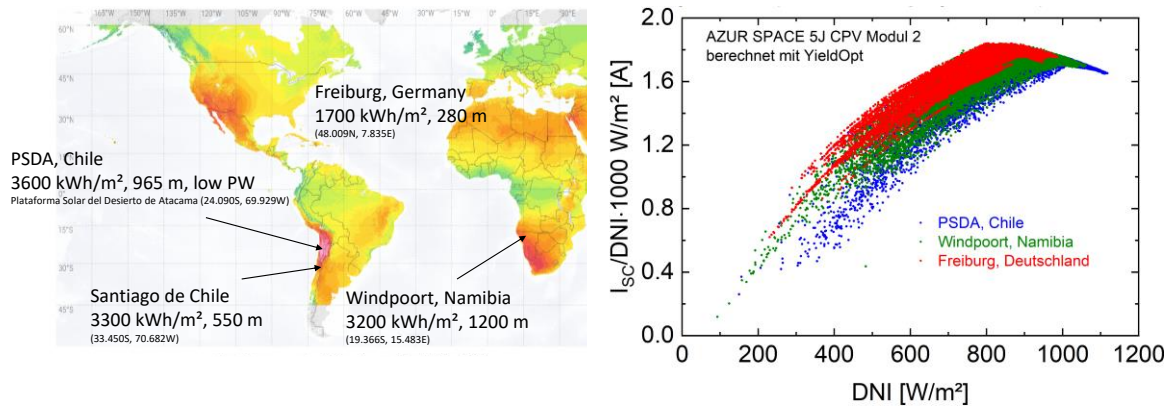


Abbildung 46: Links: Weltkarte mit farblicher Markierung der jährlichen direkten Sonneneinstrahlung. Die vier gekennzeichneten Standorte wurden in QuintuMod näher untersucht. Rechts: Normierter Kurzschlussstrom (I_{sc}) als Funktion der DNI exemplarisch an drei der vier Standorte für das Modul 2. Die Kurzschlussströme wurden mit der ISE eigenen Simulationssoftware YieldOpt berechnet.

Die in Abbildung 46 rechts gezeigten Kurzschlussströme wurden im Folgenden verwendet, um einzeln für jeden der vier Standorte UFs bzgl. der DNI und bzgl. der Airmass (AM) zu bestimmen. Abbildung 47 zeigt die jeweils ermittelten UFs. Es ist ersichtlich, dass die UF sich zwischen den Standorten unterscheiden. Dieses Ergebnis wurde im Rahmen der CPV-18 Konferenz [15] veröffentlicht.

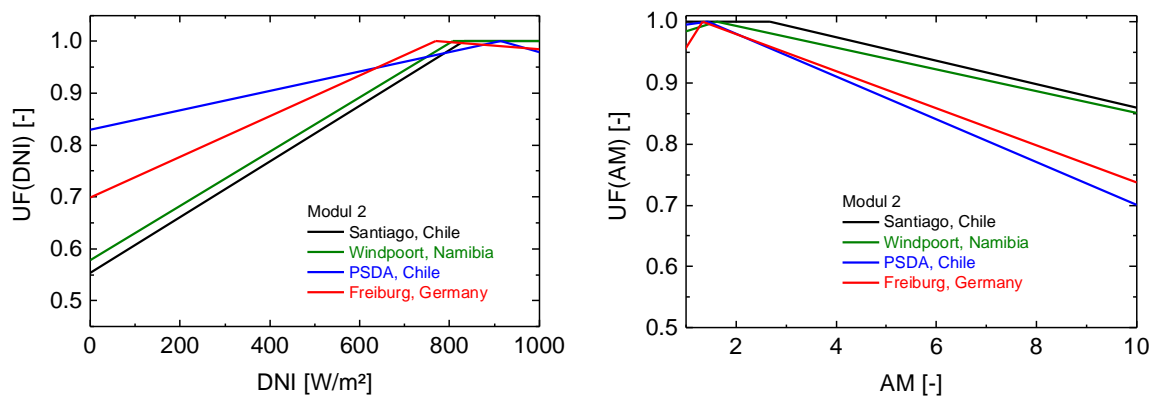


Abbildung 47: PVsyst utilization factors (UF) der DNI (links) und der Airmass AM (rechts) wie berechnet für vier verschiedene Standorte. Die UFs wurden aus simulierten IV-Daten ermittelt durch Fitten von zwei unabhängigen Dachfunktionen, für DNI und für AM. Die UFs sind für den Modultyp 2 gezeigt, dessen Wirkungsgrad bei SMR12 Werten um 1 sein Maximum erreicht. Die Variation der UF mit dem Standort für den Modultyp 1, dessen Wirkungsgrad sein Maximum bei roten spektralen Bedingungen erreicht ist ähnlich, aber mit verschobenen Dachspitzen zu höheren AM und niedrigeren DNI Werten.

Zunächst war unklar, inwieweit die Unterschiede in diesen UFs eine relevante Auswirkung auf den berechneten Energieertrag haben. Daher wurde im nächsten Schritt der Energieertrag am Standort Freiburg mit Hilfe von PVsyst für jeden der vier UF Parametersätze berechnet und mit dem in Freiburg gemessenen Energieertrag verglichen. Die Abweichungen zwischen gemessenem und berechnetem Energieertrag sind in Abbildung 48 dargestellt. Die PVsyst Berechnung ist dabei mit den vier unterschiedlichen UF Sätzen jeweils für Modul 1 und für Modul 2 durchgeführt worden (also jeweils vier Mal pro Modul). In jedem dieser Fälle wurde der an einem bestimmten Standort ermittelte UF Datensatz verwendet, aber der Energieertrag wurde jeweils für den Standort Freiburg berechnet in der jeweiligen Zeitperiode in der Modul 1 bzw. Modul 2 in Freiburg gemessen wurden. Die

Umgebungsbedingungen als Eingabe für PVsyst (DNI und Umgebungstemperatur) wurden den Messdaten in Freiburg entnommen. Auf diese Weise zeigt Abbildung 48 die Sensitivität der Abweichung in der Energieertragsberechnung durch PVsyst aufgrund der Verwendung von UF Parametersätzen, welche an unterschiedlichen Standorten (aber für dieselben 5J CPV-Module) ermittelt worden sind. Zum Beispiel zeigt die Abbildung, dass die Abweichung zwischen gemessenem und berechnetem Energieertrag für den UF Parametersatz bestimmt am Standort Santiago etwas größer ist, als wenn der UF Parametersatz verwendet wird, welcher am Standort Freiburg ermittelt wurde. Die Abweichung erhöht sich dabei von 1.1 % auf 2.0 % (Modul 1) und von 2.4 % auf 2.6 % (Modul 2). Wenn der UF Parametersatz vom Standort PSDA für das Modul 2 verwendet wird, ist die Abweichung im Energieertrag sogar niedriger als wenn der UF Parametersatz verwendet wird, der am Standort Freiburg ermittelt wurde. Insgesamt ist der Einfluss des Standorts an dem die UF bestimmt wurden jedoch verhältnismäßig klein.

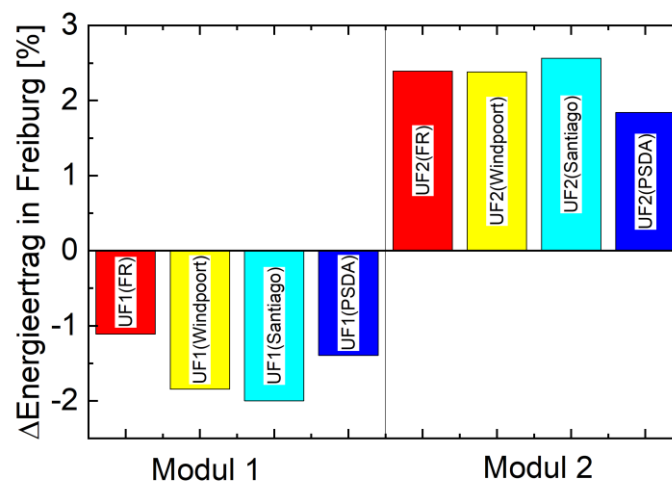


Abbildung 48: Abweichung zwischen berechnetem und gemessenem Energieertrag in Freiburg, Deutschland für zwei AZUR SPACE 5J CPV-Module. Die Berechnung des Energieertrags wurde mit PVsyst durchgeführt unter Verwendung von unterschiedlichen UF Parametersätzen. Diese Parametersätze wurden für Modul 1 (UF1) und Modul 2 (UF2) für vier verschiedene Standorte ermittelt (Freiburg (Germany), Windpoort (Namibia), Santiago (Chile) and PSDA (Chile)).

In AP4.3 konnte nachgewiesen werden, dass Energieertragsberechnungen für AZUR SPACE 5J CPV-Module am Standort Freiburg mit großer Genauigkeit möglich sind. Der Standort Freiburg ist dabei jedoch nur bedingt repräsentativ für CPV typische Standorte. Um dies auch für weitere Standorte zu untersuchen, wurde das Softwaretool YieldOpt verwendet um Vergleichsdaten an 10 verschiedenen Standorten zu generieren. Weiter oben unter AP4.1 in Tabelle 3 und Tabelle 4 sind diese Standorte aufgelistet. Dabei zeigt sich innerhalb dieser 10 Standorte eine große Variation an AOD und PW Werten und daraus resultierend eine große Bandbreite an Variation der spektralen Einstrahlung. Die verwendeten AOD und PW Werte wurden der AERONET Datenbank entnommen, die Umgebungstemperaturen der PVGIS Datenbank. Für jeden der 10 Standorte wurde sowohl mit PVsyst als auch mit YieldOpt der Energieertrag berechnet. Dabei wurden für beide Simulationstools die identischen Umgebungsparameter DNI, Umgebungstemperatur und Airmass verwendet. Für das Simulationstool YieldOpt wurde zusätzlich die spektrale Einstrahlung als Eingabeparameter verwendet. Die spektrale Einstrahlung wurde hierbei mit der Software SMARTS2 unter Verwendung von AOD, PW und Airmass als Eingabeparameter berechnet. Der Vorteil im Vergleich von YieldOpt zu PVsyst liegt dabei in der großen Unterschiedlichkeit der beiden Modelle: PVsyst betrachtet ein CPV-Modul als „Black Box“ und die Modulausgangsleistung wird anhand einer Vielzahl von Fitparametern simuliert. Demgegenüber verwendet YieldOpt zur Berechnung der Ausgangsleistung möglichst detaillierte

physikalische Modelle der einzelnen Bestandteile eines CPV-Moduls, wie der Mehrsolarzelle und der optischen Elemente.

Abbildung 49 zeigt exemplarisch den zeitlichen Verlauf des kumulierten Energieertrags im Vergleich zwischen PVsyst und YieldOpt an den Standorten Karachi, Pakistan und Hermosillo, Mexiko. Der Unterschied im berechneten Energieertrag zwischen PVsyst und YieldOpt liegt dabei bei ca. 4.5 % am Standort Karachi und unter 0.3 % am Standort Hermosillo.

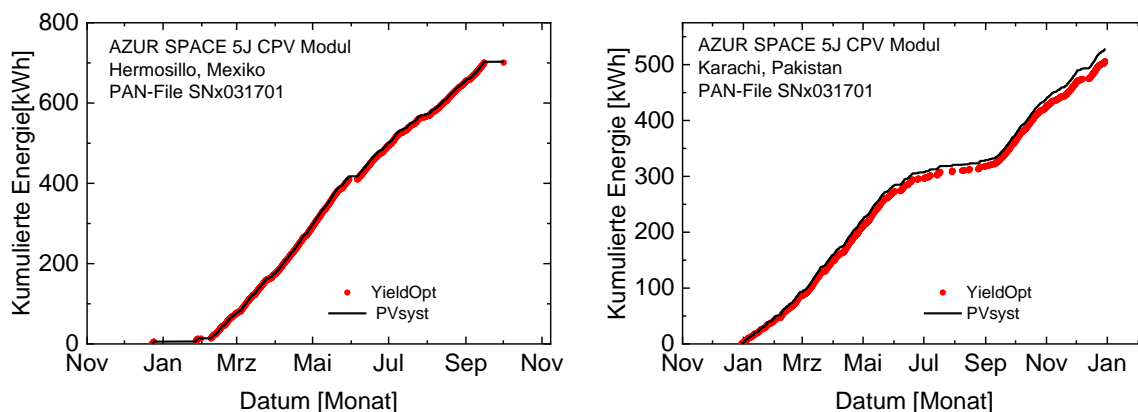


Abbildung 49: Kumulierter Energieertrag als Funktion der Zeit für die Standorte Hermosillo (links) und Karachi (rechts). Gezeigt ist jeweils die Gegenüberstellung des Energieertrags berechnet mit PVsyst und YieldOpt. Die Abweichung zw. YieldOpt und PVsyst ist in Abbildung 50 quantifiziert.

Abbildung 50 zeigt die Abweichung im Energieertrag zwischen PVsyst und YieldOpt an allen 10 berechneten Standorten. Der Standort Freiburg weist dabei eine Abweichung von 0 % auf. Dies resultiert aus dem Abgleich der beiden Energieertragsmodelle auf den Energieertrag am Standort Freiburg. Die größte Abweichung wurde für den Standort Karachi mit ca. 4.5 % berechnet. Die berechnete Abweichung an den übrigen 9 Standorte bewegt sich zwischen +3.0 % und -0.6 %. Dies bedeutet eine gute Übereinstimmung in der Berechnung von Energieerträgen an CPV typischen Standorten im Vergleich der beiden Modelle PVsyst und YieldOpt. Drei der vier Standorte mit der größten Abweichung (Karchachi, Hamim, und Qena) weisen die höchsten AOD Werte der 10 untersuchten Standorte auf. Der vierte Standort mit höherer Abweichung (Table Mountain) fällt durch seine vergleichsweise niedrigen Umgebungstemperaturen und der größten Höhe von 2170 m auf (siehe auch Tabelle 3 und Tabelle 4). Bzgl. der hohen AOD Werte ist anzumerken, dass der Einfluss von Änderungen in der AOD nicht im Model PVsyst enthalten ist. Daher ist bei Standorten mit hohen AOD-Werten und Energieertragsberechnungen mit PVsyst Vorsicht geboten. Dabei ist zu bemerken, dass auch YieldOpt ein Modell ist, welches z.B. ebenso wie PVsyst die inhomogene Stromverteilung in den Teilzellen nicht berücksichtigt und somit von realen Energieerträgen abweichen kann. Daher ist speziell für eine Quantifizierung der Abweichung von PVsyst eine Untersuchung mit realen Messdaten an hoch AOD Standorten notwendig.

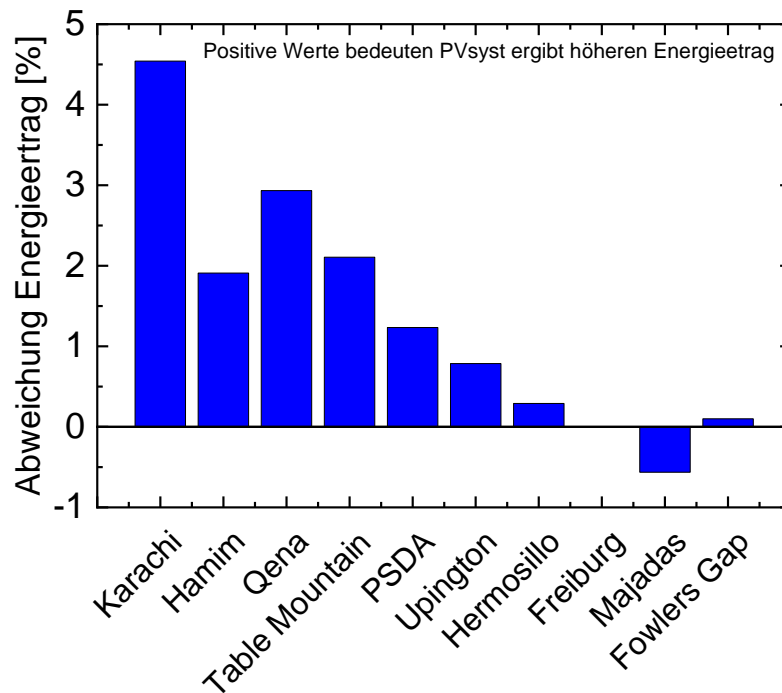


Abbildung 50: Abweichung im Energieertrag zwischen Berechnung mit YieldOpt und mit PVsyst für 10 verschiedene Standorte. Die Reihenfolge der Standorte auf der x-Achse ist sortiert nach aufsteigenden SMR23 Werten. Speziell Karachi und Qena sind Standorte mit hohen AOD Werten. Der Einfluss von hohen AOD Werten wird in PVsyst nicht abgebildet. Daher ist bei Energieertragsberechnungen mit PVsyst an Standorten mit hohen AOD Werten Vorsicht geboten.

AP4.3: Erstellung & Validierung von PVsyst PAN-Files

Für die ökonomische Bewertung von CPV Projekten ist die Erstellung und Validierung eines PVsyst PAN-Files für 5J CPV-Module von großer Wichtigkeit. Daher wurde in AP4.3 ein PAN-File für die AZUR SPACE 5J C3PV CPV Module erstellt. Dieses PAN-File ist ein Eingabedatensatz zur Parametrisierung der Software PVsyst welcher die Berechnung des Energieertrags für die AZUR SPACE Modultechnologie ermöglicht. Ein PAN-File für CPV-Module besteht im Wesentlichen aus der nominellen Modulausgangsleistung (z.B. nach IEC 62670-3 wie in AP 3.3 bestimmt) und den sogenannten Utilization Faktoren (UF). Die UFs bilden den Einfluss der Temperatur der Fresnellinse und der Zusammensetzung der spektralen Einstrahlung auf die Modulausgangsleistung ab. Die Bestimmung der Eingabeparameter und deren Überprüfung basieren auf elektrischen Messungen an den CPV-Modulen SN4920042101 und SN4921031701. Abbildung 51 zeigt beispielhaft die Messreihe des elektrischen Wirkungsgrads der Module SN4921031701 (benutzt zur Parameterbestimmung) und SN4921061701 (benutzt zur Parameterprüfung). Abbildung 52 zeigt, dass bei Wahl einer geeigneten nominellen Modulausgangsleistung der über einen längeren Zeitraum aufsummierte Energieertrag sehr präzise berechnet werden kann. Darüber hinaus zeigt Abbildung 53 eine gute Übereinstimmung zwischen der mit PVsyst berechneten und der gemessenen Ausgangsleistung als Stundenmittel. Als mittlere Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Ausgangsleistungen (im Stundenmittel) wurde ein Wert von ca. 3 % ermittelt.

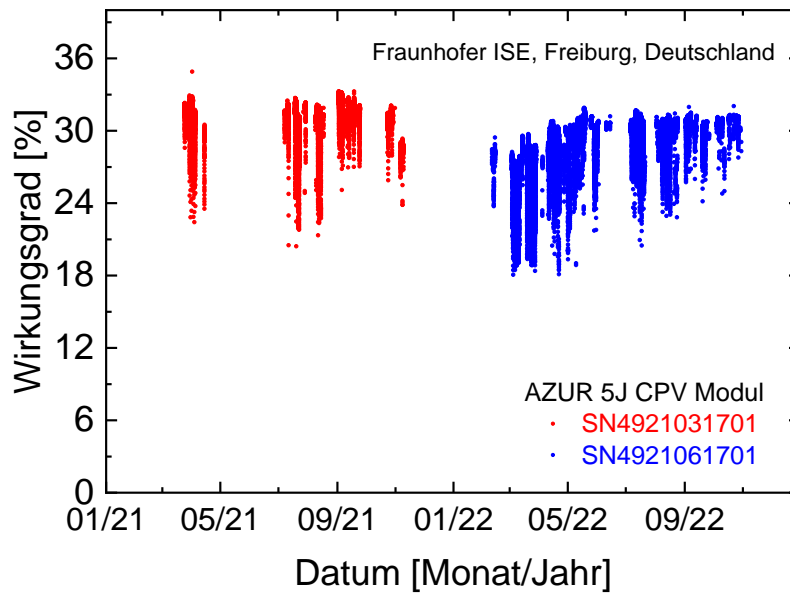


Abbildung 51: Wirkungsgrad als Funktion der Zeit gemessen in Freiburg an den AZUR SPACE 5J CPV-Modulen SN4921031701 und SN4921061701. Die PVsyst Eingabeparameter wurden im Wesentlichen am Modul SN4921031701 ermittelt. Die Messdaten des Moduls SN4921061701 im Jahr 2022 wurden zur Prüfung dieser Eingabeparameter im Hinblick auf die Energieertragsberechnung verwendet.

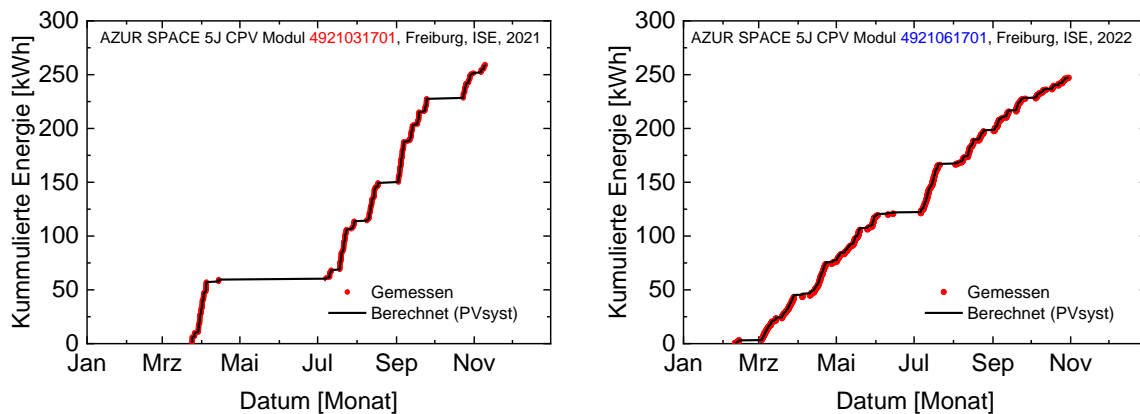


Abbildung 52: Kumulierte Energie als Funktion der Zeit im Vergleich von Messdaten und PVsyst Berechnung am Standort Freiburg. Links für das Modul SN4921031701 und rechts für SN4921061701 mit der Abweichung im gesamten Energieertrag von 0.43 % (links) und 0.13 % (rechts). Dabei wurde der identische Eingabeparametersatz für beide Module verwendet, lediglich die verwendete nominelle Leistung 523 W (links) und 508 W (rechts) unterscheidet sich.

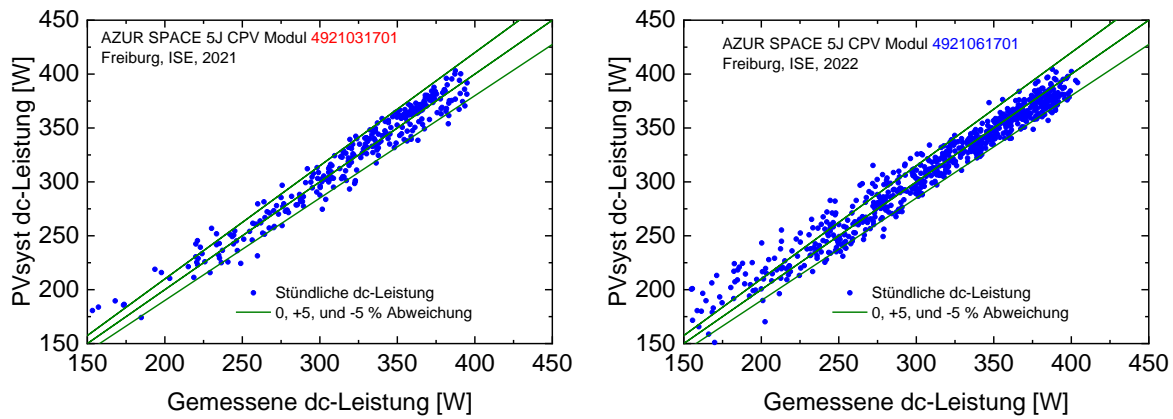


Abbildung 53: Korrelation der CPV-Modul DC-Leistung als Stundenmittel berechnet mit PVsyst gegenüber der gemessenen DC-Leistung am Standort Freiburg für die beiden AZUR SPACE Module SN4921031701 (links) und SN4921061701 (rechts). Zusätzlich dargestellt sind jeweils Abweichungen von 0, +5 und -5 %.

Die im PAN-File zusammengefassten PVsyst Eingabeparameter sind anhand von CPV Modulmessdaten am Standort Freiburg ermittelt und geprüft worden. Es ist wünschenswert die Energieertragsberechnung an weiteren Standorten und vor allem auch anhand von Kraftwerksdaten zu überprüfen. Daher wurde am Standort Port Elisabeth in Südafrika innerhalb des QuintuMod Projekts ein AZUR SPACE CPV System installiert. Dieses System ist mit drei AZUR SPACE 5J CPV-Modulen bestückt. Diese Module sind parallel zueinander verschaltet und an einen Wechselrichter angeschlossen. Dabei wird die DC-Ausgangsleistung aufgezeichnet. Zusätzlich ermöglicht ein Datenlogger die Aufzeichnung von Umgebungstemperatur und DNI. Nähere Details zum CPV System und zur Datenaufzeichnung sind im Abschlussbericht von AZUR SPACE zu finden. Die Messdaten des CPV Systems wurden von AZUR SPACE für den Monat Mai zur Verfügung gestellt und von Fraunhofer ISE ausgewertet. Weitere verwendbare Messdaten lagen zum Projektende noch nicht vor. Messdaten werden jedoch weiterhin aufgezeichnet und können auch nach Projektende zur Evaluierung von AZUR SPACE Energieertragsberechnungen dienen. Abbildung 54 zeigt den Vergleich zwischen gemessenen Werten und der Berechnung mit PVsyst. Die PVsyst Berechnung erfolgte mit dem oben beschriebenen PAN-File und 508 W nomineller Leistung als Eingabeparameter (siehe Abbildung 52 Modul SN4921061701). Links ist die kumulierte Energie als Funktion der Zeit dargestellt. Dabei zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit einer Abweichung in der kumulierten Energie im gesamten Zeitraum von 1.7 %. Abbildung 54 rechts zeigt die Ausgangsleistung als Stundenmittel und als Funktion der DNI. Auch dabei zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung. Kleinere Abweichungen im Energieertrag zwischen Messdaten und PVsyst sind nicht überraschend, da das verwendete PAN-File anhand eines einzelnen Moduls erstellt wurde und beim Energieertrag eines CPV Systems zusätzliche Verluste auftreten (Unterschiede in den Modulen, Modulverschaltung, etc.). Diese können später noch in die Parametrierung der Software PVsyst mit aufgenommen werden.

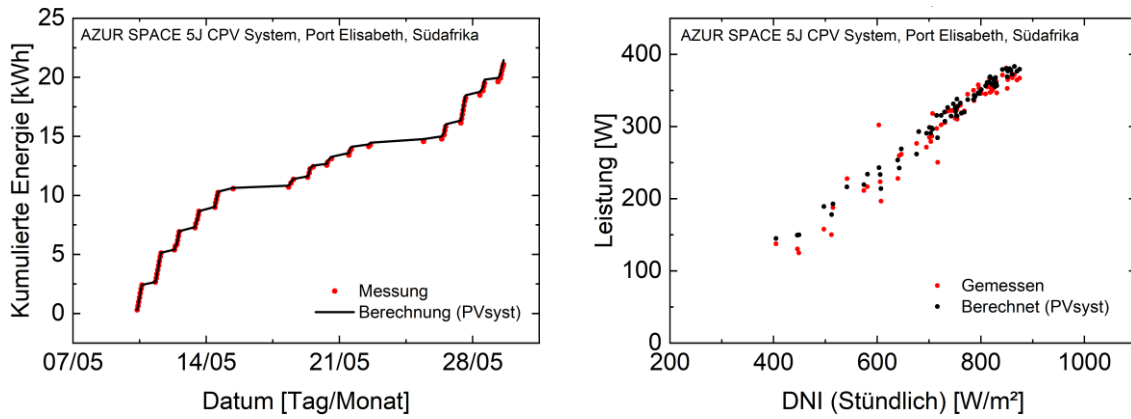


Abbildung 54: Links: kumulierte Energie des AZUR SPACE CPV Systems am Standort Port Elisabeth im Vergleich von Messung und PVsyst Rechnung. Im gesamten Zeitraum ergibt sich eine Überschätzung des Energieertrags durch PVsyst von 1.7 %. Dies stellt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung dar. Rechts: DC-Ausgangsleistung des CPV Systems als Stundenwerte im Vergleich von Messung und Rechnung mit PVsyst.

Bestimmung des Linsentemperaturkoeffizient

Im Rahmen der Erstellung des PAN-Files wurde der Linsentemperaturkoeffizient für AZUR SPACE CPV-Module ermittelt. Dieser Temperaturkoeffizient wird als Inputparameter für PVsyst PAN-Files benötigt. Dadurch kann der Einfluss der Linsentemperatur auf die Modulausgangsleistung berücksichtigt werden. Besonders bei den verwendeten Silikon-auf-Glas Linsen ist dies eine wichtige Einflussgröße. In PVsyst wird diese indirekt durch die Umgebungstemperatur berücksichtigt. Der Temperaturkoeffizient wurde aus Messdaten des Moduls SN4921031701 ermittelt. Abbildung 55 zeigt die normierte Kurzschlussstromdichte des Moduls SN4921031701 als Funktion der Umgebungstemperatur. Der Einfluss der Linsentemperatur wird bei Außenmessungen durch die Abhängigkeit der Stromgeneration von der spektralen Zusammensetzung des Sonnenlichts überlagert. Daher ist in Abbildung 55 als Farbkodierung eine Klasseneinteilung von SMR12 Werten gezeigt. Für jede Klasseneinteilung wurde für Umgebungstemperaturen kleiner 30 °C ein Linsentemperaturkoeffizient ermittelt. Dieser Koeffizient variiert dabei im Bereich von 0.60 und 0.65 %rel./K.

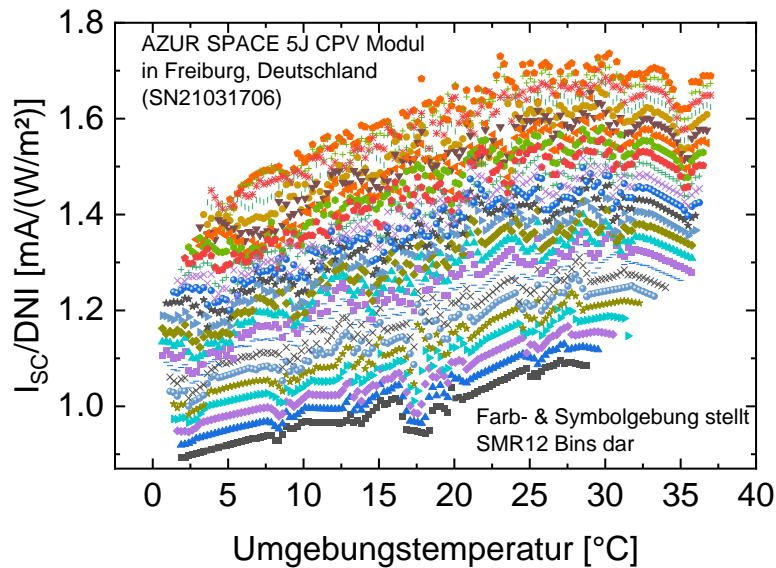


Abbildung 55: Kurzschlussstrom des AZUR SPACE 5J CPV-Moduls SN4921031701 als Funktion der Umgebungstemperatur gemessen in Freiburg am Fraunhofer ISE. Die Farbgebung repräsentiert eine bestimmte Klasseneinteilung (Breite 0.015) von SMR12 Werten. Dadurch kann der Einfluss aus Linsentemperatur und Spektrum separiert werden. Für jede SMR12 Klasse wurde ein Linsentemperaturkoeffizient ermittelt. Diese Temperaturkoeffizienten variieren dabei zwischen 0.60 und 0.65 %_{rel}/K für Umgebungstemperaturen kleiner 30°C.

Unabhängig der im PAN-File enthaltenen Parameter benötigt die Energieertragssoftware PVSyst zur Berücksichtigung des thermischen Verhaltens der CPV-Module den sogenannten „Thermal Loss Factor U“ als Inputparameter. Dieser kann je nach Standort und Installation für die gleiche Modultechnologie unterschiedlich ausfallen. Daher sollte dieser Parameter U anhand von Kraftwerksdaten ermittelt werden. Innerhalb von AP4.3 wurde U anhand von Modulmessdaten ermittelt und ist nicht direkt auf Energieertragsberechnungen von Kraftwerken übertragbar.

Der Parameter U wird errechnet als Verhältnis der Temperaturdifferenz (Zelle gegen Umgebungstemperatur) zur Wärmemenge. Der Parameter U kann dabei in eine Komponente U_c (c=convection) und U_v (v=velocity of wind) aufgeteilt werden. Die Komponenten lassen sich als linearen Fit an Messdaten bestimmen. Abbildung 56 zeigt U als Funktion der Windgeschwindigkeit bestimmt anhand von Modulmessdaten am Standort Freiburg, Deutschland. Der linke Graph zeigt Daten für ein AZUR SPACE 5J CPV-Modul und der rechte Graph Daten eines AZUR SPACE 3J CPV-Moduls. Dabei ist in der Abbildung 56 nur ein geringer Unterschied zwischen den U-Werten des 3J gegenüber des 5J CPV-Modules ersichtlich.

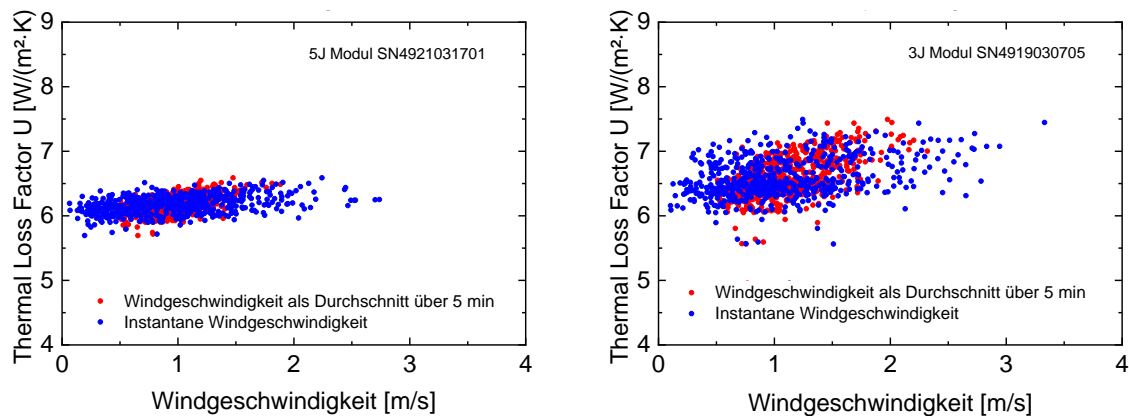


Abbildung 56: „Thermal loss factor“ U als Funktion der Windgeschwindigkeit. U wurde anhand von Außenmessdaten am Standort Freiburg, Deutschland berechnet. Links für ein AZUR SPACE 5J CPV-Modul und rechts für ein AZUR SPACE 3J basiertes CPV-Modul. Als Windgeschwindigkeit sind einmal die instantane Windgeschwindigkeit und einmal die Windgeschwindigkeit als Durchschnitt über 5 Minuten gezeigt. Dabei ist zunächst kein signifikanter Unterschied zwischen 3J und 5J CPV-Modul ersichtlich.

Bzgl. der Bestimmung und Verwendung der Utilization Faktoren UF wurden in AP4 zwei Sensitivitätsanalysen durchgeführt. In der ersten Analyse wurden drei Module in Freiburg unter Außenbedingungen elektrisch charakterisiert. Anhand dieser Messdaten wurden UF Parametersätze für zwei der Module bestimmt und beide Sätze für Energieertragsberechnungen aller drei Module verwendet. In der zweiten Analyse wurden Strom-Spannungs-Charakteristiken von AZUR SPACE 5J Modulen mit Hilfe des Modells YieldOpt im Jahresverlauf an vier verschiedenen Standorten berechnet. Anhand dieser Strom-Spannungs-Charakteristiken wurde dann für jeden Standort ein UF Parametersatz ermittelt, um zu bewerten inwieweit die Bestimmung der UFs vom jeweiligen Standort abhängt. Die zweite Sensitivitätsanalyse wurde in AP4.2 berichtet. Die Ergebnisse der beiden Sensitivitätsanalysen wurden auch auf der internationalen CPV-Konferenz CPV-18 veröffentlicht [15].

Evaluierung der Thermal Transient Measurement

Ein Eingangsparameter für ein PVsyst PAN-Files ist die nominale Ausgangsleistung. Die Messunsicherheit bei der Bestimmung dieser nominalen Leistung hat direkten Einfluss auf die Unsicherheit im Berechnen des Energieertrags. Ein großer Teil der Messunsicherheit entsteht bei der Umrechnung von der Solarzellen-Arbeitstemperatur auf die nominale Zelltemperatur von 25 °C. Dabei ist die Messunsicherheit der Zelltemperaturkoeffizienten von Bedeutung. Diese wird durch die Modultemperaturkoeffizienten umgerechnet, die in einer sogenannten „Thermal Transient Messung“ (TTM) ermittelt werden. Dabei werden die Solarzellen im CPV-Modul durch Abschattung des direkten Sonnenlichts abgekühlt. Nach Entfernung der Abschattung werden während der Aufheizphase Strom-Spannungs-Kennlinien sowie Rückseitentemperatur des Moduls gemessen. Bei der Bestimmung der nominellen Modulausgangsleistung nach IEC-Standard 62670-3 wurden relevante Unterschiede in den Modultemperaturkoeffizienten der Module SN21032216 und SN21031703 aufgezeigt. Daraufhin wurde die Messung des Modultemperaturkoeffizienten TK des Moduls SN21032216 an einem zweiten Tag wiederholt. In Abbildung 57 sind die ermittelten Modultemperaturkoeffizienten in Abhängigkeit der spektralen Zusammensetzung des Sonnenspektrums dargestellt. Letzteres wird durch die sogenannte „Spectral Matching Ratios (SMR)“ repräsentiert. Dabei zeigt sich eine Änderung des Betrags des Temperaturkoeffizienten mit der Änderung des SMR-Werts. Erklärbar ist dies durch einen Wechsel der stromlimitierenden Teilzelle aufgrund der Änderung des Sonnenspektrums. Die stromlimitierende Teilzelle hat einen starken Einfluss auf den TK der Mehrfachsolarzelle. Die Norm IEC 62670-3 erlaubt TTM im Bereich von SMR-Werten zwischen 0.95 und 1.05. Aber auch in diesem zulässigen Bereich ist eine deutliche Änderung zu erkennen. Das bedeutet, dass zukünftig bei der

Bestimmung der Temperaturkoeffizienten, auch die spektralen Bedingungen der Umgebung berücksichtigt werden müssen.

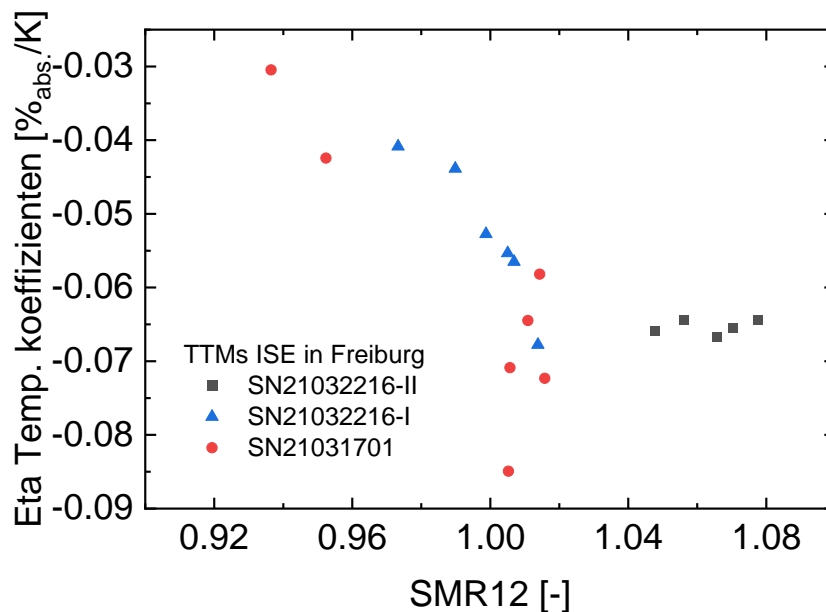


Abbildung 57: Temperaturkoeffizienten (TK) des Modulwirkungsgrads in Abhängigkeit des Spectral Matching Ratios SMR12 als Maß für die spektrale Zusammensetzung des jeweiligen Sonnenspektrums. Gezeigt sind TK's für zwei AZUR SPACE 5J CPV-Module. Beim Modul SN21032216 wurden TK's an zwei verschiedenen Tagen ermittelt. Die Zusammensetzung des Sonnenspektrums hat Einfluss auf die Stromgeneration der einzelnen Teilzellen und kann z.B. zu einem Wechsel der stromlimitierenden Teilzelle führen. Dabei wird der TK ebenfalls beeinflusst.

7 Notwendigkeit der Arbeit

Das vorliegende Projekt konnte nur durch im Verbund erfolgreich bearbeitet werden.

Das Fraunhofer ISE als Forschungseinrichtung ist auf externe Finanzierung angewiesen. Im Projekt wurden diese Mittel einerseits durch den Bund und andererseits durch den Industriepartner AZUR bereitgestellt. Die Förderung und die Kooperation im Verbund waren wichtig, da durch das Fraunhofer ISE die grundlegenden wissenschaftlichen Arbeiten durchgeführt werden konnten, die nicht alleine von dem Industriepartner finanziert werden konnten. Außerdem brachte das Fraunhofer ISE langjährige Erfahrung in der CPV-Modulentwicklung ein. Auf Basis der Erfahrung und des Wissens, konnten trotz komplexer Zusammenhänge das Moduldesign im Hinblick auf elektrischer Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit optimiert werden.

8 Zahlenmäßiger Nachweis und Notwendigkeit der Arbeit

Der zahlenmäßige Nachweis erfolgt separat über die zentrale Verwaltung der Fraunhofer-Gesellschaft und wird nicht näher detailliert.

Im Projektbudget waren in erster Linie Personalkosten vorgesehen, die für die wissenschaftliche Untersuchungen und Simulationen notwendig waren. Die Arbeiten wurden unterstützt durch Laborarbeiten wie die Charakterisierung der Komponenten.

Darüber hinaus konnten im Rahmen des Projekts durch Investitionsmaßnahmen die Teststände erweitert werden, so dass die Module auch mit der höheren Spannung der Fünffachsolarzellen und die Solarzellen bei erhöhter Solarzellentemperatur vermessen werden können.

9 Voraussichtlichen Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des Verwertungsplans

Das Fraunhofer ISE unterstütze im Verbundprojekt den Industriepartner AZUR SPACE Solar Power GmbH durch die wissenschaftliche Erfahrung und die Kompetenzen insbesondere in der Simulation (z.B. der Optik oder des Energieertrags), der experimentellen Untersuchung und der elektrischen und Material-Charakterisierung.

Zusätzlich organisierte das Fraunhofer ISE während der Projektlaufzeit zweimal das „CPV Forum“. Dort trafen sich Industrie-partner und potentielle neue Partner, um sich über den Stand und die Zukunft der CPV auszutauschen, sich über aktuelle Entwicklungen zu informieren und neue Kontakte zu knüpfen. Auch auf diesem Weg wird die Industrie in Deutschland gestärkt. Grundlage der Diskussion sind Vorträge, die auch auf Ergebnissen des QuintuMod-Projekts basierten.

Als Forschungsinstitut verfolgt das Fraunhofer ISE keine direkten wirtschaftlichen Ziele, die sich als monetärer Profit äußern. Dafür werden am Fraunhofer ISE zukünftige Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen ausgebildet. Im Rahmen dieses Projekt wurden studentische Arbeiten erstellt. Außerdem repräsentiert das Fraunhofer ISE durch wissenschaftliche Veröffentlichungen und Präsentationen den exzellenten Forschungsstandort Deutschland. Damit stehen die Ergebnisse nicht nur dem Projektpartner und der Vermarktung der Technologie, sondern auch der nationalen und internationalen Forschungswelt zu Verfügung.

Aus technischer und wissenschaftlicher Sicht konnten im Projekt zusammen mit dem Industriepartner AZUR wichtige Erkenntnisse und durch das Verständnis einzigartiges Know-how gewonnen werden. Im Forschungsprojekt QuintuMod wurden erstmalig der Energieertrag mit der weltweit anerkannten und für die Finanzierung von (C)PV-Projekten genutzte Software PVsyst durchgeführt werden und es konnte gezeigt werden, dass eine sehr gute Übereinstimmung zur Vorhersage mit dem „YieldOpt“ besteht. Außerdem wurden die Fünffachsolarzellen detailliert charakterisiert und ein umfängliches Verständnis zum Verhalten (auch der Teilzellen) bei unterschiedlichen Temperaturen gewonnen.

10 Relevante Ergebnisse von dritter Seite

Während der Projektlaufzeit konnte im Rahmen des vom BMWK geförderten Projekts 50PROZENT (FKz. 03EE1046A) der absolute Wirkungsgradrekord für Solarzellen auf 47.6 % [16, 17] erhöht werden und damit die hohen Effizienzen der CPV-Technologie und der hervorragende Forschungsstandort erneut demonstriert werden.

Ein aktuelles Forschungsthema in der CPV ist die Entwicklung eines CPV-Modul-Konzepts, in denen die Solarzellengrößen auf weniger als 1 mm verkleinert werden (Mikro-CPV). Durch die Miniaturisierung können neue, kostengünstige Fertigungstechnologien aus der LED und Displayindustrie [18, 6]

eingesetzt werden und durch diese Hochdurchsatzprozesse perspektivisch die Herstellungskosten reduziert werden. Beide Projektpartner (das Fraunhofer ISE und AZUR SPACE) sind ebenfalls Partner in dem Projekt micro-CPV (FKz. 03EE1046A), das vom BMWK gefördert wird. Dort wird ein solches micro-CPV-Modul entwickelt. Die Ergebnisse insbesondere zur Charakterisierung und Energieertragsmodellierung aus dem Projekt QuintuMod können genutzt werden und auf das micro-CPV-Modul übertragen werden.

Ein weiteres erfolgreiches CPV-Konzept ist von der australischen Firma RayGen, bei dem durch die aktive Kühlung der Solarzellen zusätzlich thermische Energie generiert wird. Diese wird gespeichert und kann bedarfsorientiert über einen „Organic Rankine Cycle“ Prozess zu Strom gewandelt werden [19]. RayGen nahm 2023 eine 4 MW Kraftwerk erfolgreich in Betrieb und zeigt damit das Interesse an der Konzentrator-Technologie.

11 Erfolgte Veröffentlichung der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Projekts wurden während seiner Laufzeit veröffentlicht. Sie werden in drei Kategorien eingeteilt.

11.1 Veröffentlichungen auf Konferenzen

- Gerald Siefer, Philipp Schroth, Ruediger F. Loeckenhoff, Marc Steiner, Maïke Wiesenfarth „PVsyst Energy Yield calculation of 5J Solar Cell Based CPV Modules“ presented at 19th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-19) (2024).
- Marc Steiner, Philipp Schroth, Ruediger F. Loeckenhoff, Gerald Siefer, Maïke Wiesenfarth. „Energy Yield Modeling of 5J Solar Cell Based CPV Modules“, in 18th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-18) and 13th World Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity (TPV-13), AIP Conference proceedings, 2841, 030004 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0146347>
- Ruediger F. Loeckenhoff, Peter Schoettl. „ Electronic Network Simulation of 5-Junction Solar Cells and Impacts on the Ideal Current Matching“ in 18th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-18) and 13th World Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity (TPV-13), AIP Conference proceedings, 2841, 020002 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0146331>
- R.F. Loeckenhoff, P. Schroth, M. Steiner: “Comprehensive Analysis of the Interactions between a Concentrating Photovoltaics (CPV) Module and 5-Junction Solar Cells” presented at 40th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EU-PVSEC (2023).

11.2 Bachelor-, Masterarbeiten

Für die wissenschaftliche Verwertung ist der Beitrag zur Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses wichtig. Im Rahmen des Projekts sind folgende Arbeiten entstanden oder enthalten Teile der Projektergebnisse.

- Masterarbeit:
Theodore Oko Sowah, „**Analysis of Temperature Dependence of Multijunction Concentrated Solar Cells**“, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Studiengang Solar Energy Engineering, Mai 2023. (Die Arbeit unterliegt einem Sperrvermerk)
- Bachelorarbeit:
Lars Eschbach „**Entwicklung eines Versuchsaufbaus zur Untersuchung des Einflusses der Zelltemperatur auf die Ausgangsleistung von Mehrfachsolarzellen im Konzentrator-Photovoltaik-Modul**“ Fachbereich für Elektrotechnik und Informationstechnik der FH Aachen, 2021.

11.3 Projektdarstellung im Internet

Der Projektinhalt und aktuelle Ergebnisse wurden auf der Internetseite des Fraunhofer ISE präsentiert. Der Inhalt wurde während der Projektlaufzeit jährlich aktualisiert.

<https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/quintumod.html> (Letzter Abruf: 11.4.2024)

III Literatur

- [1] W. Guter, R. Kern, W. Köstler, T. Kubera, R. Löckenhoff, M. Meusel, M. Shirnow, and G. Strobl, "III-V multijunction solar cells - new lattice-matched products and development of upright metamorphic 3J cells," in *7th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems (CPV-7)*, Las Vegas, Nevada, (USA), 2011, pp. 5–8. DOI: 10.1063/1.3658282.
- [2] M. A. Green, E. D. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, and A. W. Ho-Baillie, "Solar cell efficiency tables (Version 55)," *Prog Photovolt Res Appl.*, vol. 28, no. 1, pp. 3–15, 2020. DOI: 10.1002/pip.3228.
- [3] J. F. Geisz, R. M. France, K. L. Schulte, M. A. Steiner, A. G. Norman, H. L. Guthrey, M. R. Young, T. Song, and T. Moriarty, "Six-junction III–V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration," *Nat. Energy.*, vol. 5, no. 4, pp. 326–335, 2020. DOI: 10.1038/s41560-020-0598-5.
- [4] M. Steiner, M. Wiesenfarth, J. F. Martínez, G. Siefer, and F. Dimroth, "Pushing energy yield with concentrating photovoltaics," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2149, p. 60006, 2019. DOI: 10.1063/1.5124199.
- [5] R. Löckenhoff, A. Endress, and W. Bensch, "C3PV: Mass Produced EFA Receivers for a Franchised Module Technology," 2021. [Online] Available: https://www.azurspace.com/images/pdfs/C3PV_Whitepaper_2021-03-24.pdf. Accessed on: Jul. 09 2024.
- [6] M. Wiesenfarth, I. Anton, and A. W. Bett, "Challenges in the design of concentrator photovoltaic (CPV) modules to achieve highest efficiencies," *Appl. Phys. Rev.*, vol. 5, no. 4, 041601-1 bis 041601-27, 2018. DOI: 10.1063/1.5046752.
- [7] P. Schroth, R. Löckenhoff, D. Fuhrmann, M. Meusel, A. Frey, M. Steiner, and G. Siefer, "AZUR's new 5C46 CPV cell: Final design for optimized outdoor performance," in *17th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-17)*, Freiburg, Germany, 2021, p. 20008. DOI: 10.1063/5.0100397.
- [8] P. Schöttl, G. Bern, P. Nitz, F. Torres, and L. Graf, "Raytrace3D by Fraunhofer ISE: Accurate and efficient ray tracing for concentrator optics," Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2022. [Online] Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/raytrace3d.pdf>.
- [9] R. Branke and A. Heimsath, "Raytrace3D-power tower - a novel optical model for central receiver systems," in *16th SolarPACES Conference*, Perpignan, France, 2010.
- [10] C. Rapp, M. Steiner, G. Siefer, and A. W. Bett, "Stepwise measurement procedure for the characterization of large-area photovoltaic modules," *Prog Photovolt Res Appl.*, vol. 23, no. 12, pp. 1867–1876, 2015. DOI: 10.1002/pip.2635.
- [11] T. D. Hornung, A. Bachmaier, P. Nitz, and A. Gombert, "Temperature Dependent Measurement And Simulation Of Fresnel Lenses For Concentrating Photovoltaics," in *6th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems (CPV-6)*, Freiburg, Germany, 2010, pp. 85–88. DOI: 10.1063/1.3509239.
- [12] J. F. Martínez Sánchez, M. Steiner, M. Wiesenfarth, H. Helmers, G. Siefer, S. W. Glunz, and F. Dimroth, "Worldwide Energy Harvesting Potential of Hybrid CPV/PV Technology," *SSRN Journal*, vol. to be published, 2021. DOI: 10.2139/ssrn.3815001.
- [13] R. Bird and C. Riordan, "Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres," NREL Technical Report TR-215-2436, 1984.

- [14] M. Schachtner, M. L. Prado, S. K. Reichmuth, G. Siefer, and A. W. Bett, "Analysis of a four lamp flash system for calibrating multi-junction solar cells under concentrated light," in *11th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-11)*, Aix-les-Bains, France, 2015, p. 50012. DOI: 10.1063/1.4931533.
- [15] M. Steiner, P. Schroth, R. F. Loeckenhoff, G. Siefer, and M. Wiesenfarth, "Energy yield modeling of 5J solar cell based CPV modules," in *18th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-18) and 13th World Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity (TPV-13)*, Miyazaki, Japan, 2022, p. 30004. DOI: 10.1063/5.0146347.
- [16] Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, *Press release: Fraunhofer ISE Develops the World's Most Efficient Solar Cell with 47.6 Percent Efficiency*. [Online] Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2022/fraunhofer-ise-develops-the-worlds-most-efficient-solar-cell-with-47-comma-6-percent-efficiency.html>. Accessed on: Aug. 06 2022.
- [17] P. Schygulla, P. Beutel, S. Heckelmann, O. Höhn, M. Klitzke, J. Schön, E. Oliva, F. Predan, M. Schachtner, G. Siefer, H. Helmers, F. Dimroth, and D. Lackner, "Quadruple-Junction Solar Cell with 47.6 % Conversion Efficiency under Concentration," in *20th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE XX)*.
- [18] C. Domínguez, N. Jost, S. Askins, M. Victoria, and I. Antón, "A review of the promises and challenges of micro-concentrator photovoltaics," in *13th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-13)*, Ottawa, Canada, 2017, p. 80003. DOI: 10.1063/1.5001441.
- [19] J. Lasich, K. Grayson, R. Payne, S. Baker, W. Mosley, and A. Kitchener, "Central receiver photovoltaics – A source of firm solar power," in *17th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-17)*, Freiburg, Germany, 2021, p. 60001. DOI: 10.1063/5.0101899.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel QuintuMod - Entwicklung eines kostengünstigen und gleichzeitig hocheffizienten Solarmoduls unter Verwendung einer 5fach-Stapelsolarzelle; Teilvorhaben: Modulperformance	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Wiesenfarth, Maike; Steiner, Marc; Siefer, Gerald; Peter Schöttl; Nitz, Peter; Mülhöfer, Georg	5. Abschlussdatum des Vorhabens Januar 2024
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, ISE Heidenhofstr. 2 79110 Freiburg Germany	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03EE1088B
	11. Seitenzahl 65
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 19
	14. Tabellen 5
	15. Abbildungen 57
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Im Vorhaben „QuintuMod“ wurden zuverlässige, kosteneffektive und hocheffiziente CPV-Module entwickelt und optimiert. In der konzentrierenden Photovoltaik (CPV) werden die höchsten Wirkungsgrade erzielt. Darüber hinaus hat sie zusätzliche Vorteile bzgl. Transport, Recycling und Nachhaltigkeit. Durch das Projekt wird die Technologie konkurrenzfähig zu allen anderen aktuellen PV-Technologien. Im Projekt wurde eine neue Fünffachsolarzelle mit auf die Betriebsbedingungen optimierter Effizienz in das AZUR CPV Modulkonzept integriert. Durch detaillierte optische Simulation und unterstützt von elektrischen Messungen von Solarzellen bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen am Fraunhofer ISE wurde das Moduldesign beim Projektpartner AZUR SPACE angepasst. Im Projekt konnte ein Wirkungsgrad bezogen auf die aktive Linsenfläche von 36.6 % unter Konzentration Standard-Testbedingungen erreicht werden und damit eine beeindruckende Leistungssteigerung von 14.1 % (relativ) im Vergleich zu herkömmlichen AZUR SPACE CPV-Modulen mit Dreifachsolarzellen gezeigt werden. Für eine Projektentwicklung und wirtschaftliche Bewertung ist die Vorhersage des Energieertrags der CPV-Module entscheidend. Im Projekt wurden Methoden zur Berechnung des Energieertrags wissenschaftlich untersucht und damit die Vorhersagegenauigkeit des Energieertrags für das CPV-Modul verbessert. Sowohl die kommerzielle Software PVsyst wurde verwendet als auch ein inhouse entwickeltes Tool „YieldOpt“. Die Vorhersagegenauigkeit der Tools wurde anhand von Messungen am Standort Freiburg und Untersuchungen von weltweiten Standorten bewertet sowie durch Vergleich mit Messungen an einem CPV-Standort in Südafrika verifiziert.	
19. Schlagwörter Konzentratorphotovoltaik, Fünffachsolarzelle, Konzentrator-Optik, Konzentrator-Modul, elektrische Charakterisierung, Energieertrag, PVsyst, YieldOpt, solares Referenzspektrum, hohe Effizienz, Langzeitstabilität	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title QuintuMod - Entwicklung eines kostengünstigen und gleichzeitig hocheffizienten Solarmoduls unter Verwendung einer 5fach-Stapelsolarzelle; Teilvorhaben: Modulperformance	
4. author(s) (family name, first name(s)) Wiesenfarth, Maïke; Steiner, Marc; Siefer, Gerald; Peter Schöttl; Dimroth, Frank; Nitz, Peter; Mühlhöfer, Georg;	5. end of project January 2024
	6. publication date planned
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, ISE Heidenhofstr. 2 79110 Freiburg Germany	9. originator's report no.
	10. reference no. 03EE1088B
	11. no. of pages 65
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references 19
	14. no. of tables 5
	15. no. of figures 57
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract <p>In the "QuintuMod" project, reliable, cost-effective and highly efficient CPV modules were developed and optimized. Concentrating photovoltaics (CPV) achieves the highest efficiencies. Additionally, it has advantages regarding transportation, recycling and sustainability. The project makes the technology competitive to all other current PV technologies.</p> <p>In the project, a new five-junction solar cell with efficiency optimized for the operating conditions was integrated into the AZUR CPV module. Through detailed optical simulation and supported by electrical measurements of solar cells at different operating temperatures at Fraunhofer ISE, the module design was adapted by the project partner AZUR SPACE. In the project, an efficiency of 36.6 % in relation to the active lens area was achieved under standard concentrator test conditions, demonstrating an impressive increase in performance of 14.1 % (relative) compared to conventional AZUR SPACE CPV modules with triple solar cells.</p> <p>Predicting the energy yield of CPV modules is crucial for project development and economical evaluation. In the project, methods for calculating the energy yield were scientifically investigated and thus the accuracy of the energy yield prediction for the CPV module was improved. Both the commercial software PVsyst and an in-house developed tool "YieldOpt" were used. The prediction accuracy of the tools was evaluated based on measurements in Freiburg and investigations of sites worldwide as well as verified by comparison with measurements at a CPV site in South Africa.</p>	
19. keywords concentrator photovoltaics, five-junction solar cell, concentrator optics, concentrator photovoltaic module, electrical characterization, energy yield, PVsyst, YieldOpt, reference solar spectrum, high efficiency, reliability	
20. publisher	21. price