



## **Orafol Fresnel Optics GmbH**

Flurstedter Marktweg 13

99510 Apolda

Tel.: +49 3644 50110

[www.fresnel-optics.de](http://www.fresnel-optics.de)

[info@fresnel-optics.de](mailto:info@fresnel-optics.de)

### **CPV-Magnus**

CPV-Systeme mit hocheffizienten und installationsfreundlichen Modulen

Förderkennzeichen: 0325485B

## **Abschlussbericht**

### **AP7 – Konzepte zur Werkzeugerstellung und Charakterisierung von großflächigen Linsenparquets**

Autoren: Christian Blechschmidt, Stefan Gäbler, Rico Traxdorf, Jürgen Zosel, Martin Bitzer

Juni 2016

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

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

# Inhalt

---

1	Projektbeschreibung .....	3
1.1	Aufgabenstellung des Verbundvorhabens .....	3
1.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn .....	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	6
1.4	Herausragende Technische Fortschritte des Teilprojekts .....	7
1.5	Nachruf Martin Bitzer .....	8
2	AP6 Optisches Design .....	9
2.1	AP6.1 Design einer zweistufigen Optik mit vergrößerter Apertur .....	9
3	AP7 Konzepte zur Werkzeug- und Linsenplattenherstellung und Charakterisierung von großflächigen Linsenparquets .....	10
3.1	AP7.1 Entwicklung von Werkzeugen zur Replikation .....	10
3.1.1	Optimierung der Herstellung von Einzellinsenwerkzeugen .....	10
3.1.2	Methoden zur Herstellung von Linsenarraywerkzeugen .....	13
3.2	AP7.2 Entwicklung von Verfahren zur qualitativen Bewertung der Werkzeuge.....	23
3.3	AP7.3 Optimierung der Linsenplatten-Komponenten mit Blick auf Effizienzsteigerung und Kostenoptimierung.....	25
3.4	AP7.4 Prozessanpassung sowie -optimierung der Herstellung großflächiger Linsenparquets...	29
3.5	AP7.5 Charakterisierung und Qualitätssicherung .....	31
4	Zusammenfassung.....	34
5	Literaturverzeichnis .....	35

## 1 Projektbeschreibung

In diesem Abschlussbericht werden die durchgeführten Arbeiten und der zum Projektende vorliegende technische Stand dokumentiert. Die Bearbeitung erfolgte im Zeitraum vom 01.07.2015 bis zum 31.12.2015. Als Teil des Verbundprojekts werden die im Teilvorhaben von Orafol Fresnel Optics bearbeiteten Arbeitspakete beschrieben.

### 1.1 Aufgabenstellung des Verbundvorhabens

Die Konzentratoren-Photovoltaik (CPV) macht sich Halbleitermaterialersparnis durch den Einsatz eines optischen Konzentratoren und höchste Systemwirkungsgrade durch den Einsatz sog. Multijunction-Solarzellen zunutze, um kostengünstige Stromerzeugung im Sonnengürtel der Erde zu ermöglichen. Das Kostenreduktionspotential dieser Technologie ist groß, aber bei weitem noch nicht ausgeschöpft, da sich die Technologie erst im Markteintritt befindet.

Ziel des Verbundes ist die Entwicklung eines deutlich kostenreduzierten CPV Systems mit einer zweistufigen Optik, bei dem die vertikale Wertschöpfungskette durch die deutsche Industrie abgedeckt werden kann. Die Industriepartner Orafol Fresnel Optics, Soitec Solar und Kirchner Solar Group decken die vertikale Kette Konzentratoren-, Modul- und Trackerherstellung vollständig ab. Unterstützt werden sie hierbei durch die Forschungspartner Fraunhofer ISE und Fachhochschule Kiel. Das Projekt umfasst vier Themenschwerpunkte:

- 1.) **Entwicklung eines neuen CPV Systems mit einer zweistufigen Optik nach dem Köhlerprinzip.** Aus einem integralen Ansatz heraus wird ein CPV System kostenoptimiert entwickelt, wobei von Anfang an die Wechselwirkung zwischen Optik-, Modul- und Trackerdesign betrachtet und eine globale Optimierung der Kosten vorgenommen wird.
- 2.) **Steigerung der Effizienz und des Ertrages.** Neben der Effizienz eines Systems hat der spezifische Jahresertrag eine ebenso große Rolle für die Wirtschaftlichkeit. Durch die Einführung der zweistufigen Optik sollen sowohl Ertrag, als auch Effizienz des Systems erhöht werden. Zur Effizienzsteigerung werden maßgebliche Arbeiten zur Fresnellinsenherstellung durchgeführt (Verkürzung der Werkzeugherstellung durch neue Charakterisierungsmethoden für die Zwischenwerkzeuge, Kostenoptimierung des Abformprozesses, kleinere Streuung der Linsenqualität).
- 3.) **Entwicklung neuer Aufbautechniken für die Solarzellenmontage.** Die Sintertechnik bietet ein großes Potential zur Verbesserung der thermischen Anbindung der Solarzelle, sowie deren Belastbarkeit hinsichtlich Temperaturzyklen. Die Anwendbarkeit der Sintertechnik auf die Montage von III-V Mehrfachsolarzellen wird in grundlegenden Untersuchungen an der FH Kiel geprüft.
- 4.) **Entwicklung geeigneter Qualitätssicherungsprozesse.** Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist ein Modulkonzept, das auf einem Verbundrahmen aufbaut, unerlässlich. Da die bisher verwendeten Methoden hierfür nicht mehr nutzbar sind, müssen Qualitätssicherungsmethoden (insbesondere die Leistungsbestimmung) entwickelt werden, die z.B. auf der Kombination verschiedener Messmethoden beruhen.

Die erzielten Ergebnisse können bei Erfolg sofort von den Partnern Orafol Fresnel Optics, Kirchner Solar Group GmbH und Soitec Solar am Markt verwertet werden und sichern die technologische Führerschaft und damit hochqualifizierte Arbeitsplätze in Deutschland.

## 1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Erste wissenschaftliche Experimente mit Photovoltaiksystemen, die die optische Konzentration der Solarstrahlung nutzen (CPV-Systeme), wurden bereits in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts durchgeführt. In den National Sandia Laboratories, USA, wurden erste Prototypen von Konzentrator-Photovoltaikmodulen, basierend auf Fresnellinsen und kleinen Siliziumsolarzellen, aufgebaut und getestet. In den folgenden Jahren gab es einige wenige CPV Firmen und mehrere Installationen, vorwiegend mit Demonstrationscharakter. Nachdem erste Versuche mit mechanischen Solarzellenstapeln durchgeführt wurden, ersetzten ab den 90er Jahren Multijunction-Solarzellen (MJC) zunehmend Siliziumsolarzellen und verhalfen der Konzentrator-Technologie zu einem Durchbruch. Insbesondere ab 2005 wurden mit erheblichen Investitionen weltweit die Technologieentwicklung vorangetrieben und mehrere CPV Firmen gegründet. Nachdem anfänglich eine Vielfalt an Designs für optische Konzentratoren existierte, sind heute Designs basierend auf Fresnellinsen vorherrschend. Die grundlegenden technischen Probleme der CPV Modultechnik können als gelöst angesehen werden. Seit 2008 beträgt die weltweit installierte CPV-Kraftwerksleistung mehrere Megawatt. Mit dem Bauartzulassungsstandard IEC 62108 sowie der weiteren CPV-Standards, die kurz vor der Verabschiedung stehen, sind weitere wichtige Eckpunkte für die wirtschaftliche Verwertung der CPV-Technologie gegeben. Aufgrund der Entwicklungen in der gesamten Photovoltaiktechnologie ist die Kostensenkung das primäre Thema der Entwicklungsarbeiten zu CPV-Systemen.

Die Grundlagen der von Soitec Solar gefertigten Concentrix™-Technologie wurden in mehreren öffentlich geförderten Forschungsprojekten am Fraunhofer ISE geschaffen. Die Soitec Solar GmbH wurde 2005 aus dem Fraunhofer ISE ausgegründet. Nach der Unternehmensgründung hat Soitec das Modulkonzept vor dem Hintergrund der industriellen Massenfertigung und der geforderten Langzeitstabilität überarbeitet. Wesentliche Überarbeitungen des Moduldesigns betrafen die Ausgestaltung des Modulrahmens und des Aufbaus der Solarzellen-Kühlsubstrat-Einheit sowie die Vergrößerung des Moduls auf eine Aperturfläche von 400x800mm<sup>2</sup> (Abbildung 1). Weiterhin geändert wurden seit der grundlegenden Entwicklung die Linsengröße sowie die Dimensionierung des Kühlsubstrats. Im Herbst 2008 wurde eine vollautomatisierte 25MW Fertigungslinie (überwiegend mit Anlagen deutscher Firmen aus dem Maschinenbau und der Automatisierungstechnik: AESCUSOFT, ASYS, Geringer, Rommel, KUKA, Gerold, Siemens) in Betrieb genommen (Abbildung 2). Derzeit werden durchschnittliche Modulwirkungsgrade von 27%, gemessen am CPV-Modulflasher des Fraunhofer ISE, erreicht. Module, die für Experimente mit selektierten Solarzellen hergestellt werden, erreichen Effizienzwerte im Bereich von 30%.

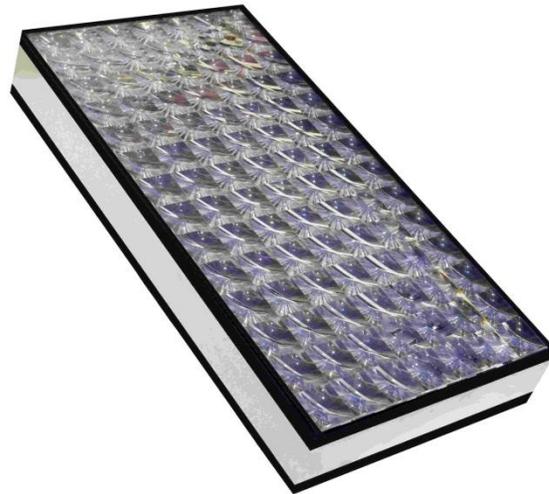


Abbildung 1 Bei Projektbeginn in Produktion befindliches CPV-Modul Soitec-M400



Abbildung 2 Linie 1 der Fertigung von Soitec zur Herstellung der Solarzellenbaugruppen („SCA“ – solar cell assembly)

Hinsichtlich der Kostensenkung ist eine zentrale wissenschaftliche Fragestellung die optimale Dimensionierung des Moduls und die Integration des Moduls in die Nachführeinheit (Tracker). Die derzeitigen Module von Soitec Solar sind mit einer Einzellinsengröße von  $3265\text{mm}^2$  und einer Aperturfläche von  $0,32\text{m}^2$  genauso wie die Tracker mit einer Aperturfläche von  $28,8\text{m}^2$  am unteren Ende der Größenskala im internationalen Vergleich. Die Fa. Amonix, USA, hat Module mit einer Größe von  $45,5\text{m}^2$  und einen Tracker mit  $350\text{m}^2$ . Ein Hersteller, der ähnlich große Module hatte, hat diese wieder deutlich verkleinert. Mit der Größe der Module steigen die Anforderungen an die Justiergenauigkeit. Auf dem Markt befindliche große Module haben Fresnellinsen-Aperturgrößen  $> 400\text{cm}^2$ , die hinsichtlich thermischen Stresses der Solarzelle, großer Bautiefe der Module und vor allem der eingesetzten Fertigungstechnologie nachteilig sind. Es gilt also, die Modularchitektur so zu optimieren, dass mit innovativen Herstellungs- und Bearbeitungsprozessen die Produktionskosten deutlich gesenkt werden

können<sup>1</sup>. Dabei ist zu berücksichtigen, dass CPV Systeme immer einen integralen Ansatz mit dem Tracker darstellen. Die Integration der Module in die Trackerstruktur, die Montage und die Verteilung der statischen Lasten sind daher bereits bei der Modularchitektur mit zu berücksichtigen.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Verbundpartner den Stand von Wissenschaft und Technik maßgeblich mit geprägt haben und eine hervorragende Infrastruktur zur Ausübung der Projektaufgaben zur Verfügung stellen. Sie können die international sehr gute Position im Bereich der Konzentrator-Photovoltaik durch Kostenreduktion weiter ausbauen. Dies ist aber auch notwendig, um sich dem deutlich verschärfenden Wettbewerb in der Photovoltaik und unter den verschiedenen Photovoltaiktechnologien stellen zu können.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Forschungsvorhaben CPV-Magnus wurde als Verbundprojekt zwischen den Industriepartnern Soitec Solar GmbH, Orafol Fresnel Optics GmbH (OFO) und Kirchner Solar Group GmbH sowie den forschungsorientierten Einrichtungen Fraunhofer ISE und Hochschule für Angewandte Wissenschaften Kiel initiiert. Unter der Leitung von Soitec wurden eingangs in 10 Arbeitspaketen (AP) die Arbeitsthemen strukturiert und deren zeitliche Abfolge geplant. Seitens OFO erfolgte die Mitarbeit im AP 6 und als Arbeitspaket-Verantwortlicher in AP 7. Die geplanten Unterarbeitspunkte mit Beteiligung von OFO wurden wie nachfolgend definiert:

#### Arbeitspaket 6: Optisches Design – Fraunhofer ISE Arbeitspaketleitung

AP	Titel	Stichworte zu den Inhalten
6.1	<b>Design einer zweistufigen Optik mit vergrößerter Apertur</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Abstimmung der zu erwartenden Produktionsrandbedingungen mit Fresnel Optics (mögliche Störflankwinkel, Strukturgrößen...)</li> <li>▪ Entwurf von drei Versionen der vergrößerten Primäroptik mit unterschiedlichen Anforderungen an die Fertigung (Meilenstein M6.2).</li> <li>▪ Auslegung des Designs der Sekundäroptik abgestimmt auf die vergrößerte Primäroptik basierend auf bisherigen Arbeiten zu Sekundäroptiken, jeweils für Glas- und Silikonsekundäroptiken.</li> </ul>

#### Arbeitspaket 7: Konzepte zur Werkzeugherstellung und Charakterisierung von großflächigen Linsenparquets – ORAFOL Fresnel Optics Arbeitspaketleitung

AP	Titel	Stichworte zu den Inhalten
7.1	<b>Entwicklung von Werkzeugen zur Replikation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mastering</li> <li>▪ Galvanische Replikation</li> <li>▪ Softtool-Verfahren</li> </ul>

<sup>1</sup> Um eine industrielle Umsetzbarkeit zu gewährleisten, werden frühzeitig Firmen aus dem deutschen Maschinenbau und der Automatisierungstechnik (ASYS und SIEMENS) eingebunden.

<b>7.2</b>	<b>Entwicklung von Verfahren zur qualitativen Bewertung der Werkzeuge</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Visuelle Bewertung</li> <li>▪ Dimensionale Vermessung</li> <li>▪ Profilvermessung</li> <li>▪ Verfahren zur Detektion von Kantendefekten</li> <li>▪ Verfahren zur Detektion von großskaligen Werkzeugverformungen</li> </ul>
<b>7.3</b>	<b>Optimierung Linsenplatten-Komponenten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schnelleraushärtende Silikon-Systeme</li> <li>▪ Selbsthaftende Silikon-Systeme</li> <li>▪ Verringerung der Glasdicke</li> <li>▪ Glas mit Antireflexschicht</li> </ul>
<b>7.4</b>	<b>Prozessanpassung sowie –optimierung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Anpassung der SOG-Prozessschritte an neues Linsendesign</li> <li>▪ Optimierung Vorrichtungsdesign hinsichtlich Silikonbedarf und Fertigungstoleranzen</li> </ul>
<b>7.5</b>	<b>Charakterisierung und Qualitätssicherung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vermessung und Bewertung der optischen Effizienz der neuen Primäroptik</li> <li>▪ Bewertung der Güte der Silikonabformung</li> <li>▪ Einführung und Verwendung von SPC-Systemen</li> </ul>

Die Abfolge wurde zeitlich festgelegt und deren Fertigstellung an wichtigen Schnittstellen in Meilensteinen fixiert. Von OFO erfolgte die Beteiligung dabei vorrangig bei den nachfolgend aufgeführten Meilensteinen.

	<b>Meilenstein</b>	<b>Projektmonat</b>
<b>M6.2</b>	Primary Design (3 Varianten)	6
<b>M7.1</b>	Auswahl des Primäroptikdesigns für Prototypenmodule	13
<b>M7.4</b>	Methoden zur Werkzeugcharakterisierung evaluiert	27

### 1.4 Herausragende Technische Fortschritte des Teilprojekts

- Etablierung von AR-beschichteten Glasplatten in der Produktion von SOG-Primäroptiken mit Steigerungen der Leistungsfähigkeiten des CPV Moduls um 2%
- Beitrag zur Steigerung der Moduleffizienz um 1% durch Verringerung des Störflankenwinkels mittels geeigneter Fertigungsverfahren
- Beitrag zur verbesserten Zell-Linsen-Ausrichtung durch Reduzierung der geometrischen Fertigungstoleranzen bzgl. eines vorgegebenen Positionsrasters bei der Werkzeug- und SOG-Herstellung auf  $\pm 0,3\text{mm/m}$
- Beschleunigung der Vorlaufzeiten und Reduzierung des Arbeits- und Materialaufwands bei der Werkzeugherstellung im Prototypen- und Serienfertigungsmaßstab
- Beteiligung an neuen Effizienzrekorden auf dem Gebiet hochkonzentrierter CPV-Systeme

## 1.5 Nachruf Martin Bitzer

Nach dem Abschluss der Projektarbeiten erhielten wir am 27.02.2016 unerwartet die Nachricht vom Ableben unseres Geschäftsführers Martin Bitzer. Er leitete die Geschicke der Firma Fresnel Optics seit deren Gründung und trieb den wirtschaftlichen und technischen Fortschritt mit viel Ehrgeiz und Willensstärke voran.

Gerade die CPV-Gemeinschaft verliert damit einen herausragenden Wegbereiter und -begleiter der SOG-Konzentratoroptiken. Sein Enthusiasmus und fachlicher Rat wird unersetzbar bleiben. In seinem Gedenken wird Fresnel Optics die Tätigkeiten und Entwicklungen auf dem Gebiet der CPV-Primäroptiken weiter begleiten.



## 2 AP6 Optisches Design

In diesem Arbeitspunkt wurde die Optimierung der Konzentratoroptik untersucht. Von OFO wurden dabei die herstellungsseitigen Verbesserungsmöglichkeiten und Begrenzungen betrachtet.

### 2.1 AP6.1 Design einer zweistufigen Optik mit vergrößerter Apertur

#### Produktionsbedingte Randbedingungen für das Linsendesign

Für den Entwurf der vergrößerten Apertur wurden auch herstellungsbedingte Aspekte der Werkzeug- und SOG-Herstellung beachtet, welche in der Vergangenheit bei OFO von Bedeutung waren.

Zum einen wurde die Apertur so vergrößert, dass eine Parkettierung mit dem bisherigen Linsenplattenabmaßen möglich war. Dadurch konnte sowohl der finanzielle Aufwand als auch die Entwicklungszeit reduziert werden, da teilweise auf bisherige Prozessabläufe und Produktionsvorrichtungen zurückgegriffen werden konnte. Die Einzellinsenbreite wurde mit 95mm so ausgewählt, dass die zusammengesetzte Fläche des Linsenarrays eine Abformung auf der bisherigen Standardglasgröße von Soitec zuließ. Der benötigte Strukturdurchmesser des Linsendesigns und die daraus hergestellten Werkzeugstempel wurden entsprechend der Größenanforderungen ausgelegt. Die Designbrennweite wurde so angepasst, dass die numerische Apertur der Konzentratoroptik unverändert gegenüber dem Standardmodul von Soitec blieb.

Zum anderen wurden für das Linsendesign verschiedene herstellungsbedingte Strukturvorgaben und -optimierungen einbezogen. So lässt sich für die Strukturtiefe aus den bisherigen Erfahrungen in der SOG-Herstellung ein heuristisches Optimum von 0,4mm finden. Hierbei wirkt sich vor allem der notwendige Materialeinsatz und die stückweise lineare Approximation der Asphärengleichung als obere Begrenzung der Strukturtiefe aus. Für die untere Begrenzung sorgt der mit kleineren Strukturen einhergehenden Anstieg der Störflankenanzahl. Für sehr kleine Rillenabstände treten zudem erhöhte Beugungsverluste auf (Thorsten Hornung, 2014).

#### Stufenweise Entwicklung des Einzellinsendesigns

Resultierend aus diesen Vorgaben wurden unter Berücksichtigung der Optimierungsansätze aus AP6.2 und AP6.3 die in Tabelle 1 aufgeführten Linsendesigns durch das ISE erstellt. Auf Grundlage des Basisdesigns SC2303 wurden verschiedene Linsendesigns abgeleitet, welche eine erhöhte Temperaturkompensation (SC2304), höhere Anzahl von Wirkflankensegmenten (SC2305) und ein Mischdesign aus konstantem Rillenabstand und konstanter Strukturtiefe (SC2306) beinhalten. Damit wurde der Meilenstein M6.2 erreicht. Durch einen nachträglich vom ISE festgestellten Softwarefehler in der Berechnung der Temperaturkompensation blieb die Leistungsbewertung des Basisdesigns und der daraus abgeleiteten Designansätze erfolglos. Es wurde deshalb umgehend eine zweite Designuntersuchung initiiert, welche wiederum ein Basisdesign SC2325, sowie ein abgeleitetes Mischdesign SC2326 enthielt. In enger Absprache zwischen Soitec, ISE und OFO wurden die Designansätze bewertet und entsprechend M7.1 das Linsendesign SC2326 zum Bau des Prototypen ausgewählt. Durch die Neuentwicklungen in der Werkzeugherstellung wurde im Anschluss von OFO zusätzlich das abgeleitete Linsendesign SC2345 mit reduziertem Störflankenwinkel bewertet, welches eine weitere Leistungssteigerung um 1% ermöglicht.

Einzellinsen- design	Designdatum	Design- grundlage	Temperatur- kompensation	Segmente	Störflanken- winkel	Revision
SC2303 (Basisdesign)	Dez 2012	konst. Höhe	30K	3	2° bis 5°	1
SC2304 (Temperatur)	Dez 2012	konst. Höhe	50K	3	2° bis 5°	1
SC2305 (Segmente)	Dez 2012	konst. Höhe	30K	5	2° bis 5°	1
SC2306 (Mischdesign)	Dez 2012	konst. Höhe + Rillenabstand	30K	3	2° bis 5°	1
SC2325 (Basisdesign)	Okt 2013	konst. Höhe	15K	3	2° bis 5°	2
SC2326 (Mischdesign)	Okt 2013	konst. Höhe + Rillenabstand	15K	3	2° bis 5°	2
SC2345 (Störflanken)	Feb 2014	konst. Höhe + Rillenabstand	15K	3	1°	2

Tabelle 1 Übersicht der Einzellinsendesigns

### 3 AP7 Konzepte zur Werkzeug- und Linsenplattenherstellung und Charakterisierung von großflächigen Linsenparquets

Als Industrieunternehmen mit Kenntnissen in der Herstellung von Linsenplatten hatte OFO die Leitung dieses Arbeitspakets übernommen. Alle aufgeführten Herstellungsverfahren wurden von OFO weiterentwickelt und durchgeführt.

#### 3.1 AP7.1 Entwicklung von Werkzeugen zur Replikation

Grundlage für die Herstellung der Linsenplatten bilden Produktionswerkzeuge, welche die abzuformende Fresnelstruktur enthalten. Das Urwerkzeug wird zunächst im Mastering-Prozess erzeugt. Durch mehrmalige galvanische Replikation des Master-Werkzeugs wird daraus ein Werkzeugbaum generiert, welcher die Verfügbarkeit reproduzierbarer Linsenwerkzeuge absichert. In diesem Prozess wurde an verschiedenen Stellen die Reduzierung von Störeinflüssen untersucht, um Wege zur weiteren Effizienzsteigerung der CPV-Primäroptik zu finden.

##### 3.1.1 Optimierung der Herstellung von Einzellinsenwerkzeugen

Nachdem im AP6.1 die Linsendesigns in Absprache mit den Projektpartnern Soitec durch das Fraunhofer ISE erstellt wurden, konnte nach einer Machbarkeitsprüfung im Dezember 2012 deren technische Umsetzbarkeit durch OFO bestätigt werden. In der nachfolgenden Herstellung im Mastering-Prozess wurde die mikrostrukturierte Negativform mit einer Ultrapräzisionsdrehmaschine für die spätere galvanische Replikation erzeugt. Hierfür sollte in Vorversuchen ein geeigneter Spitzenradius für den Schneiddiamant ausgewählt werden.

### Auswahl eines geeigneten Schneiddiamanten in der Masterfertigung

Dem Fraunhofer ISE wurden 2 Mastersubstrate zur Verfügung gestellt, in denen eine Planfläche durch einen 34µm bzw. 50µm Radiusdiamanten erzeugt wurde. Zusätzlich wurden auch SOG-Abformungen dieser Substrate erzeugt und am ISE mittels eines Goniometers charakterisiert. Im Ergebnis dieser Messungen konnten innerhalb der Detektionsgenauigkeit keine signifikanten Unterschiede im Reflexionsverhalten festgestellt werden.

Eine Vorabuntersuchung mit einem Lichtmikroskop bei OFO zeigte ebenfalls keine relevanten Unterschiede auf der Oberfläche des Substrates, wie die Aufnahmen aus Abbildung 3 zeigen. Die Oberflächenrauigkeit wurde zudem mit einem Tastschnittgerät gemessen. Die Auswertung zeigte mit Unterschieden von weniger als 2% keine signifikanten Einflüsse. In Verbindung mit den am Fraunhofer ISE durchgeführten Untersuchungen der Ronden und der zugehörigen SOG-Abformungen, fiel die Entscheidung für die Masterherstellung der Projektdesigns schließlich auf einen 50µm-Radiusdiamant.

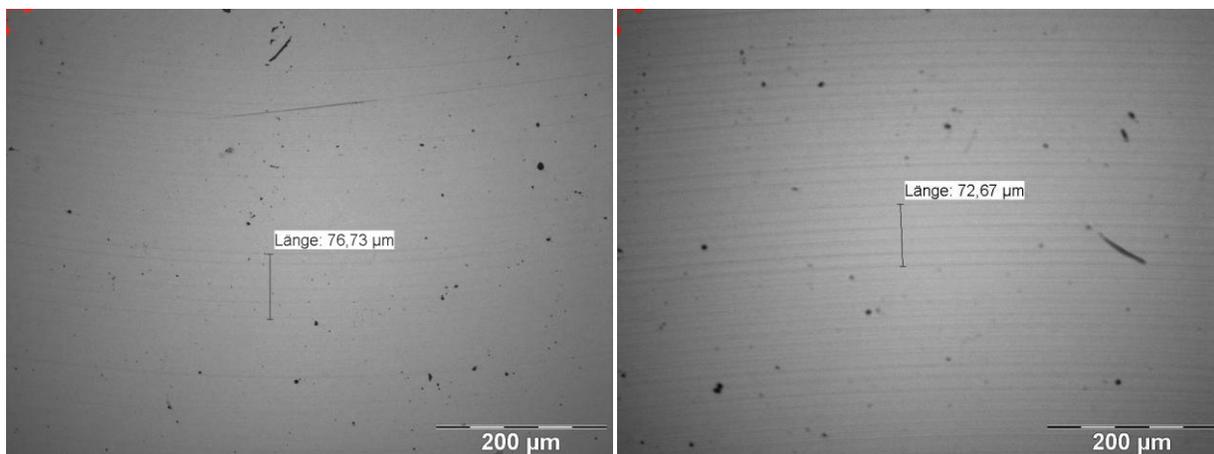
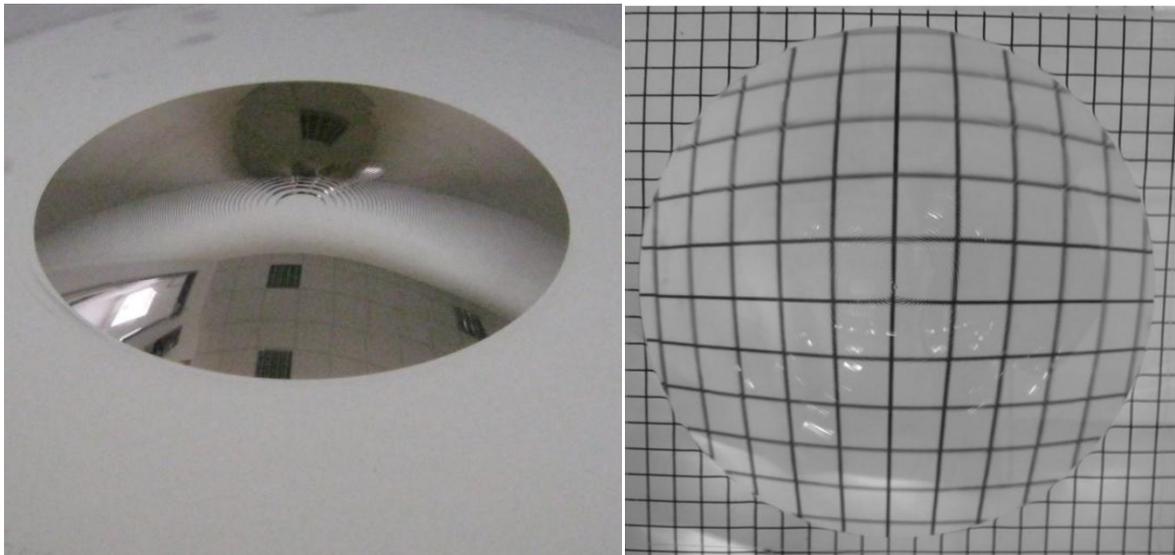


Abbildung 3 Mikroskopbilder des Mastersubstrats nach Bearbeitung mit einem 34µm-Radiusdiamanten im linken Bild bzw. 50µm-Radiusdiamanten im rechten Bild

### Masterfertigung und Linsendesignevaluierung

Anhand der Designvorgaben wurde ein Maschinenprogramm für den Fertigungsprozess mit der Präzisionsdrehmaschine erstellt und in das Mastersubstrat überführt. Dieser Vorgang wurde für alle in Tabelle 1 aufgeführten Einzellinsendesigns, mit entsprechend der Strukturvorgabe abgeänderten Maschinenprogrammen, wiederholt. Die so entstandenen Einzellinsen-Master wurden an das Werkzeugfertigungszentrum in Rochester (USA) geschickt und dort durch galvanisches Abscheiden einer Metallschicht ein Replikat mit invertierter Fresnelstruktur, wie in Abbildung 4 (a) beispielhaft für das Design SC2305 gezeigt, hergestellt. Dieses wird vom Master getrennt und rückseitig zu einer ebenen Fläche abgeschliffen. Ausgehend von der damit erzeugten Werkzeug-Mutter wird durch Wiederholung des Replikationsprozesses ein Werkzeugstempel mit, im Vergleich zum Master, gleicher Strukturausrichtung erzeugt. Dieser Werkzeugstempel, auch Stamper genannt, wird zur Herstellung der SOG-Einzellinse eingesetzt. Die optische Wirkung der so hergestellten Sammellinse ist in Abbildung 4 (b) beispielhaft für die Betrachtung eines quadratischen Testrasters dargestellt.

Die hergestellten SOG-Einzellinsen wurden zur Bewertung ans Fraunhofer ISE geschickt und dort am modifizierten Linsenmessplatz evaluiert. Die Auswertung der ersten Designgruppe förderte jedoch einen Fehler in der Simulationssoftware zu Tage. In Absprache zwischen den Projektpartnern wurde eine zweite, um diesen Störeinfluss bereinigte Designgruppe der beiden erfolgversprechendsten Designansätze hergestellt und die entsprechend neuen Master-Werkzeuge geschnitten. Eine ausführliche Diskussion der Messergebnisse wurde vom ISE durchgeführt. Die Messwerte der Linsenabformung SC2326 zeigten die kleinsten Abweichungen zum erwarteten Temperaturverhalten und zudem die höchste optische Effizienz. Für die Herstellung des Linsenplattenwerkzeugs wurde daraufhin das Einzellinsendesign SC2326 ausgewählt.



(a) Werkzeug-Mutter

(b) SOG-Einzellinse

**Abbildung 4** Metall-Werkzeugstempel des Einzellinsendesigns SC2305 und Betrachtung eines Testmusters in der zugehörigen SOG-Einzellinse

### **Effizienzgewinn durch verringerten Störflankenwinkel**

Durch die Verwendung eines Kunststoffmasters, wie in 3.1.2 beschrieben, ergeben sich zudem neue Möglichkeiten in den Strukturanforderungen. Die Entformungsschräge kann, dank der besseren Entformungseigenschaften des verwendeten Werkstoffes, kleiner ausgelegt werden. Im Rahmen des Projektes wurde das favorisierte Linsendesign SC2326 mit einem verringerten Störflankenwinkel unter der Designbezeichnung SC2345 neu angefertigt und ein Testwerkzeug damit hergestellt. In einer Messung wurde, mit einem bei OFO vorhandenen Messgerät, ein relativer Effizienzgewinn in der Größenordnung von 1% ermittelt, was auf die Erhöhung der optisch wirksamen Fläche zurückzuführen ist. Die gemessene Effizienz ist in Abbildung 5 über dem veränderten Abstand zur Fresnellinse aufgetragen. Sowohl Abstand, als auch Effizienz, sind darin auf den gemessenen Maximalwert des bisherigen Designs SC2326 normiert. Eine Bestätigung durch eine Einbauprobe konnte bei Soitec, mangels nötiger Fertigungskapazitäten, nicht mehr umgesetzt werden.

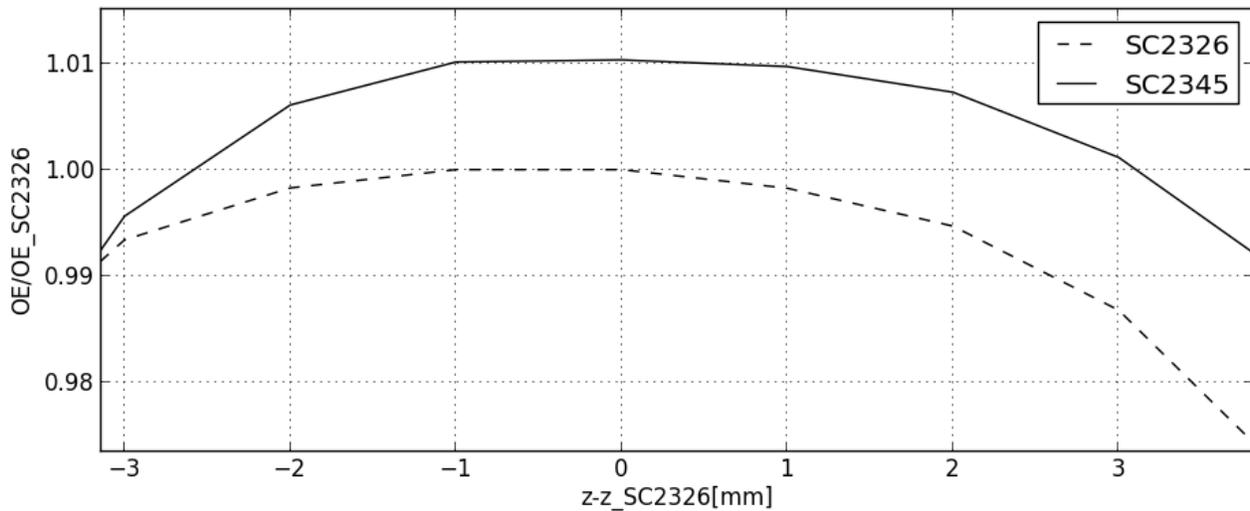


Abbildung 5 Messung der relativen optischen Effizienz bei Versuchswellenlänge 680nm

Dafür wurde bereits im Vorfeld, basierend auf der Linseplatte PQ2547 des Standardsubmoduls CX-M500 von Soitec, eine abgewandelte Linseplatte PQ2580 mit verringertem Störflankenwinkel unter Verwendung eines geklebten Softtools hergestellt. Ein Modultest durch Soitec zeigte eine Leistungssteigerung von 3,5% im Vergleich zur bisher eingesetzten Linseplatte. Diese beachtliche Leistungssteigerung bekräftigte die Relevanz die Werkzeugentwicklung in dieser Richtung weiter zu führen. Für die Herstellung von Linseplattenwerkzeugen mussten somit neue Verfahren entwickelt werden, welche einen verringerten Störflankenwinkel erlauben.

### 3.1.2 Methoden zur Herstellung von Linsearraywerkzeugen

Wird eine Einzellinse, ähnlich dem Projektdesign SC2326, für den CPV-Einsatz ausgewählt, gilt es diese in einem Linsearray zu replizieren. Durch das dabei stattfindende Parallelisieren der Produktionsprozesse wird der Herstellungsaufwand verringert und somit die Kosten für die Modulherstellung reduziert. Hierfür bedarf es eines Werkzeugstempels, der eine Vielzahl der Einzellinsen enthält. Die Eigenschaften der Linsen sollen dabei bestmöglich erhalten bleiben. Dabei ist die Qualität der Fresnelstruktur auch an den zusammenstoßenden Linsenrändern zu erhalten. Jeder Verlust der optisch wirksamen Flächen durch Abrundungen oder Verbindungsnahte ist zu vermeiden. Die nötige Präzision verdeutlicht ein im Rahmen des Projekts hergestellter Werkzeugmaster, von welchem in Abbildung 6 ein Strukturausschnitt zu sehen ist. Es ist sehr deutlich der nahtlose Übergang der Strukturspitzen und -täler zwischen den Einzelsegmenten zu erkennen



Abbildung 6 Strukturausschnitt aus dem Randbereich zusammengesetzter Fresnelstrukturen in einem Masterwerkzeug

Vor dem Projektbeginn waren bereits zwei verschiedene Herangehensweisen für die Werkzeugherstellung bekannt und erprobt, das Softtool und das Hardtool. Wie aus Abbildung 7 hervorgeht, wird der Einzellinsen-Werkzeugbaum verwendet, um eine aus Kunststoff oder Metall bestehende Einzellinsenstruktur zu einem Linsenarray zusammenzusetzen. Während das aus Kunststoff bestehende geklebte Softtool durch einen geringeren Herstellungszeitraum und -aufwand hervorsteicht, bietet das aus Metall bestehende Hardtool eine höhere Reproduzierbarkeit und Standzeit. Ziel der Entwicklungsarbeiten war, die Parkettierung metallischer Einzellinsenstrukturen zu vermeiden, da diese wegen ihres hohen Zeit- und Kostenaufwands den generationsbasierten Modulentwicklungen hinderlich sind. Überdies ist im Replikationsprozess eines Metallarraywerkzeugs ein minimaler Störflankenwinkel von  $5^\circ$  im Randbereich der Linse erforderlich, um eine störungsfreie Entformung zu gewährleisten. Der hohe Störflankenwinkel geht, wie in Abbildung 5 gezeigt, mit ungewünschten Leistungsverlusten einher und sollte vermieden werden. Unter diesem Hintergrund wurden verstärkt leichter entformbare Materialien, ähnlich denen des Softtools, untersucht.

Zu Beginn des Projekts wurden deshalb Untersuchungen angestellt die prozessbedingten Schwankungen bei der Herstellung des Softtools zu verringern und die Standzeit zu verlängern, was in 3.1.2.1 genauer beschrieben wird. Mit Hilfe der Fortschritte in diesem Prozess und der Untersuchung unterschiedlicher Kunststoffe sowie Verarbeitungsmethoden wurde, wie in 3.1.2.2 beschrieben, ein Verfahren entwickelt, welches die Herstellung eines monolithischen Softtools erlaubt. Darauf basierend wurden abschließend Verfahren getestet, welche die Herstellung von Hardtools mit verkürzter Vorlaufzeit umsetzen. Dieses in 3.1.2.3 beschriebene Vorgehen erlaubt darüber hinaus eine Störflankenreduktion, was gegenüber dem vom Metall replizierten Hardtool einen Effizienzgewinn ermöglicht.

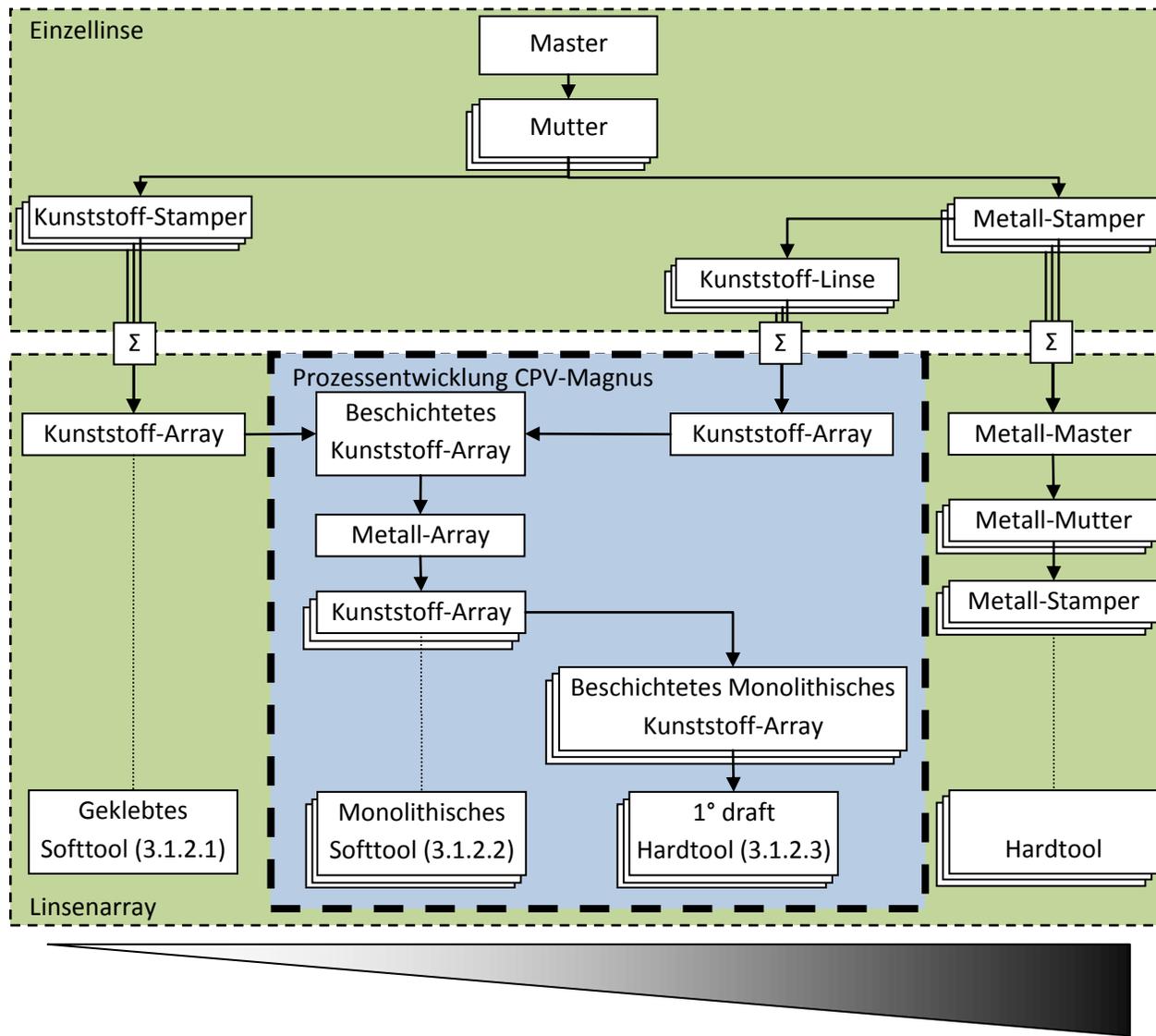


Abbildung 7 Methoden zur Herstellung eines Linsenarraywerkzeugs

### 3.1.2.1 Optimierung der Herstellung geklebter Softtools für die Prototypenlinsenplatten

Für die Herstellung der Prototypenlinsenplatten wurden im Vorfeld Untersuchungen angestellt, um die geometrischen und optischen Toleranzen der Softtool-Fertigung einzuengen. Einen wichtigen Qualitätsfaktor der Linsenarrays bildet dabei die präzise Positionierung der Linsenzentren. Diese dürfen nur in geringen Grenzen variieren, um eine zentrale und somit optimale Ausleuchtung der Solarzelle bzw. der Sekundäroptik zu ermöglichen. Unter anderem wurden bisherige Annahmen zum Temperatureinfluss mit neuen experimentellen Methoden überprüft, die Ergebnisse sind in Abbildung 8 dargestellt. Erstmals wurde die produktionsstypische zyklische Erwärmung bzw. Abkühlung überprüft. Es wurden keine signifikanten Einflüsse festgestellt.

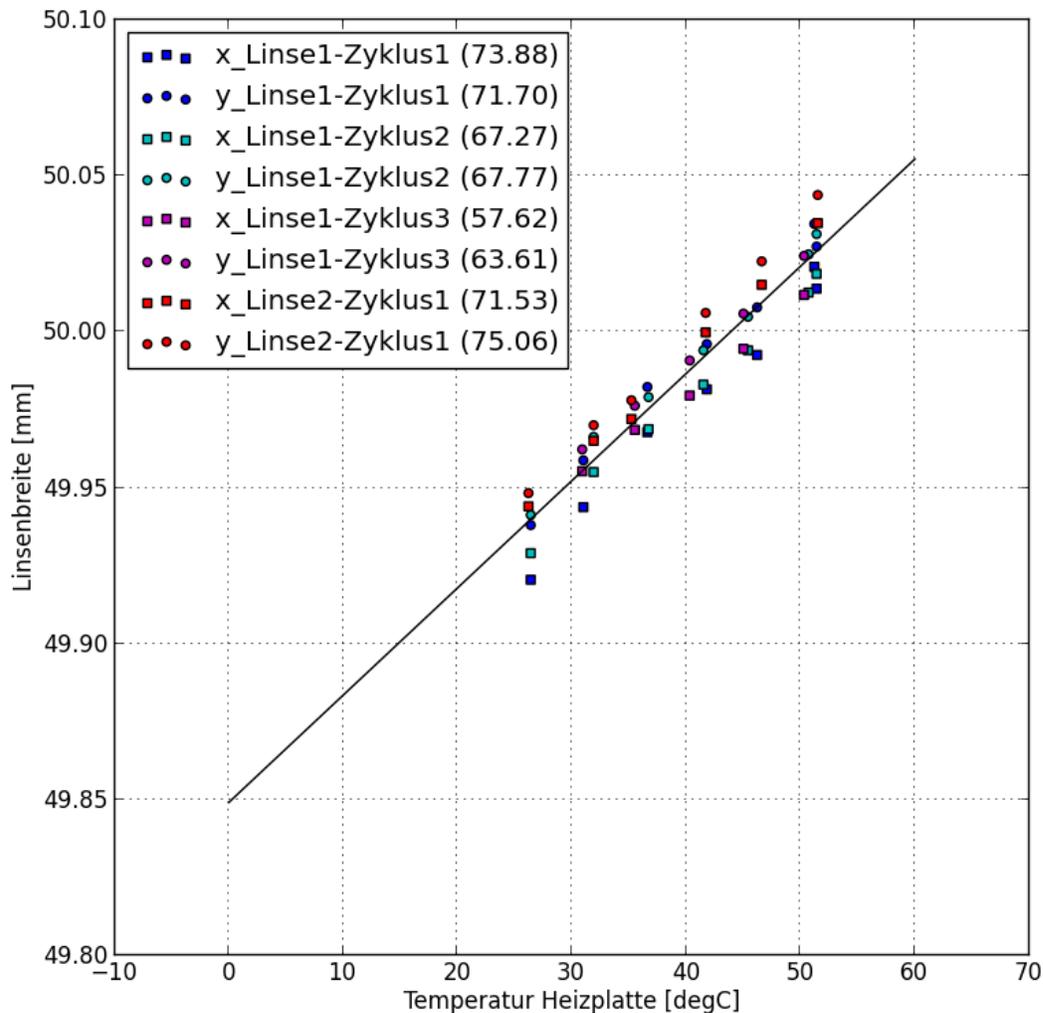


Abbildung 8 Ergebnisse der experimentellen Untersuchung zum Ausdehnungsverhalten des Werkstoffes PMMA bei zyklischer Erwärmung einer Einzellinse

Die Ergebnisse wurden an einem Testwerkzeug mit einem neu entwickelten Auswerteprogramm in der laufenden Produktion evaluiert. Abbildung 9 (a) zeigt, wie durch Vermessung des Werkzeugs bei Raumtemperatur bereits das Verhalten des Endproduktes, unter Berücksichtigung der

Prozesstemperatur, simuliert werden kann. Dies ermöglicht es, noch vor dem Produktionsstart Korrekturmaßnahmen einleiten zu können. Die Messergebnisse der SOG-Abformungen, welche in Abbildung 9 (b) zusammengefasst sind, bestätigen das vorausberechnete Verhalten nach Abbildung 9 (a). Bedingt durch die Abformung des Werkzeugstempels, treten die Abweichungen um eine Achse gespiegelt, in diesem Fall also mit negativen Ordinatenwerten, auf.

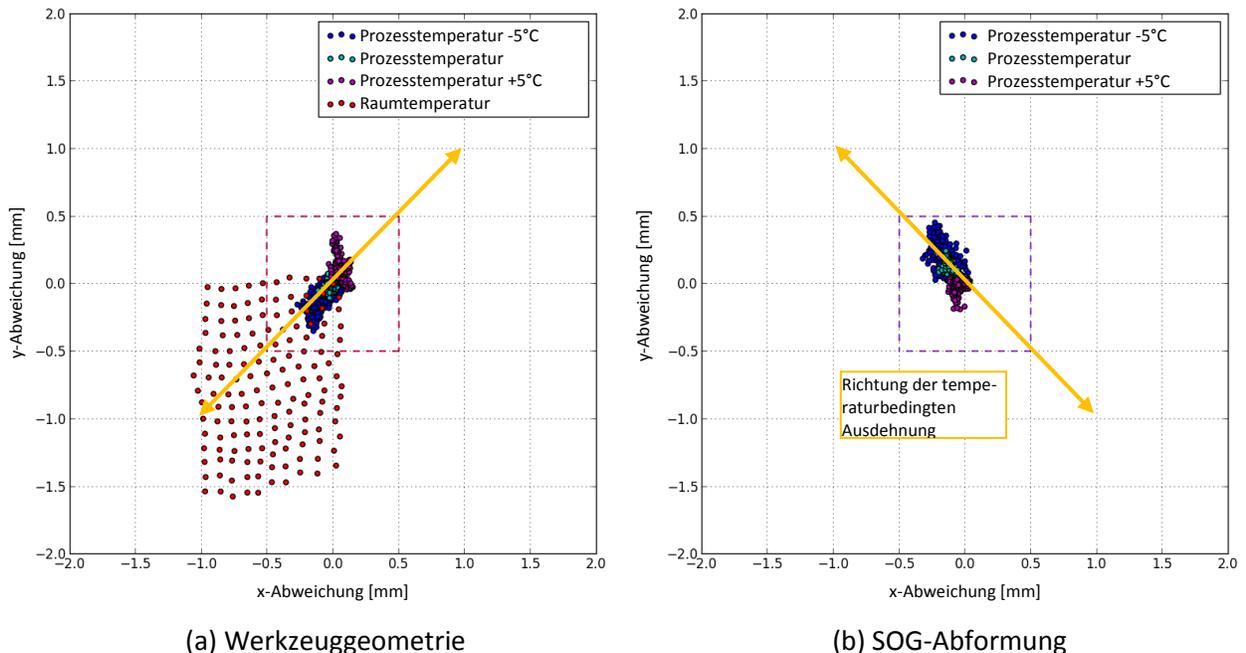


Abbildung 9 Abweichungen der Linsenzentren bei Geometrievermessung im Testarray, (a) Werkzeug und Vorausberechnung des Produktionsverhaltens, (b) SOG-Abformungen bei unterschiedlichen Prozesstemperaturen

Zudem wurde durch eine eigens erstellte Datenbank die Bestellung, Konstruktion, Herstellung und Qualitätssicherung vereinheitlicht. Hierdurch wurde die Rückführbarkeit auftretender Mängel verbessert und es ließen sich Unregelmäßigkeiten in der Werkzeugherstellung unterbinden. Die einzelnen Prozessschritte, von der Konfektionierung der Einzellinse bis hin zu deren Parkettierung, sind damit einer zentralen Prozessüberwachung zugänglich. Mit der fortlaufenden Nutzung und Weiterentwicklung über das Projektende hinaus werden damit Erfahrungswerte für die Qualitätssicherung bereitgestellt.

Angewendet wurden diese neuentwickelten Optimierungen schließlich an der Prototypenlinsenplatte. Das in Absprache mit den Projektpartnern favorisierte Einzellinsendesign SC2326 wurde zur Herstellung des Prototypenwerkzeugs ausgewählt. In Anlehnung an die Glasgröße des Serienmoduls der Soitec Solar GmbH wurden 72 Linsen in der Linsenplatte mit der Designbezeichnung PQ2576, entsprechend der Zeichnung aus Abbildung 10, zusammengefasst. Das Werkzeug wurde in einem Polymermaterial, wie in Abbildung 11 zu sehen, umgesetzt. Aufgrund der Herstellungsweise wird dieser Werkzeugtyp als geklebtes Softtool bezeichnet.

Da die Qualität der mit einem geklebten Softtool abgeformten SOG-Linsenplatten in erheblichem Maße von Prozessparametern abhängig ist aber auch durch deren gezielte Beeinflussung optimiert werden kann, wird auf die Ergebnisse in Abschnitt 3.4 genauer eingegangen.

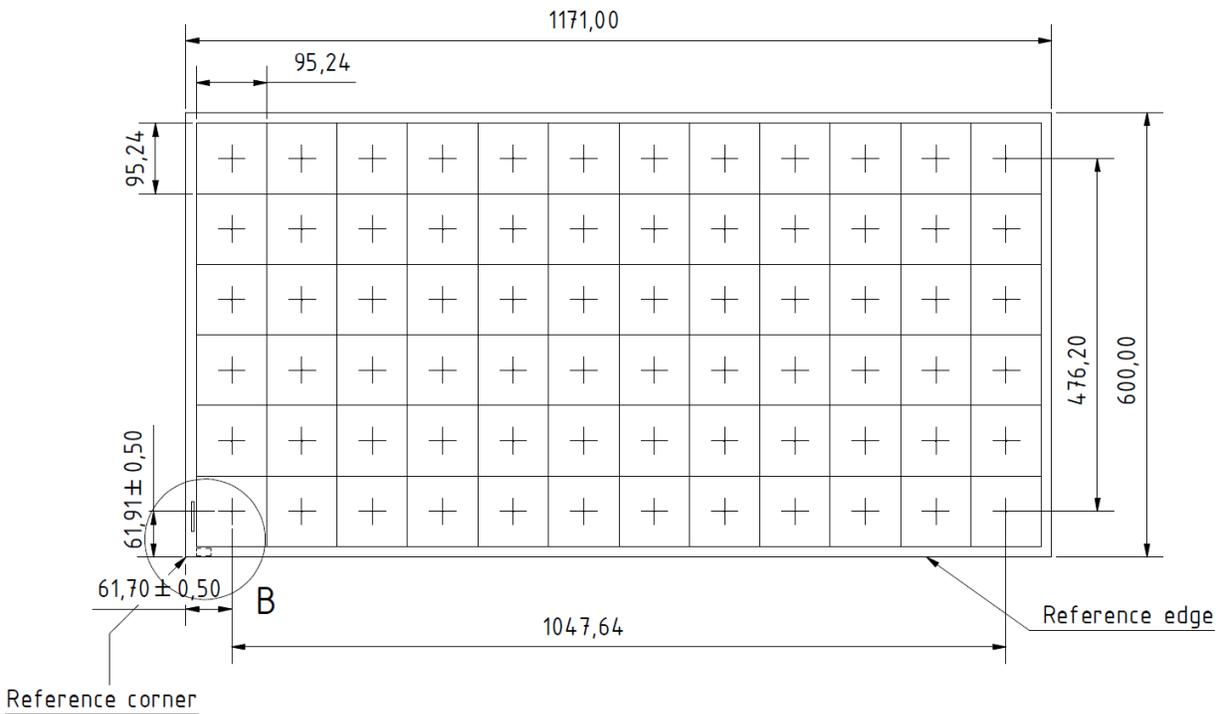


Abbildung 10 Zeichnungsausschnitt des Linsenarray PQ2576

Weitere Anwendung fand der optimierte Produktionsprozess bei der Herstellung von Linsenplatten für Demonstratormodule in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE (Steiner, 2015) und Soitec (S. van Riesen, 2015), welche die Leistungsfähigkeit der CPV bei Ausschöpfung aller technisch umsetzbaren Möglichkeiten aufzeigen und weltweit neue Leistungsmaßstäbe setzen.

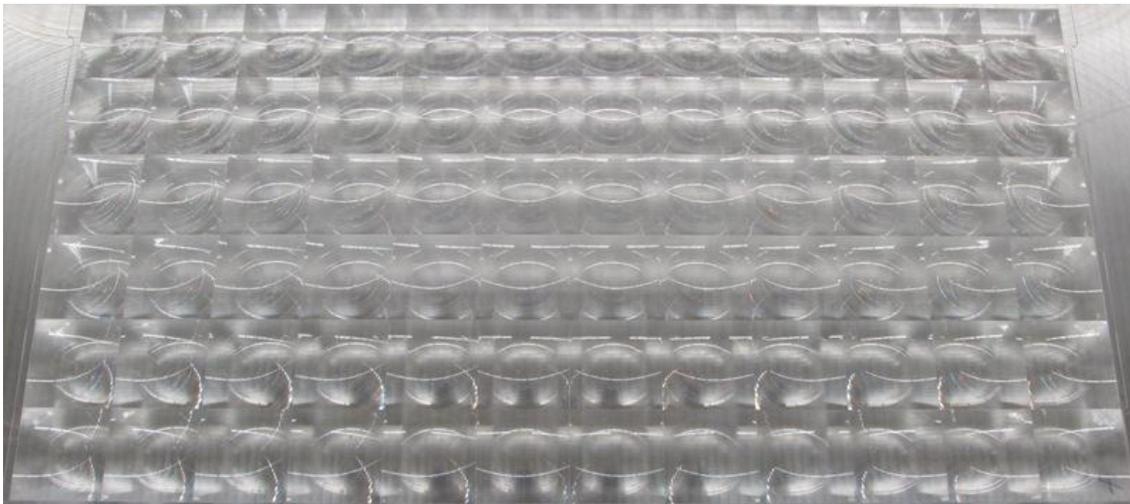
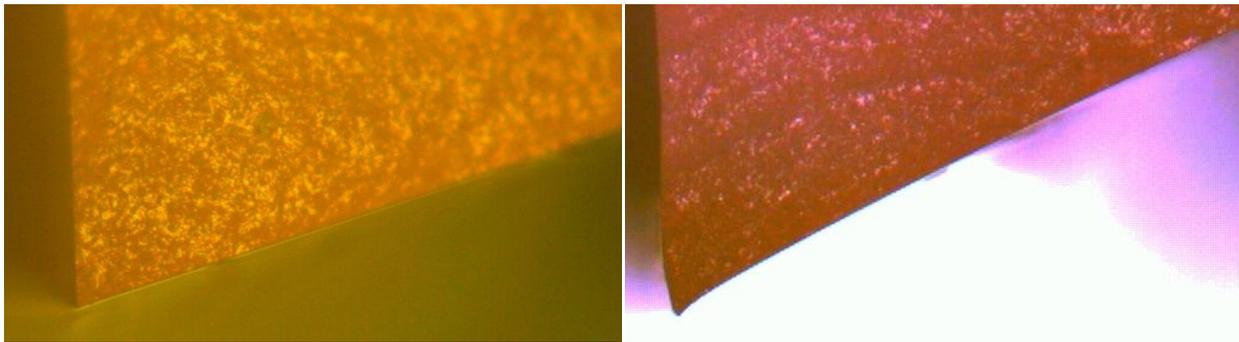


Abbildung 11 Umsetzung des Linsenarrays PQ2576 im Prototypen-Werkzeug PQ2576-T02

### 3.1.2.2 Herstellung Monolithischer Softtools

Um die Produktion größerer Stückzahlen sicherzustellen, wurden verschiedene Ansätze neuartiger Herstellungsprozesse für Nickelarraywerkzeuge untersucht, bei welchem das Softtool als Masterwerkzeug dient. Hierdurch wurde vor allem die lange Herstellungszeit des Nickelarraywerkzeugs verkürzt, während die gewohnte Werkzeugstandzeit erhalten bleibt. Da zusätzlich die Herausforderung bestand, Fresnelstrukturen mit immer kleineren Störflankenwinkeln zu realisieren, wurden im ersten Ansatz Abformungen mit einem relativ flexiblen organischen Material hergestellt. Diese wurden in einem PVD-Prozess mit einer leitfähigen Goldschicht versehen, welche als Grundlage für das spätere Aufwachsen einer Metallschicht im Galvanikbad dient. Eine Untersuchung unter dem Mikroskop in Abbildung 12 (b) zeigte jedoch eine merkliche Deformation in der Prismenstruktur. Diese ist im Ursprungswerkzeug in Abbildung 12 (a) nicht erkennbar.



(a) Werkzeug

(b) goldbeschichtete Abformung

**Abbildung 12** Mikroskopaufnahmen des Wirkflankenquerschnitts aus der Fresnelstruktur (a) im Werkzeug und (b) der goldbeschichteten Abformung

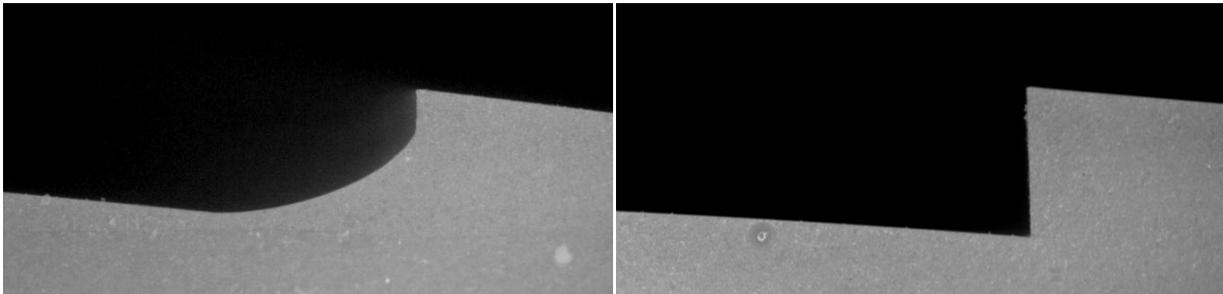
Daher wird vermutet, dass die Verformung aus sich ins Grundmaterial übertragenden internen Spannungen der Goldschicht herrührt. Variationen in den Abscheidparametern der Goldschicht konnten diesen Effekt zwar vermindern aber leider nicht hinreichend unterdrücken. Zudem zeigten sich beim Durchlaufen der nachfolgenden Prozesskette im abgeformten SOG signifikante Effizienzverluste, welche dieses Verfahren unwirtschaftlich machen. Es mussten deshalb im weiteren Projektverlauf alternative (Material-)Ansätze mit geringeren Verformungseffekten untersucht werden.

Unter diesem Hintergrund wurden in einem neu entwickelten Verfahren Gießharze verwendet, welche eine höhere Eigensteifigkeit aufweisen. Die in Abbildung 12 gezeigten deutlichen Deformationen der Wirkflanken konnten hierdurch verhindert werden. Jedoch wiesen die erzeugten Hardtools weiterhin eine gravierende Abweichung von der Effizienz der als Referenz dienenden Masterlinse auf. Die Leistungsverluste konnten auch nach mehreren Iterationen nicht unter einen Wert von 5% begrenzt werden. Eine genauere Ursachenfindung wird vorerst nicht verfolgt, da insbesondere die Herstellung größerer Werkzeugdimensionen (>1m) erhebliche Abweichungen hinsichtlich Planarität und geometrischer Toleranz der Einzellinsenzentren zeigt.

Alternativ wurden deshalb auch Versuche unternommen, bei denen das Softtool den Ausgangspunkt (Master) für den Werkzeugbaum bildet. Bisher ließen sich bei Verwendung konventionell hergestellter

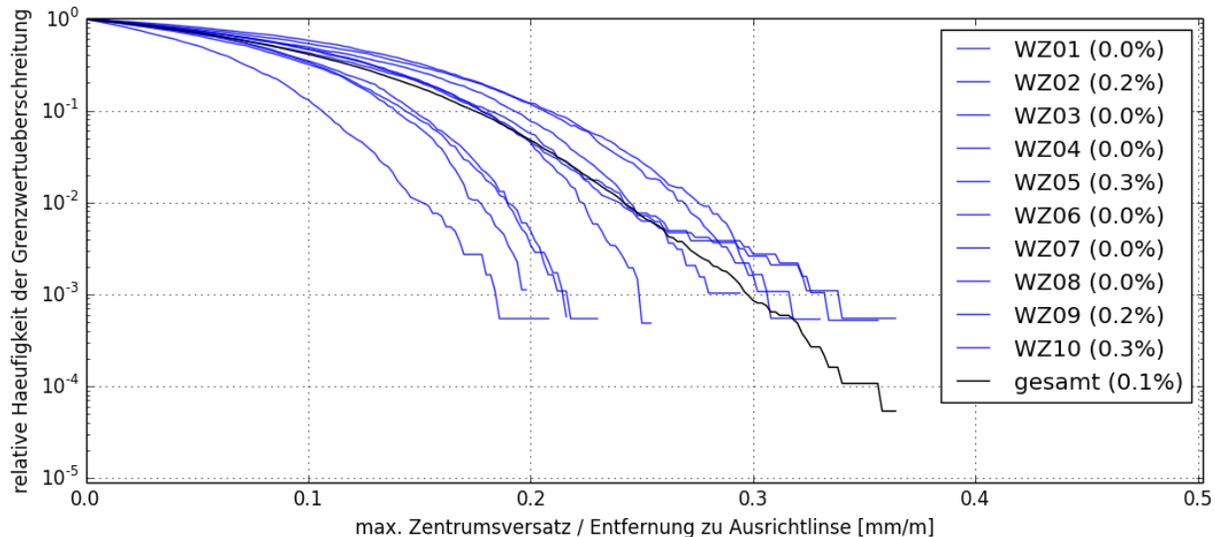
Softtools die dabei auftretenden Oberflächenstörungen jedoch nicht beheben. Hierbei musste vorrangig das Auftragen der leitfähigen Startschicht einer weiteren Optimierung unterzogen werden. Der Beschichtungsvorgang konnte aber so angepasst werden, dass die Oberflächenqualität insbesondere hinsichtlich einer homogenen Schichtdicke verbessert wurde. Beim Durchlaufen der nachfolgenden galvanischen Replikation traten deshalb keine visuell feststellbaren Beschädigungen mehr auf. Zudem ist beim Vergleich der optischen Effizienz einer ausgewählten Testlinse keine messbare Veränderung der Fokussiereigenschaften infolge der durchlaufenen Replikationsprozesse feststellbar.

Der monolithische Werkzeugansatz wurde anhand eines über 100 Linsen beinhaltenden Testarrays erprobt. Die Einbeziehung neuer Produktionsanlagen, welche den Heißprägeprozess bei Werkzeuggrößen von über einem Meter ermöglichen, machte dabei eine komplette Neuentwicklung des Prägeablaufs notwendig. Die Prozess- und Materialparameter mussten deshalb zunächst in Testdurchläufen hinsichtlich optischer Güte und Reproduzierbarkeit optimiert werden. Insbesondere die gleichmäßige Verteilung von Wärme und Druck im Zentrums- und Randbereich ist für die formgetreue Herstellung sicherzustellen. Wie in Abbildung 13 zu sehen, konnte dadurch bspw. die Spitzenverrundung an den Randlinsen des Werkzeuges deutlich reduziert werden.



**Abbildung 13** Mikroskopaufnahme eines Silikon-Testschnitts aus einem monolithischen Softtoolprototyp (links: Strukturausschnitt mit Spitzenverrundung, rechts: Strukturausschnitt ohne Spitzenverrundung nach erfolgreicher Optimierung des Prägevorgangs)

Aufgrund dieser vertrauensereckenden Ergebnisse, wurden weiterführende Testreihen zum dimensionalen Verhalten des angestrebten Werkzeugherstellungsprozesses durchgeführt. Nach wenigen Iterationen ließ sich die absolute laterale Positionierungsgenauigkeit der Linsenzentren auf den für geklebte Softtools bekannten Grenzwert von  $\pm 0,3\text{mm/m}$  beschränken. Die Wiederholbarkeit konnte an 10 Werkzeugabprägungen demonstriert werden. Abbildung 14 zeigt die Ergebnisse einer Stichprobenauswertung mehrerer SOG-Abformungen verschiedener monolithischer Softtools des gleichen Linsenplattentyps. Es zeigt sich, dass die Positionstoleranz nur in 0,1% der Fälle überschritten wird und somit keinen relevanten Ausschussfaktor bildet. Erste Tests deuten zudem darauf hin, dass eine weitere Reduzierung mit Hilfe neuer Prozessanpassungen möglich ist.



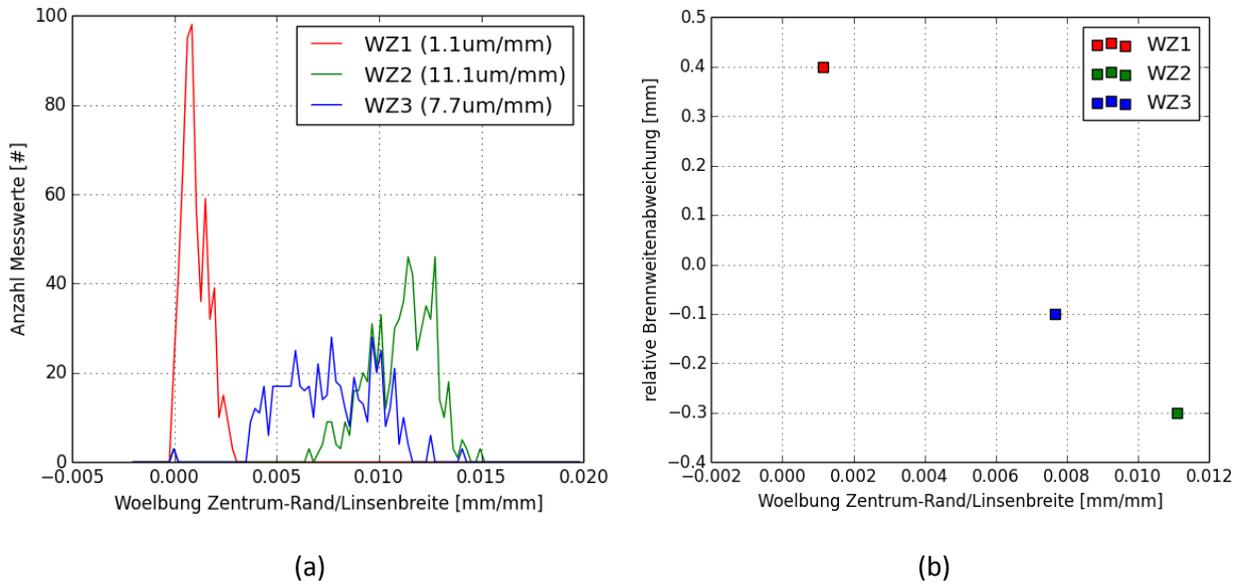
**Abbildung 14 Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit der Grenzwertüberschreitung der lateralen Positionierungstoleranz**

Gegenüber den geklebten Softtools lässt sich eine Steigerung der Standzeit um den Faktor 10 abschätzen. Dies lässt sich auf das homogen ausgeprägte Materialgefüge zurückführen. Beim Entformen können die eingebrachten Zug- und Scherkräfte gleichmäßiger verteilt werden. Dies scheint die Gefahr von Rissbildungen bzw. die Bruchgefahr erheblich zu verringern.

Die Ergebnisse aus den vorangegangenen Softmaster-Versuchen sollten anschließend auch für Strukturflächen mit einer Diagonallänge von über 1m, wie im Prototypenarray, überprüft werden. Dies übersteigt jedoch die bei OFO vorhandenen Kapazitäten der Beschichtungsanlagen. Unter Zuhilfenahme externer Partner wurden Kunststoffmaster mit einer Flächendiagonale von 1,3m hergestellt. Bei der nachfolgenden galvanischen Abscheidung der Nickelschicht traten jedoch erhebliche Defekte auf der Oberfläche auf. Basierend auf den Ergebnissen des ersten Versuchs konnte an einem weiteren Softmaster die Oberflächengüte verbessert werden. Durch die verbliebenen Defekte waren die Werkzeuge aber trotzdem für den Prägeprozess ungeeignet. Bedingt durch den erheblich höheren Aufwand wurden diese Versuche nicht mehr vorrangig weiterverfolgt.

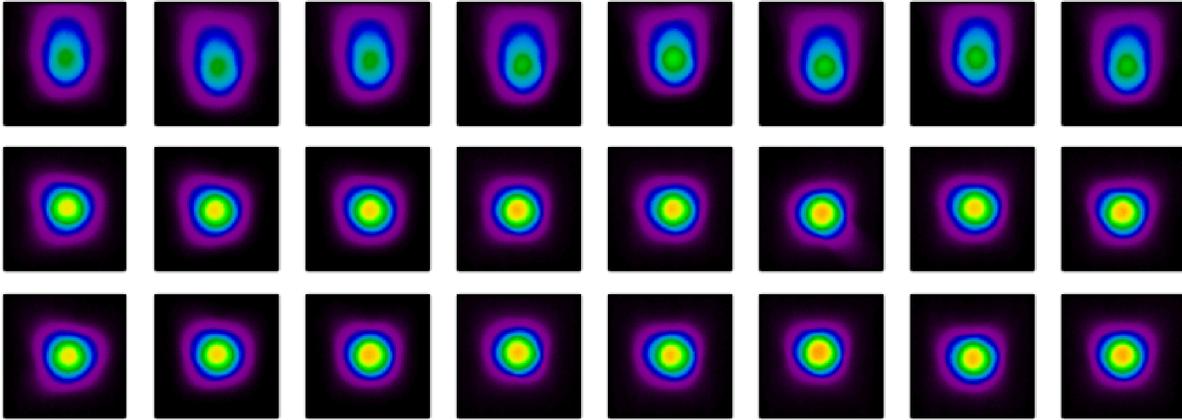
### **3.1.2.3 Herstellung von Hardtools mit reduziertem Störflankenwinkel**

Für die Weiterentwicklung der bei OFO beschichteten Softmaster waren deutlich größere Erfolgsaussichten zu erwarten. Es wurden deshalb Versuche zur Replikation eines monolithischen Softmasters, zum Zwecke der Hardtoolherstellung, unternommen. Dabei wurde in der gesamten Prozesskette als Startschicht die leitfähige Oberfläche eines Kunststoffmasters verwendet, um die Entformbarkeit kleinerer Störflankenwinkel im Sinne der Wirkungsgradsteigerung nutzen zu können. In einem ersten Schritt wurden 3 geklebte Softmaster hergestellt. Vor dem Verkleben wurde die Linsenwölbung, welche sich durch Prozessparameter während des Prägevorgangs variieren lässt gemessen und dokumentiert. Die Häufigkeitsverteilung der Linsenwölbungen je Linsencharge ist in Abbildung 15 (a) dargestellt.



**Abbildung 15** Messung der Wölbung verschiedener Einzellinsenchargen mit (a) jeweiliger histogrammischer Darstellung und (b) Gegenüberstellung der Durchschnittswerte mit den in der Abformung gemessenen Brennweitenvariationen

Es zeigt sich, dass die Wölbung von WZ1 über WZ3 zu WZ2 stückweise zunimmt. Nach Replikation des geklebten Softmasters wurde eine Brennweitenmessung mit den, aus der Metallmutter hergestellten, Silikonabformungen durchgeführt. In Abhängigkeit von der zuvor dokumentierten Wölbung konnte ein geringfügiger Brennweitenversatz festgestellt werden. Eine geeignete Prozesssteuerung bei der Einzellinsenprägung ist somit zur Reduktion der Brennweitenstreuung der Linsenplatte unerlässlich. Aus den erhaltenen Metallmüttern konnten wiederum entsprechend den in 3.1.2.2 entwickelten Prozessen monolithische Kunststofflinsenarrays hergestellt werden, welche in diesem Fall jedoch, nach Aufbringung einer elektrisch leitfähigen Schicht als Softmaster dienen. Die daraus gewonnen Metallstamper zeigten jedoch erhebliche Auffälligkeiten. Sowohl die geometrische Ausrichtung der Linsenzentren, als auch die zuvor gemessenen optischen Parameter konnten nicht reproduzierbar erzeugt werden und variierten, je nach dem verwendeten Softmaster. Die Ursache findet sich in der Replikation, bei welcher, trotz Verwendung des elastischen Mastermaterials, beim Ablösen des Metallwerkzeugs die nahezu senkrechte Entformungsschräge hohen Kraftaufwand erfordert. Dadurch eingebrachte Verformungen beeinflussen die Abbildungsqualität der Linsen in der späteren Abformung. Deutlich wird dies beim Betrachten des Spotbilds im Sonnensimulator. Die in Abbildung 16 in der oberen Linsenreihe sichtbare zunehmende Verzeichnung der sonst kreisförmigen Intensitätsverteilung wurde durch lokale Verformungen des Werkzeugs hervorgerufen.



**Abbildung 16** Ausschnitt der Spotbilder eines Linsenarrays zeigt die Spotverzerrung in der oberen Linsenreihe infolge von Replikationsfehlern

Infolge dieser Störeinflüsse konnte der Zugewinn durch den verringerten Störflankenwinkel leider nicht verlustfrei in ein Produktionswerkzeug überführt werden. Einer Reduzierung dieser Verluste durch geeignete Prozessvariationen bei der galvanischen Replikation ist bis zum Projektende nicht umsetzbar gewesen.

### 3.2 AP7.2 Entwicklung von Verfahren zur qualitativen Bewertung der Werkzeuge

Für die ersten Prototypenmodule wurden unerwartete Einbußen im Wirkungsgrad durch die beteiligten Projektpartner festgestellt. Als Teil der Ursachenforschung musste deshalb auch die Umsetzung des projektierten Linsendesigns an der Fresnellinse weiter verifiziert werden.

Bei Verwendung konventioneller Messverfahren lässt sich die Fresnelstruktur jedoch nicht vollständig erfassen. Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 17 ein Ausschnitt der Untersuchungsergebnisse der Profilvermessungen an dem von OFO bereitgestellten Demonstrator-Werkzeug mit dem erwarteten Designverlauf gegenübergestellt. Keine der gezeigten Methoden ermöglicht es dabei den Strukturverlauf vollflächig, insbesondere in den Strukturtälern, zu erfassen. Während bei taktilen Verfahren der Öffnungswinkel des Tastkopfs die Begrenzung verursacht, ist bei optischen Messverfahren die begrenzte numerische Apertur der Messoptik, sowie die spiegelnde Oberfläche des Linsenwerkzeugs ein entscheidender Faktor für die Messbarkeit. Die Auswertung der mit dem Laser-Scanning-Mikroskop der FH-Kiel durchgeführten Messungen der äußeren Wirkflanken an dem Testwerkzeug zeigte deutlich das Auftreten von Artefakten durch Störreflexe im Bereich der Strukturtäler. In ähnlicher Weise zeigen sich diese Messartefakte auch mit einem bei OFO installierten konfokalen Weißlichtsensor.

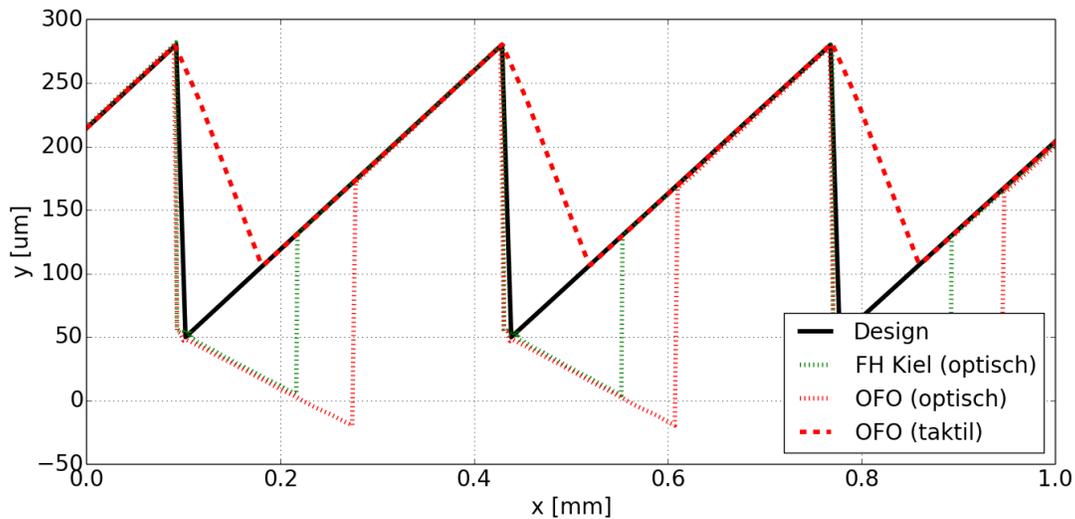


Abbildung 17: Gegenüberstellung der Ergebnisse verschiedener Messmethoden zur Erfassung des Schnittprofils an dem Demonstrator-Werkzeug im Vergleich zur Designstruktur

Um den Verlauf des Oberflächenprofils vollständig zu erfassen, wurde deshalb erstmalig eine Untersuchung eines abgeformten Strukturschnitts mit Hilfe einer kamerabasierten Auswertung initiiert. Dabei werden mehrere Aufnahmen der Schnittkante zusammengesetzt, wodurch sich eine lückenlose Begutachtung des Linsenprofils ermöglicht. Wie beispielhaft an dem in Abbildung 18 dargestellten Schnittbildausschnitt zu erkennen, zeigten sich dabei keine Verformungen oder Verrundungen in der Fresnelstruktur.

Die Bewertung der Wirkflankenwinkel erwies sich jedoch als sehr störanfällig. Die bei der Bearbeitung des Strukturabgusses eingetragenen Defekte an der Schnittkante ermöglichen keine zuverlässige Detektion des Wirkflankenanstiegs. Zudem können mangels der erreichbaren Auflösung die einzelnen Teilsegmente nicht separat aufgelöst werden. Im Vergleich der gemessenen Wirkflankenwinkel zu den im Linsendesign vorgegebenen Sollwerten konnte kein Trend festgestellt werden. Die auf Werkzeugfehler zurückgeführten anteiligen Verluste lassen sich somit nicht belegen.

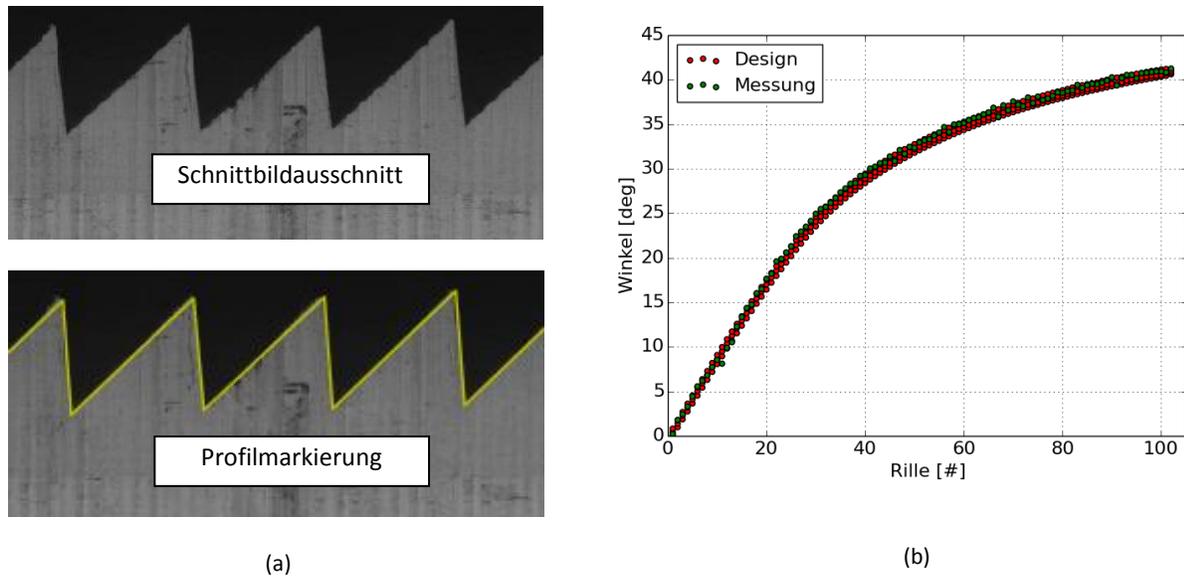


Abbildung 18 Auswertung der (a) Schnittkantenaufnahme und (b) der ermittelten Wirkflankenwinkel einer Testabprägung des Einzellinsenwerkzeugs vom SC2326-Design

### 3.3 AP7.3 Optimierung der Linssenplatten-Komponenten mit Blick auf Effizienzsteigerung und Kostenoptimierung

#### Effizienzgewinn durch Antireflex-Beschichtungen des Trägerglases

Es wurde überprüft, wie mit Hilfe geeigneter Antireflex-Systeme auf der Vorderseite der Konzentrator-Optik die Energieausbeute des CPV-Moduls gesteigert werden kann. Hierfür wurde der gesamte Herstellungsprozess für ein eisenarmes Floatglas vergleichend mit einer Mono-Breitband-AR-Beschichtung (#7109) und als Standardglas mit einer unbehandelten Oberfläche (#7101) durchfahren und schrittweise ausgewertet. Initial zeigt ein Vergleich des Transmissionsspektrums der beiden Gläser einen maximalen Zugewinn von bis zu 2,8%. Wird eine Standardfresnellinse im SOG-Verfahren auf das Trägerglas aufgebracht, so kann der Transmissionszugewinn analog in einer Steigerung der optischen Effizienz nachvollzogen werden. Die Beständigkeit gegenüber der SOG-Fertigung wurde bei OFO für alle relevanten Prozessschritte untersucht. So zeigte bspw. die Glasvorbehandlung auch nach Durchlaufen von 30 Waschzyklen keine Verschlechterung der optischen Effizienz der AR-beschichteten Linssenplatten.

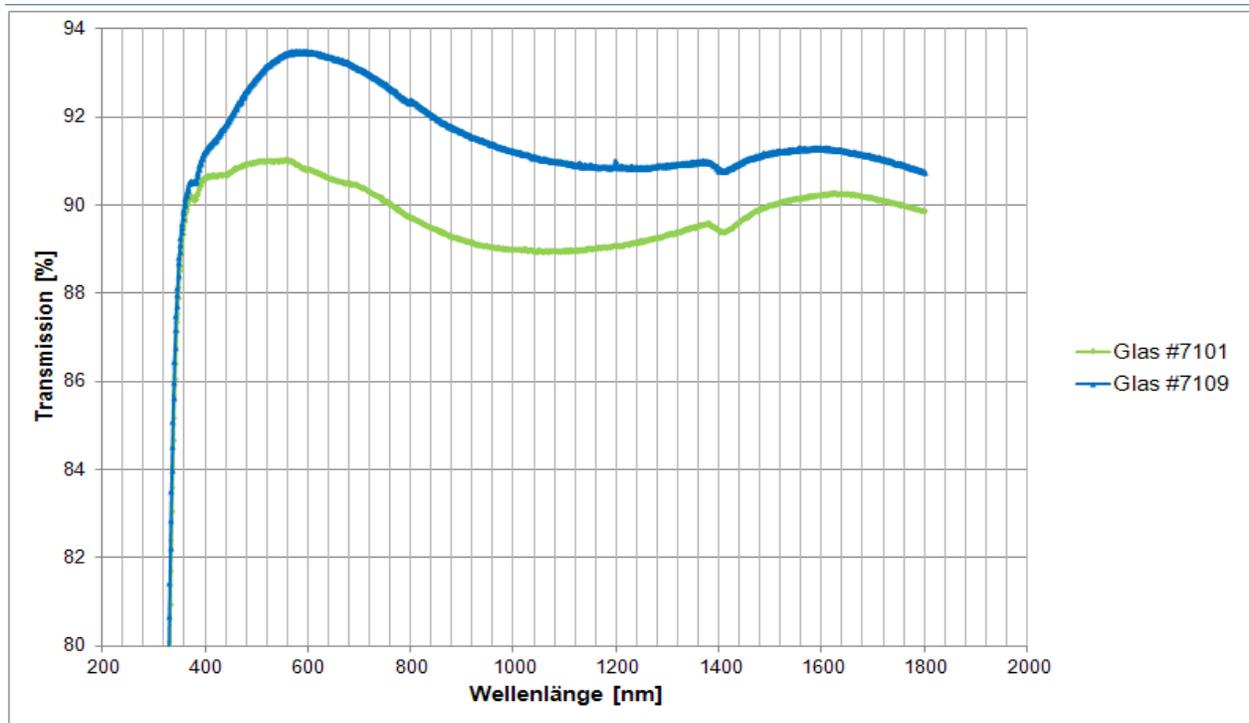


Abbildung 19 Transmissionsspektrum von Standard-Floatglas #7101 und antireflektiv beschichtetem Floatglas #7109

Mit dem Durchlaufen der kompletten SOG- und Modul-Fertigungsprozesse konnte die Widerstandsfähigkeit der Beschichtung demonstriert werden. Die durch die Transmissionsdaten vorausgesagte Wirkungsgradsteigerung des CPV-Moduls um 2,4% wurde an Soitec-Modulen nachgewiesen. Die Beständigkeit im Feldeinsatz wurde durch die Anwendung eines serienmäßigen PV Reinigungssystems für eine Nutzungsdauer von 29 Jahren getestet. In Leistungsmessungen vor und nach dem Test konnten keine signifikanten Leistungsverluste gegenüber einem unbeschichteten Glas festgestellt werden. Für beide Varianten war die Leistungsabnahme weniger als 1% und somit unterhalb der Messunsicherheit des Indoorflashers. Überdies wurde die Eignung des AR-Glases durch die Fertigung und Montage von 48 CX-M500 Modulen von Soitec demonstriert.

Weitere Steigerungen lassen sich zukünftig durch Verwendung neuartiger Entspiegelungsschichten vermuten. Im Zuge der Evaluierung von AR-beschichteten Glasplatten wurde begonnen, ein alternatives Schichtsystem auf Basis von Metallfluoriden zu untersuchen. Diese versprechen ein höheres Entspiegelungspotential als silikatische Schichten. Es zeigte sich, dass der Alterungszustand des Glases von entscheidender Wichtigkeit für die (optische) Güte der Entspiegelung ist. Mit den eingeschränkten Möglichkeiten einer Laborbemusterung konnten auf diese Weise beidseitig entspiegelte Scheiben mit einer Spitzentransmission von 98,8% erzeugt werden, was in etwa einer Steigerung von 0,4% je Grenzfläche gegenüber silikatischen AR-Gläsern entspricht. Gleichzeitig wird eine gute Homogenität und Stabilität der Schichten erreicht, was jedoch in den einschlägigen Klimatest u.a. noch bestätigt werden muss. Ob und wie sich derartige AR-Schichten ggf. in den Herstellungsprozess der Optiken integrieren ließen, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch kaum abschätzbar.

## Optimierung des optischen Silikons

Im Rahmen des Projekts wurden zwei Optimierungsansätze untersucht die Verarbeitung des Silikons zu vereinfachen und die Herstellungszeit je Linseplatte zu reduzieren. Im üblichen Produktionsprozess wird das optische Silikon durch eine thermische Vernetzungsreaktion bei aufgelegtem Prägestempel auf der Glasplatte ausgehärtet. Dabei fungiert eine vorher aufgebrauchte Haftschrift als Bindeglied zwischen dem Glassubstrat und dem Silikon. Die Haftschrift muss dabei gleichmäßig und dünn auf der Glasoberfläche aufgebracht werden, um die Eigenschaften der Fresnelstruktur nicht zu beeinflussen. Um Störungen in diesem aufwendigen Prozess sowie die nötige Reaktionszeit zu vermeiden, wurde ein selbsthaftendes Silikon für Produktionszwecke geprüft. Tests zeigten, dass dadurch jedoch die Haftung zwischen Silikon und Glassubstrat verringert wird und im Gegenzug die Entformbarkeit verschlechtert wird, da die Haftkräfte am Werkzeugstempel steigen. Insbesondere in Hinblick auf einen möglichen zukünftigen Einsatz der unter 3.1.2.2 beschriebenen monolithischen Softtools ist keine Entformung von der Kunststoffoberfläche gewährleistet. Eine Implementierung in den Produktionsprozess wurde somit ausgeschlossen.

Um die Zuverlässigkeit der Silikonoptiken für den Verwendungszeitraum von über 20 Jahren zu gewährleisten, muss eine ausreichende Vernetzung während des Aushärtevorgangs stattfinden. Hierfür muss vorzugsweise eine hohe Temperatur über einen langen Zeitraum in das Material eingebracht werden. Eine Erhöhung der Temperatur zum Zwecke der Verkürzung der Produktionszeit führt jedoch, wie hinreichend untersucht wurde (Hornung, 2010), zu ungewollten Abbildungsfehlern, je mehr die Anwendungstemperatur von der Prozesstemperatur bei der Herstellung abweicht. Selbst unter Ausnutzung der im Prototypendesign umgesetzten Kompensationsansätze durch geeignete Konturanpassungen der Ideallinse, lässt sich dieser Effekt nicht beliebig reduzieren. Um die Prozesszeit trotzdem reduzieren zu können, wurde hingegen getestet, ob durch neue Rezepturen bei der Silikonherstellung, welche unter der internen Bezeichnung #7212 geführt wurden, eine schnellere Aushärtung gegenüber dem Standardsilikon #7201 beobachtbar ist.

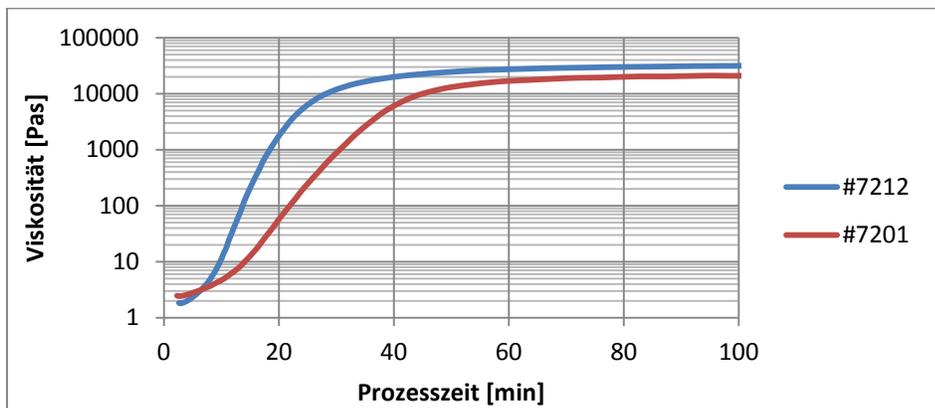


Abbildung 20 Messung der Viskosität während des Aushärtevorgangs des Standardsilikons #7201 im Vergleich zu dem schneller aushärtenden Silikon #7212 bei gleicher Prozesstemperatur

Es galt dabei die Prozessfähigkeit in der SOG-Herstellung und die Degradation bei beschleunigten Klimatests unter Standardbedingungen zu überprüfen. Messungen zeigten eingangs, wie in Abbildung 20 dargestellt, dass die Viskosität des schneller härtenden Silikons #7212 etwa um 30% schneller ansteigt, was einer Verkürzung der Prozesszeit zugutekommt.

### **Klima- und Bewitterungstests zur Untersuchung der Langlebigkeit der Linsenplatten-Komponenten**

Die Beständigkeit der AR-Beschichtung sowie des schnellhärtenden Silikons #7212 wurde in Klima- und Bewitterungstests untersucht. Es wurden eigens Proben hergestellt und diese durch den externen Prüfanbieter Innovent e.V. gemäß der CPV-Zulassungsnorm IEC 62108 Klimakammertests unterworfen. Dabei handelt es sich um:

- 1) IEC 62108 Punkt 10.6: Thermal Cycling (TC) / 500 Zyklen -40°C/110°C
- 2) IEC 62108 Punkt 10.7: Damp Heat (DH) / 1000 Stunden bei 85°C und 85% relativer Luftfeuchte
- 3) IEC 62108 Punkt 10.8: Humidity Freeze (HF) 20 Zyklen -40°C/85°C

Die Proben wurden vor und nach dem Alterungstest visuell anhand der Normvorschriften (IEC 62108 Punkt 10.1.2) geprüft und es ließen sich keine Änderungen an den Proben feststellen. Die Adhäsion des optischen Silikons war bei allen Proben weiterhin gewährleistet. Überdies konnten keine Risse, Blasen, Rückstände oder Farbveränderungen beobachtet werden.

Für die als Projektziel im Meilenstein M10.2 hergestellten Prototypen-Submodule wurden Linsenplatten mit AR-beschichtetem Glas #7109 verwendet. Mit den fertig montierten Modulen wurden durch erneute IEC 62108 Klimakammertests die Ergebnisse seitens Soitec bestätigt.

### **Reduzierung der Floatglasdicke**

Um die Herstellungskosten der Primäroptik durch geringeren Materialeinsatz weiter zu senken, ist in Betracht zu ziehen die verwendete Trägerplatte dünner herzustellen. Dies würde überdies das Modulgewicht reduzieren, was bei der Auslegung von Trackerantrieb/-versteifung zu verringertem Aufwand beitragen könnte.

In Absprache mit dem Glashersteller wurden Testreihen mit verschiedenen Glasstärken durchgeführt und analysiert. Die Gläser wurden hierzu auf einem Rahmen lose aufgelegt ,um Abschätzungen zur erwarteten Glasdurchbiegung nach dem Modell der allseitigen Lagerung durchzuführen. Die Gefahr zunehmender Eigendurchbiegung bei dünnerer Glasstärke wurde theoretisch vorausgesagt und konnte in Profilvermessungen bestätigt werden. Die damit einhergehende Verschiebung der Brennpunktlage entlang der optischen Achse bzw. Verkippung der Linse führt jedoch zu ungewollten Verlusten in der Moduleffizienz. Um die Effekte der Eigendurchbiegung zu reduzieren wurde als Lösungsansatz bisher nur die gezielte Vorspannung des Glases in Betracht gezogen. In Absprache mit einem Glashersteller konnte mit werksseitiger Variation der Glasvorspannung die Reduzierung der Glasdurchbiegung in der Modulausrichtung bei Sonnenhöchststand reduziert werden. Es besteht jedoch zugleich die Gefahr, dass durch prozessbedingte Streuungen in der Stärke dieses Effekts die Wirkung aufgehoben wird oder sogar im Zusammenspiel mit der Modulausrichtung bei horizontnaher Sonneneinstrahlung verschlechtert wird.

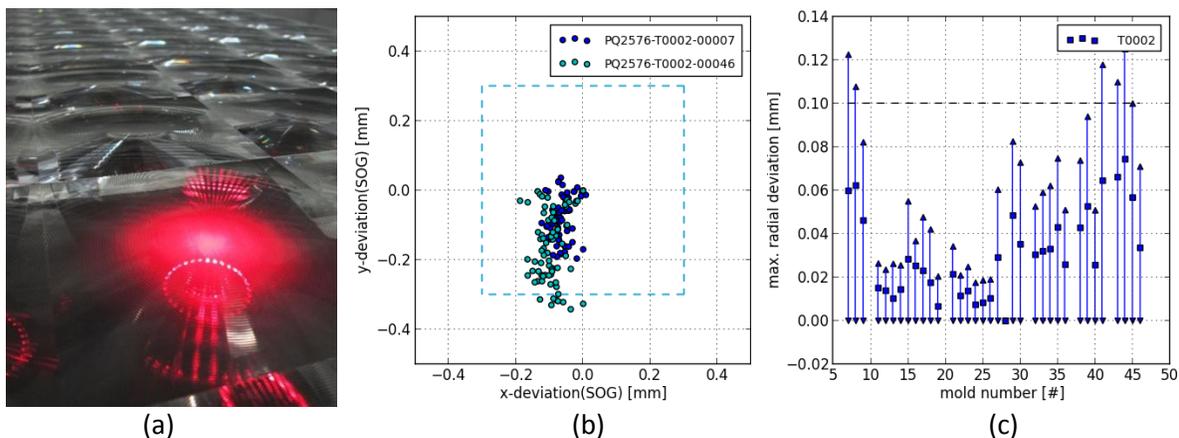
Eine großflächige Implementierung dieser Vorgehensweise ist somit, auch in Hinblick auf die schlechtere Verarbeitbarkeit im SOG-Prozess, noch nicht anzuraten.

### 3.4 AP7.4 Prozessanpassung sowie -optimierung der Herstellung großflächiger Linsenparquets

#### Fertigung der Prototypenlinsenplatten

Für die Testmodule wurden mit Hilfe des Prototypenwerkzeugs PQ2576-T02 die von Soitec angeforderten 35 Linsenplatten hergestellt. Bei vorangegangenen Untersuchungen konnten bereits Schwankungen innerhalb der erreichbaren geometrischen Gleichmäßigkeit festgestellt werden. Als Ursache wurden im Vorfeld der Werkzeugherstellung Temperatureinflüsse untersucht und deren Einflüsse bei der Konstruktion vorgehalten. Um die geometrischen Schwankungen (Ziel~50µm) zu erfassen, sind während des Herstellungsprozesses der Prototypenlinsen alle Linsenplatten mit Hilfe einer industriellen Koordinaten-Messmaschine (CMM) aufgenommen wurden.

In der Abbildung 21 (c) ist die radiale Abweichung der Linsenzentren, bezogen auf die ausgewählte Referenzabformung #28, dargestellt. Die maximale radiale Abweichung(Markierung: ↑) konnte für 85% aller hergestellten Linsenplatten unter 100µm, bzw. die mittlere Abweichung (Markierung: ▴) für 80% auf das gewünschte Projektziel von 50µm reduziert werden.



**Abbildung 21** Messung der Linsenzentren an einer Koordinatenmessmaschine (a) gibt Aufschlüsse über die geometrische Abweichung der absoluten Zentrumsabweichung (b) und des zu #28 relativen radialen Zentrumversatzes (c) der hergestellten Prototypenarrays des Typs PQ2576

Innerhalb eines Produktionszyklus zeichnet sich überdies ein typischer Verlauf ab: die Abstände zwischen den Linsenzentren werden kleiner. In Abbildung 21 (b) zeigt sich dies besonders deutlich anhand zweier Beispiele. Dargestellt ist die Positionsabweichung der Linsenzentren vom Soll-Raster entsprechend der Zeichnung aus Abbildung 10. Als Bezugspunkt dient dabei das Linsenzentrum der Referenzecke. Beim Vergleich einer frühen (PQ2576-T0002-00007) bzw. späteren Abformung (PQ2576-T0002-00046) tritt ein charakteristischer Schrumpf zutage. Als Ursache wird die Abnahme der im Polymerwerkzeug gebundenen Feuchte infolge der wiederholten Aufwärmung während des Aushärtvorgangs

angenommen. Um dieses Verhalten besser zu verstehen und mögliche Gegenmaßnahmen abzuleiten, wurden Testreihen mit Polymerprobestreifen durchgeführt, welche in einem Klimaschrank unterschiedlicher Temperatur bzw. relativer Luftfeuchte ausgesetzt wurden. Die mit den Teststreifen nachgestellten Prozessbedingungen bestätigten die Größenordnung der während der Prototypenherstellung aufgetretenen Beobachtung. Um diesen Einfluss gering zu halten, wird der geometrische Vorhalt in der Konstruktion des Werkzeugs gezielt für die beabsichtigte Standzeit entworfen, um eine größtmögliche Ausbeute zu erzielen.

Die in Abbildung 22 dargestellten Prototypenlinsenplatten wurden abschließend verpackt und an den Kooperationspartner Soitec Solar GmbH versendet.



Abbildung 22 Prototypenlinsenplatten (PQ2576 / 12x6 SC2326) vor dem Versand am 20.03.2014

### Fertigung mit monolithischen Softtools

Neben der Prototypenherstellung auf Basis geklebter Softtools wurde der monolithische Softtoolansatz an einem Versuchsdesign in einem Testlauf angewendet. Die bisher eingesetzten geklebten Softtools waren hierbei insbesondere durch ihre begrenzte Standzeit, infolge von Materialermüdung während des Entformungsvorgangs, limitiert. Ähnliches konnte bei einem monolithischen Prototypenwerkzeug noch nicht beobachtet werden. Die Durchführung weiterer Probeabformungen sollte hierzu genauere Erkenntnisse liefern. Gegenüber den geklebten Werkzeugen ist insbesondere die Rationalisierung der Arbeitsschritte, infolge wegfallender Zuschnitts- und Fügeprozesse, zu erwähnen. Dies trägt zu einer besseren Reproduzierbarkeit der SOG-Eigenschaften bei und verringert den Prüfaufwand in den einzelnen Prozessschritten bei der SOG Herstellung erheblich.

Des Weiteren wurde durch statistische Untersuchungen gezeigt, dass bei der SOG-Herstellung mit den monolithischen Softtools der Fremdmaterialanteil weiter reduziert werden kann. Dies liefert einen Beitrag zur Verringerung der Ausschussrate. Dafür wurde die Erkennbarkeit von Silikonpartikeln bei der visuellen Kontrolle der Werkzeugoberfläche der monolithischen Softtools gezielt ausgenutzt und gesteigert. In einer Stichprobenauswertung konnte einer Reduzierung der Ausschussursache um durchschnittlich 20% beobachtet werden.

### Prozessoptimierung und Anlagenentwicklung

Um den Materialeinsatz beim Vergießen des optischen Silikons der SOG-Primäroptik weiter zu reduzieren, wurde die Biegesteifigkeit der Abformvorrichtung weiter erhöht. Hierdurch lässt sich die Gleichmäßigkeit der Silikonschicht weiter steigern und zugleich, durch Verringerung lokaler Schichtdickenüberhöhungen, die Silikonmenge reduzieren. Die Auswirkungen lassen sich durch Messung des Oberflächenprofils einer SOG-Abformung nachverfolgen. In Abbildung 23 ist dieses Messergebnis beispielhaft unter Verwendung verschiedener Glockensteifigkeiten dargestellt. Die Fresnelstruktur wurde zur Übersichtlichkeit mit einem FIR-Filter weitestgehend ausgeblendet. Die lokale Erhöhung der Silikonschichtdicke im Zentrumsabschnitt lässt sich mit der zusätzlichen Glockenversteifung in diesem Fall um bis zu 0,3mm reduzieren. Beide Messungen zeigen zugleich eine Grundwölbung, welche jedoch, wie unter 3.3 beschrieben, der generellen Verwerfung des Glasträgers zuzuschreiben ist.

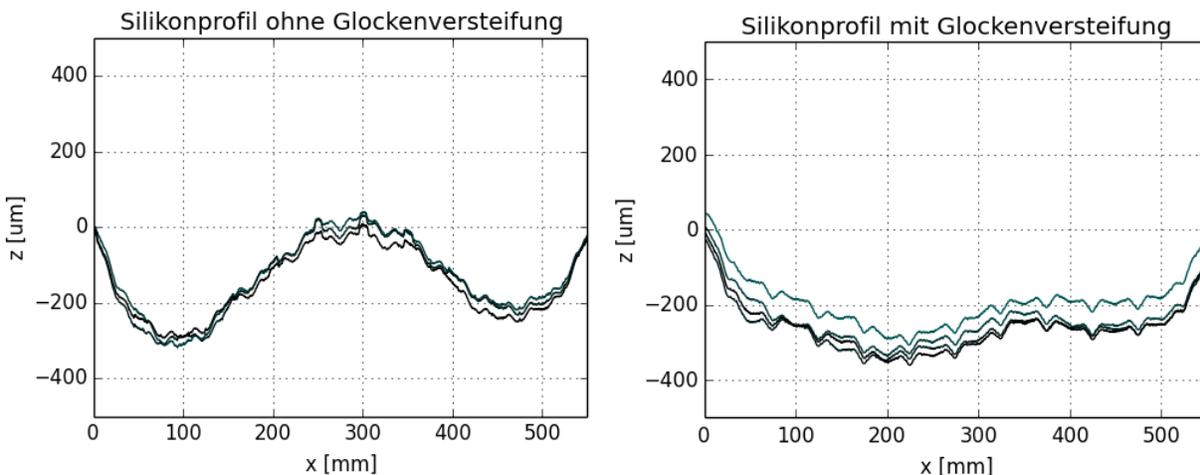


Abbildung 23 Höhenprofil an einer SOG-Abformung links bei Herstellung ohne zusätzliche Glockenversteifung und rechts mit der neuentwickelten Glockenversteifung

### 3.5 AP7.5 Charakterisierung und Qualitätssicherung

Der Herstellungsprozess der Konzentratoroptiken ist naturgemäß Schwankungen unterworfen, welche im Rahmen der Qualitätssicherung durch geeignete Messungen überwacht werden und bei überschreiten festgelegter Grenzen Korrekturmaßnahmen eingeleitet werden. Für Konzentratoroptiken ist dabei die Beurteilung der Abbildungseigenschaften im Sinne einer Punktabbildung des Sonnenlichtes von größter Bedeutung.

### Charakterisierung der Prototypenlinsen bei verschiedenen Wellenlängen

Im Projektverlauf wurden bei der Leistungsbewertung der ersten Prototypensubmodule Verluste festgestellt, ohne jedoch zunächst deren Ursachen einschränken zu können. Zur Komplettierung der vom ISE durchgeführten Linsencharakterisierungen am neuen Linsenmessplatz wurden bei OFO an einem ähnlichen Messplatz Vergleichsmessungen durchgeführt. Während mit dem bei OFO vorhanden Messplatz nur Vergleichsmessungen zwischen Linsen bezüglich der optischen Effizienz machbar sind, können hingegen verschiedene Wellenlängenbereiche durch einen Filterwechsel überprüft werden. Einer Beurteilung der Strahlbreite durch den Interceptradius<sup>2</sup> in der engsten Einschnürung des fokussierten Lichtstrahls ist mit diesem Aufbau genauso möglich. Die Ergebnisse der Kaustikmessung einer Linse des Designs SC2326 sind in Abbildung 24 für zwei verschiedenen Wellenlängen dargestellt. Die Ergebnisse bei 680nm verlaufen nahezu deckungsgleich zu den Messdaten des Fraunhofer ISE. Geringfügige Unterschiede<sup>3</sup> können den abweichenden Messaufbauten und Auswertungen zugeschrieben werden. Gut ersichtlich ist jedoch, wie bei Verkürzung der Beleuchtungswellenlänge die Brennweite, infolge der Dispersion des Silikons, verkürzt wird. Die Beleuchtung der Eintrittsfläche der Sekundäroptik mit dem Radius 2,25mm ist in beiden Fällen, zumindest an einer Stelle, gewährleistet. Dabei tritt jedoch bei Konvergenz des Rotanteils gleichzeitiger die Divergenz des Blauanteils auf. Die Messdaten wurden an den Projektpartner Soitec für Auswertezwecke übermittelt.

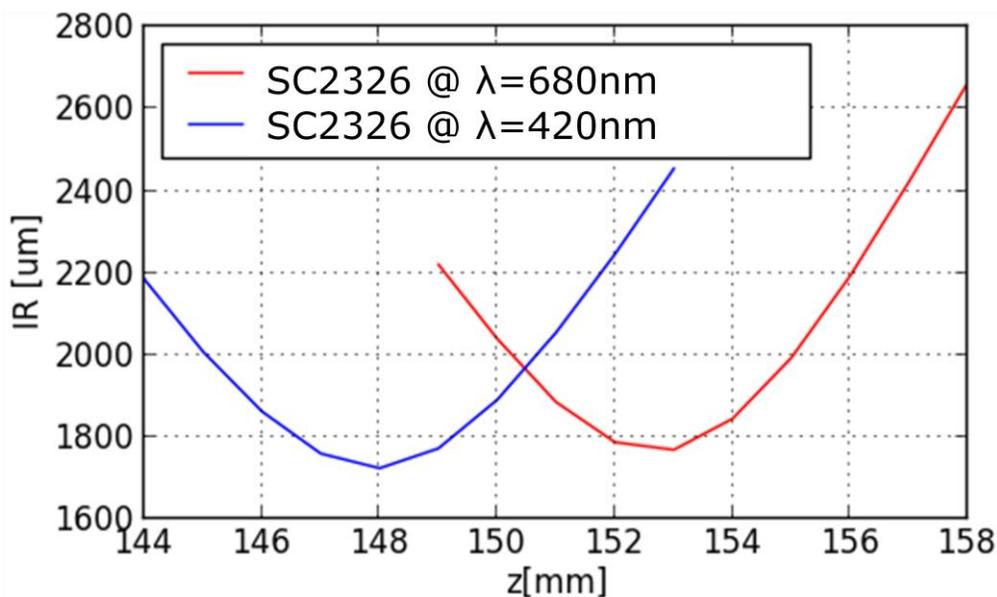


Abbildung 24 Messung der engsten Einschnürung einer SOG-Optik des Linsendesigns SC2326

<sup>2</sup> Der Interceptradius beschreibt die Kreisfläche, in der 95% der auf der gesamten Sensorfläche detektierten Lichtleistung konzentriert sind.

<sup>3</sup> ISE: IR=1,5-1,6mm @153mm | OFO: IR=1,7-1,8mm @153mm

Überdies wurden an dem Messplatz Voruntersuchungen zu dem im Projektantrag aufgeführten Erweiterungen durchgeführt, welche durch temporäre Nutzung eines Spektrometermesskopfes von einem anderen Messplatz sowie einer konventionellen Solarzelle ermöglicht wurden. Mit den beiden alternativen Messmethoden konnten jedoch vorerst keine Zusatzinformationen für die Qualitätssicherung abgeleitet werden, welche durch den vorinstallierten CCD-Sensor des Messplatzes nicht abgedeckt werden. Für die Vermessung wellenlängenabhängiger Effekte ist hingegen die Filtereinstellung der Beleuchtungseinheit, wie unter Abbildung 24 dargestellt, besser geeignet. Von der geplanten Erweiterung des Messplatzes mit den zusätzlichen Messoptionen wurde deshalb an dieser Stelle abgesehen.

Die weiterhin im Projektantrag aufgeführte Vorsatzoptik für die Koordinatenmessmaschine wurde aufgrund der sich abzeichnenden geringeren Relevanz nicht umgesetzt. Die Vorteile dieser Charakterisierungsmethode hätten nur im Zusammenspiel mit den bei Soitec durchgeführten Ausrichtmethoden der Modul-Bodenplatten zu einer Qualitätssteigerung geführt. Andere CPV-Hersteller haben an die optischen Abbildungseigenschaften des Linsenzentrums hingegen geringere Ansprüche.

### **SPC-Systeme zur Rückverfolgbarkeit und Echtzeitauswertung der Prozessparameter**

Um die Rückverfolgbarkeit der Prozessparameter zu steigern wurde die Vernetzung der Produktionsanlagen weiter vorangetrieben.

Es wurde ein Softwaremodul in C# entwickelt, welches die Prozessparameter der zentralen SPS einer automatisierten Produktionslinie ausliest und fortlaufend die Produktionsparameter in unterschiedlichen Detailtiefen abspeichern kann. Die dabei anfallenden großen Datenmengen können auch auf die wichtigsten Prozessparameter je Linienplatte zusammengefasst werden. Die Prozessparameter können dann anhand der zugeordneten Seriennummern den Qualitätsprüfungen, wie der Koordinatenmessung der Linsenzentren oder der ermittelten optischen Effizienz, zugeordnet werden. Dem Anlagenbediener können dadurch werkzeugbezogene Qualitätsmerkmale in Echtzeit zur Verfügung gestellt werden, was zeitnahe Korrekturingriffe erlaubt. Neben der verbesserten Rückverfolgbarkeit wurden somit auch Maßnahmen zur Prävention von Ausschuss implementiert. Beispielsweise lässt sich der Kantenversatz an den Vorrichtungsanschlüssen mit dieser Software zeitnah erkennen und ein etwaiger Drift der Eigenschaften der Produktionsanlagen in der Historie feststellen.

Überdies wurde eine weitere Software zur Erfassung der Ausschusskennzahlen entwickelt, welche in der Eingangskontrolle, während des Produktionsprozesses oder bei der abschließenden Messung bzw. visuellen Kontrolle Anwendung findet. Darauf basierend können Quoten für verschiedene Zeiträume, Materialien und Werkzeuge anhand verschiedener Fehlergruppen erstellt werden. Neben der Protokollierung findet durch die Software simultan eine Auswertung der Eingabedaten statt, welche dem Bediener beim Hinzufügen weiterer Ausschussteile das möglicherweise systematische Auftreten der Fehlergruppe anzeigt und so ggf. Serienfehler vermieden werden können.

## 4 Zusammenfassung

Im Verbundprojekt CPV-Magnus wird ein kostenreduziertes, hocheffizientes CPV-System unter Einbeziehung aller Komponenten (Tracker, Modul, Optik) entwickelt. Die wichtigsten CPV Komponentenhersteller der Industrie und Forschung in Deutschland sind als Projektpartner vertreten.

Für die Primäroptik erarbeitet die Firma ORAFOL Fresnel Optics (OFO) Konzepte zur Werkzeugherstellung und Charakterisierung von großflächigen Linsenparquets. Für verschiedene, vom Projektpartner Fraunhofer ISE bereitgestellte, optische Designkonzepte werden von OFO Werkzeugstempel und SOG-Primäroptiken hergestellt. Diese werden an einem eigens entwickelten Linsenmessplatz am ISE bewertet. Aus einem ausgewählten Linsendesign wird schließlich ein vollständiges Linsenparquet hergestellt und durch die Projektpartner in einem Prototypenmodul bewertet. Der erzielte Modulwirkungsgrad von 32% entspricht den Erwartungen.

Darüber hinaus werden von OFO erste Versuche für einen beschleunigten Werkzeugherstellungsprozess unternommen, welcher zudem eine Reduzierung des Störflankenwinkels zulässt und somit zu einer Leistungssteigerung im CPV-Modul beiträgt. Vom Projektpartner Soitec können gegenüber dem konventionellen Verfahren Leistungssteigerungen um bis zu 3% im CPV-Modul festgestellt werden.

In der Herstellung der Linsenplatten werden neue Komponenten, wie antireflexbeschichtetes Glas und schneller härtende Silikonsysteme, eingesetzt und deren Langlebigkeit in beschleunigten Alterungs- und Reinigungstests nachgewiesen. Darüber hinaus werden Verfahren zur Materialeinsparung der Linsenplattenkomponenten Glas und Silikon getestet und bewertet. Neu entwickelte Softwarelösungen für die Verwaltung und Herstellung von Werkzeugen und SOG-Linsenplatten tragen zur Qualitätssicherung der Primäroptik bei.

## 5 Literaturverzeichnis

Hornung, T. a. (2010). Temperature Dependent Measurement And Simulation Of Fresnel Lenses For Concentrating Photovoltaics. *AIP Conference Proceedings*, (pp. 85-88). Freiburg.

S. van Riesen, M. N. (2015). New module design with 4-junction solar cells for high. *1679: p. 100006*. AIP Conference Proceedings.

Steiner, M. B. (2015). *FLATCON® CPV module with 36.7% efficiency equipped with four-junction solar cells*. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 23: 1323–1329. doi: 10.1002/pip.2568.

Thorsten Hornung, P. N. (2014). Optical Loss Due To Diffraction By Concentrator Fresnel. *AIP Conf. Proc. 1616, 63 (2014)* (p. 5). Albuquerque, New Mexico, USA : AIP Publishing.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel  Verbundvorhaben: CPV-Systeme mit hocheffizienten und installationsfreundlichen Modulen – Teilprojekt: Entwicklung von Werkzeugen und Optimierung von Linsenplattenkomponenten sowie Charakterisierung von großflächigen Linsenparquets	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Blechschmidt, Christian Gäbler, Stefan Traxdorf, Rico Zosel, Jürgen Bitzer, Hans-Martin	5. Abschlussdatum des Vorhabens Dezember 2015
	6. Veröffentlichungsdatum -
	7. Form der Publikation -
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  ORAFOL Fresnel Optics GmbH Flurstedter Marktweg 13 99510 Apolda	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen 0325485B
	11. Seitenzahl 35
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 4
	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 24
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -	
18. Kurzfassung ORAFOL Fresnel Optics entwickelt Konzepte zur Werkzeugherstellung und Charakterisierung von großflächigen Linsenparquets. Unterschiedliche Designansätze werden in Werkzeugstempeln bzw. CPV-Primäroptiken umgesetzt und evaluiert. Aus einem ausgewählten Linsendesign wird schließlich ein vollständiges Linsenparquet hergestellt und durch die Projektpartner in einem Prototypenmodul bewertet. Der erzielte Modulwirkungsgrad von 32% entspricht den Erwartungen. Überdies wird ein beschleunigter Werkzeugherstellungsprozess untersucht, welcher zudem eine Reduzierung des Störflankenwinkels zulässt und somit zu einer Leistungssteigerung im CPV-Modul beiträgt. Vom Projektpartner Soitec können gegenüber dem konventionellen Herstellverfahren Leistungssteigerungen von 3% im CPV-Modul festgestellt werden. Außerdem werden in der Herstellung der Linsenplatten neue Komponenten, wie antireflexbeschichtetes Glas und schneller härtende Silikonsysteme, eingesetzt und deren Langlebigkeit in beschleunigten Alterungs- und Reinigungstests nachgewiesen. Darüber hinaus werden Verfahren zur Materialeinsparung untersucht. Neu entwickelte Softwarelösungen für die Verwaltung und Herstellung von Werkzeugen und SOG-Linsenplatten tragen zur Qualitätssicherung der Primäroptik bei.	
19. Schlagwörter Konzentrator-Photovoltaik (CPV), Silicone-on-Glass (SOG), Fresnel-Linse, Linsenarray, optische Effizienz	
20. Verlag -	21. Preis -