

SunOyster Systems GmbH

Hoch-Temperaturreceiver für konzentrierende Photovoltaik und Solarthermie (HOT-KPVST)

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem
Aktenzeichen 31713 – 24/2 der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. Carsten Corino

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Az **31713-24/2**Referat **24**Fördersumme **149.162**

Antragstitel **Hochtemperaturreceiver für konzentrierende Photovoltaik und Solarthermie (HOT-KPVST)**

Stichworte Hybrider Receiver, solare Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), Verbindung der besten Aspekte aus CSP, CPV und PV, Multi-Junction Konzentrazorzellen, Wärmeträgerrohr, Lichtfallen, Linsen, Borosilikat-Glasrohr, Edelstahlkompensator

| Laufzeit | Projektbeginn | Projektende | Projektphase(n) |
|------------------|------------------|-------------------|---------------------------------|
| 18 Monate | 28.4.2015 | 30.10.2016 | 2, hier die zweite Phase |

Zwischenberichte Vom 31.12.2015 und 8.7.2016

Bewilligungsempfänger SunOyster Systems GmbH
Poststr. 46
25469 Halstenbek

Tel 04101 808767

Fax 04101 587853

Projektleitung:
Roy Ehlers

Bearbeiter
Kai Deponte, Stephan Ulrich,
Siegfried Zipfel, Christoph
Prah, Dr. Oliver Lang, Marko
Suka

Kooperationspartner
Keine, nur Auftragnehmer.

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Ziel des vorliegenden Projektes ist es, den *Empfänger (Receiver)* für eine konzentrierende Solartechnologie zur Kraft-Wärme-Kopplung mit überlegenen Eigenschaften zu entwickeln: Der elektrische Wirkungsgrad der SunOyster soll wie bei den besten konzentrierenden Photovoltaik-Anlagen (CPV) 30% betragen. Der gleichzeitig zu erreichende thermische Wirkungsgrad soll 45% erreichen, so dass sich der Gesamtwirkungsgrad auf 75% beläuft. Im Receiver sollen bis zu 200° C (Zell-)Temperatur erreicht werden und dieser soll zum Schutz vor Wärmeverlusten mit einem evakuierten Glasrohr umhüllt werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Auf der Basis der Patentanmeldung PCT/EP2014/052359 und der Arbeiten in Phase I wurde der Receiver getestet und wurden kritische Teile neu entwickelt bzw. verbessert:

- Zum Testen des HOT Receivers wurden zwei Testplattformen aufgebaut: Eine komplette SunOyster mit der Arbeitsbezeichnung „Lucy“ mit einem 4 m breiten Spiegel und automatischer Nachführung sowie ein Handspiegel mit 1,33 m Breite und manueller Nachführung.
- Wesentliches Instrument zur Vermessung der Optik waren Flussdichtemessungen, die federführend von dem freien Mitarbeiter Christoph Prah (DLR) durchgeführt wurden. Hiermit wurde ermittelt, welche Anteile der Sonnenstrahlung auf welche Zielfläche konzentriert wurden.
- Entscheidend ist jedoch, welche elektrischen Leistungen durch die konzentrierte Strahlung erzeugt werden. Hierfür wurden mit einer elektronischen Senke die Spannungen und Ströme vermessen.-
- Begleitend wurden eine Vielzahl anderer Messungen vorgenommen, z.B. Temperaturmessungen der

Bauteile, auch mit Infrarotkameras.

- Ferner wurde softwaregestützt eine zentrale Komponente des Receivers zweimal neu entwickelt, einmal mit dem Fraunhofer ISE und abschließend mit Dr. Ralf Leutz: Die Linse der Sekundärkonzentration.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

Ergebnisse und Diskussion

Die allermeisten Komponenten, die in Phase I entwickelt wurden, haben sich im Grundsatz bewährt. Eine zentrale Komponente musste jedoch neu entwickelt werden, und teilweise konnten Verbesserungen der Komponente im Detail erreicht werden:

Da die erste von Opsira entwickelte und von Auer Lighting gepresste Linse eine optische Effizienz von deutlich unter 50% hatte, musste eine neue Linse entwickelt werden. Dies hat das Fraunhofer ISE übernommen und eine weitere Freiformlinse mit Fresnel-Stufe entwickelt. Obwohl die Fertigung durch First Glass diesmal fehlerfrei war, lagen auch hier die optischen Wirkungsgrade nur um die 50% anstelle der erhofften 75%. Nach unserer Ansicht wurden die Spiegeldaten nicht richtig berücksichtigt, wonach die von den industriell gefertigten Spiegeln reflektierte Strahlung eine erhebliche Standardabweichung vor allem in der waagerechten Konzentrationsrichtung aufweist.

Deshalb musste noch eine dritte Linse entwickelt werden, wofür der Linsenexperte Dr. Ralf Leutz hinzugezogen wurde. Innerhalb von zwei Wochen entwickelten wir den sog. „**SunOyster Crystal**“. Dabei handelt es sich um eine zusammengesetzte Linse mit einer konvexen zylinderförmigen Apertur zur Bündelung der Strahlung und einer umgekehrten trunkierten Pyramide, welche die Strahlen nach dem Prinzip der Totalreflexion auf die Zellen konzentriert. Die im bayerischen Wald innerhalb einer Woche handgeschliffenen Linsen erreichten erstmals etwa 30% elektrischen Wirkungsgrad und erfüllten damit die Erwartungen. Für den SunOyster Crystal wurde ein Gebrauchsmuster angemeldet. Die Zahl der Linsen im Receiver steigt von 60 auf 84. Dies hat den positiven Nebeneffekt, dass durch die entsprechend erhöhte Zahl der zugeordneten und in Serie geschalteten Zellen auch die Spannung steigt. Allerdings: Mit der gepressten Glaslinse werden die Werte noch nicht stabil erreicht, so dass weitere Optimierungen erforderlich sind.

Für die anderen Komponenten gilt:

Das Wärmeträgerrohr aus extrudiertem Aluminium hat sich bewährt und kann in seiner Form im Einzelnen ohne weiteres an leichte Änderungen anderer Komponenten angepasst werden.

Die Zellenassemblies haben sich bewährt, wobei die Zahl der Zellen pro Assembly von 8 auf nur noch 5 reduziert wird. Alternativ könnte man auch eine längliche Zelle auf das DCB auflöten. Um den Herstellungsprozess beim Lieferanten Azurspace rationeller zu gestalten, sollen die elektrischen Kontakte nunmehr gebondet werden. Dies bedingt, dass die elektrischen Kontakte der Zellenassemblies untereinander mit Hilfe von kleinen Kupferfahnen hergestellt werden, die zunächst flach auf dem Zellenassembly liegen und erst nach dem Bonding-Prozess aufgerichtet werden.

Die Zellenassemblies können wie bisher durch Federn an das Wärmeträgerrohr angepresst werden. Wir haben aber auch ein Verfahren entwickelt, wie die Zellenassemblies mit selbstschneidenden Schrauben in Nuten im Aluprofil spanfrei verschraubt werden können, um einen höheren Anpressdruck und damit noch besseren Wärmeübergang zu erreichen.

Die Receiver-Hülle hat sich überwiegend bewährt. Dies gilt ohne Abstriche für das von da Fa. Zettl mit einer Antireflex-Beschichtung versehene Borosilikat-Glasrohr mit 125 mm Außendurchmesser. Bei den Kompensatoren können wir noch eine Verbesserung in der Form realisieren, dass alle elektrischen Durchführungen – für die Leistungskabel ebenso wie für einen neuen Temperaturschalter auf dem Receiver-Rohr – preiswerter auf einer Seite des Receivers in der Nähe des Schaltkastens untergebracht werden. Mit Einschränkungen gilt es für die Verklebung der Kompensatoren auf dem Glasrohr. Der anfänglich allein verwendete Silikonkleber ließ zu viel Diffusion von Wasserdampf durch die Verklebung zu. Dies wurde in einem ersten Schritt durch eine Versiegelung mit dem recht diffusionsdichten Vakuumtechnischen Kunststoff Viton reduziert. In einem zweiten Schritt wurde auch noch eine Metalldichtung zwischen den beiden Klebern eingeführt.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Ergebnisse der Entwicklung sowie die Förderung durch die DBU wurden auf diversen Konferenzen, etwa dem Neujahrsempfang des Bundesverbands Erneuerbare Energien sowie dem EcoSummit (jeweils in Berlin), auf Messen (Hannover Messe, REI Delhi) sowie auf der Website www.sunoyster.com und in je einer Pressemeldung zur Förderzusage und zum technischen Durchbruch präsentiert.

Fazit

Mit dem errechneten etwa 75prozentigen optischen Wirkungsgrad des SunOyster Crystal und dem teilweise gemessenen etwa 30prozentigen elektrischen Wirkungsgrad und der Umwandlung fast der gesamten restlichen Energie in Wärme wird zugleich auch das Ziel eines etwa 45prozentigen thermischen Wirkungsgrades erreicht. Die Hauptziele der Entwicklung wurden somit bei einigen Messungen erreicht. Bei dem Temperaturniveau wurde früh eine Einschränkung auf 170°C vorgenommen, um ausreichende Sicherheitsabstände zur Schmelztemperatur des verwendeten Lots zu haben. Mit ihrer hohen Effizienz und niedrigen Komponentenkosten hat die SunOyster-Technologie gute Chancen, in der Zukunft einen relevanten Anteil am Solarmarkt zu erringen.

SunOyster Systems GmbH bedankt sich herzlich für Förderung durch die DBU, die es ermöglicht hat, dass nunmehr die technischen Voraussetzungen geschaffen wurden, eine Vorserie der SunOyster mit dem neuen HOT-Receiver auszustatten.

Bis zur Serienproduktion des HOT-Receivers werden allerdings noch weitere Arbeiten im Bereich der Prüfung, Zertifizierung und Fertigungstechnik erforderlich sein.

Inhaltsübersicht

| | |
|---|-----------|
| Titelblatt | 1 |
| Projektkennblatt | 2 |
| Inhaltsübersicht | 6 |
| Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen und Tabellen, Abkürzungen..... | 7 |
| I. Zusammenfassung | 9 |
| II. Einleitung | 11 |
| III. Hauptteil | 13 |
| 1. <i>Testplattformen</i> | 13 |
| a) Mit automatischem Tracking | 13 |
| b) Mit manuellem Tracking | 15 |
| 2. <i>Linse</i> | 16 |
| a) Opsira-Linse | 16 |
| b) Linse des Fraunhofer ISE | 26 |
| c) Dritte Linsengeneration: SunOyster Crystal | 30 |
| 3. <i>Wärmeträger-Rohr</i> | 34 |
| a) Bilder des Wärmeträger-Rohres..... | 34 |
| b) Klemmung des Zellasemblies auf dem Wärmeträger-Rohr..... | 34 |
| c) Durchbiegung des Wärmeträger-Rohres..... | 36 |
| d) Bearbeitung des Rohres | 38 |
| e) Wärmeleitschicht | 38 |
| 4. <i>Zellaassembly</i> | 39 |
| a) Verbindung von Zellasemblies..... | 39 |
| b) Bypass-Diode | 40 |
| c) Temperaturkoeffizient und – beständigkeit der Zellen..... | 42 |
| d) Form bzw. Fläche der Zellen..... | 46 |
| e) Leistungsverlust durch Potentialausgleich..... | 47 |
| f) Kommerzielle Perspektiven..... | 48 |
| 5. <i>Lichtfalle/ Befestigung der Linse</i> | 50 |
| a) Bau und Test | 50 |
| b) Montagefreundlichkeit | 52 |
| c) Befestigung des Crystals | 52 |
| 6. <i>Hüllrohr, Verschlusskappe und Füllung</i> | 54 |
| a) Transmission Glashüllrohr..... | 54 |
| b) Testergebnisse und Weiterentwicklung der Kappe..... | 55 |
| c) Füllung des Glashüllrohres..... | 59 |
| 7. <i>Überlegungen zur Fertigung des HOT-Receivers</i> | 61 |
| 8. <i>Ökologische Bewertung der Vorhabensergebnisse</i> | 54 |
| 9. <i>Schutz des geistigen Eigentums</i> | 65 |
| 10. <i>Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung</i> | 65 |
| IV. Fazit | 66 |

| | |
|-------------------------------|----|
| Literaturverzeichnis | 68 |
| Verzeichnis der Anhänge | 70 |

Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen

| | |
|--|----|
| <i>Abb. 1: HOT Receiver in Halstenbek in Betrieb</i> | 11 |
| <i>Abb. 2: CAD-Zeichnung von zwei Zellassemblies</i> | 12 |
| <i>Abb. 2a: CAD-Schnitt durch den Receiver Stand April 2017</i> | 12 |
| <i>Abb. 3: Foto der SunOyster Testplattform Lucy</i> | 14 |
| <i>Abb. 4: Darstellungen zur Fokusabweichung der Spiegel</i> | 15 |
| <i>Abb. 5: Foto des Handspiegels</i> | 16 |
| <i>Abb. 6: Messergebnisse der Rückseite der Auer-Linse</i> | 17 |
| <i>Abb. 7: Strahlenbild der Auer-Linse nach dem Pressen</i> | 17 |
| <i>Abb. 8: Bild der Abweichung der Auer-Linse (Rückseite)</i> | 18 |
| <i>Abb. 9: Strahlenbild der Auer-Linse nach der Feuer-Politur</i> | 18 |
| <i>Abb. 10: Bild der Abweichung der Auer-Linse (Vorderseite)</i> | 19 |
| <i>Abb. 11: Thermographie der Receiverkomponenten</i> | 20 |
| <i>Abb. 12: Foto der Linse mit Zessassembly</i> | 21 |
| <i>Abb. 13: Foto des Testreceivers in der Fokuslinie</i> | 22 |
| <i>Abb. 14: Auswertung der Leistung auf dem Receiver</i> | 23 |
| <i>Abb. 15: Auswertung der Leistung auf der Zellfläche</i> | 23 |
| <i>Abb. 16: Auswertung der Leistung neben der Zellfläche</i> | 24 |
| <i>Abb. 17: Fotos des Zellassemblies mit einer Sonne</i> | 25 |
| <i>Abb. 18: U-I-Diagramm der Opsira-Linse mit Zellassembly</i> | 26 |
| <i>Abb. 19: CAD der ISE-Linse</i> | 26 |
| <i>Abb. 20: Darstellung opt. Effizienz und Akzeptanzwinkel (Azimut)</i> | 27 |
| <i>Abb. 21: Darstellung opt. Effizienz und Akzeptanzwinkel (Elevation)</i> | 27 |
| <i>Abb. 22: Flussdichteauswertung ISE-Linse bei 1354x</i> | 28 |
| <i>Abb. 23: Flussdichteauswertung ISE-Linse bei 541x</i> | 28 |
| <i>Abb. 24: U-I-Kurve der ISE-Linse mit Zellassembly</i> | 29 |
| <i>Abb. 25: Foto eines Raytracing mit der ISE-Linse</i> | 29 |
| <i>Abb. 26: Foto des kleinen und großen Sunoyster Crystals</i> | 30 |
| <i>Abb. 26a: Foto des SunOyster Crystal (Schulze-Alex)</i> | 31 |
| <i>Abb. 26b: Foto der drei Linsengenerationen (Schulze-Alex)</i> | 31 |
| <i>Abb. 26c: Foto der in das Glasrohr eingebauten Linse</i> | 32 |
| <i>Abb. 26d: Interzept ohne Azimut- und Elevationsfehler</i> | 32 |
| <i>Abb. 26d: Interzept bei Azimutfehler</i> | 33 |
| <i>Abb. 26e: Interzept bei Elevationsfehler</i> | 33 |
| <i>Abb. 27: Foto des Aluminiumrohres</i> | 34 |
| <i>Abb. 28: Foto des Zellassemblies mit Edelstahlklammer</i> | 35 |
| <i>Abb. 29: Ergebnisse der Temperaturmessung im Receiver</i> | 35 |

| | | |
|---|-------|----|
| <i>Abb. 30: Foto des Abstandshalters in Form einer Kreisscheibe</i> | ..... | 37 |
| <i>Abb. 31: Infrarotbild der erwärmten Zellassemblies</i> | ..... | 39 |
| <i>Abb. 32: CAD-Zeichnung Zellassemblies mit Verbinder</i> | ..... | 40 |
| <i>Abb. 33: Foto des Zellassemblies mit Bypass-Dioden</i> | ..... | 41 |
| <i>Tab. 1: Temperaturkoeffizienten der Zellassemblies (Suka)</i> | ..... | 42 |
| <i>Abb. 34: Diagramm der Temperaturentwicklung</i> | ..... | 43 |
| <i>Abb. 35: Messergebnisse der Temperaturkoeffizienten (SOS)</i> | ..... | 44 |
| <i>Abb. 36: Temperaturkoeffizient von Zellen (Siefer)</i> | ..... | 44 |
| <i>Abb. 37: Temperaturabhängigkeit der Spannungen (Helmers)</i> | ..... | 45 |
| <i>Abb. 38: Foto der Strahlungsverteilung auf dem Zellassembly</i> | ..... | 47 |
| <i>Tab. 2: Preise für Zellassemblies</i> | ..... | 48 |
| <i>Tab. 3: Theoretische Lernkurve für Kosten von Zellassemblies</i> | ..... | 49 |
| <i>Abb. 39: Foto der Lichtfalle</i> | ..... | 50 |
| <i>Abb. 40: CAD der Lichtfalle</i> | ..... | 51 |
| <i>Abb. 41: Fotos von Lichtfallen mit unterschiedlicher Ausrichtung</i> | ..... | 51 |
| <i>Abb. 42: Mikroskopische Bilder von Plasmaätzung</i> | ..... | 53 |
| <i>Abb. 43: CAD-Zeichnung der Befestigung des SunOyster Crystal</i> | ..... | 54 |
| <i>Abb. 44: Messkurve der Transmission durch das Glashüllrohr</i> | ..... | 54 |
| <i>Abb. 45: Foto von Kompensatoren</i> | ..... | 55 |
| <i>Abb. 46: Fotos von Helium Lecktests (Polo Italia)</i> | ..... | 56 |
| <i>Tab. 4: Messergebnisse zur relativen Luftfeuchtigkeit</i> | ..... | 57 |
| <i>Abb. 47: Messkurve der relativen Luftfeuchte über ein Jahr</i> | ..... | 58 |
| <i>Abb. 48: Darstellung der Paschen-Kurve (wikipedia)</i> | ..... | 60 |
| <i>Abb. 49: Foto der Edelstahl-Schablone für Zellassemblies</i> | ..... | 61 |
| <i>Abb. 50: Folie zum Ablauf der manuellen Receiver-Produktion</i> | ..... | 62 |
| <i>Tab. 5: Production Equipment for a Manual 50 MW production</i> | ..... | 62 |
| <i>Abb. 51: Schema zur automatisierten Receiver-Produktion</i> | ..... | 64 |
| <i>Abb. 52: Folie zum geographischen Umfang der Patentanmeldung</i> | ..... | 65 |
| <i>Tab. 6: Übersicht über die Erreichung der Entwicklungsziele</i> | ..... | 66 |

Für **Abkürzungen** wird zunächst auf den Duden verwiesen.

Weitere Abkürzungen:

HOT-Receiver - HOchTemperatur-Receiver

SOS - SunOyster Systems GmbH

Zusammenfassung

Die allermeisten Komponenten, die in Phase I entwickelt wurden, haben sich im Grundsatz bewährt. Eine zentrale Komponente musste jedoch neu entwickelt werden, und teilweise konnten Verbesserungen der Komponente im Detail erreicht werden:

Da die erste von Opsira entwickelte und von Auer Lighting gepresste Linse eine optische Effizienz von deutlich unter 50% hatte, musste eine neue Linse entwickelt werden. Dies hat das Fraunhofer ISE übernommen und eine weitere Freiformlinse mit Fresnel-Stufe entwickelt. Obwohl die Fertigung durch First Glass diesmal fehlerfrei war, lagen auch hier die optischen Wirkungsgrade nur um die 50% anstelle der erhofften 75%. Nach unserer Ansicht wurden die Spiegeldaten nicht richtig berücksichtigt, wonach die von den industriell gefertigten Spiegeln reflektierte Strahlung eine erhebliche Standardabweichung vor allem in der waagerechten Konzentrationsrichtung aufweist.

Deshalb musste noch eine dritte Linse entwickelt werden, wofür der Linsenexperte Dr. Ralf Leutz hinzugezogen wurde. Innerhalb von zwei Wochen entwickelten wir den sog. „SunOyster Crystal“. Dabei handelt es sich um eine zusammengesetzte Linse mit einer konvexen zylinderförmigen Apertur zur Bündelung der Strahlung und einer umgekehrten trunkierten Pyramide, welche die Strahlen nach dem Prinzip der Totalreflexion auf die Zellen konzentriert. Die im bayerischen Wald innerhalb einer Woche handgeschliffenen Linsen erreichten erstmals etwa 30% elektrischen Wirkungsgrad und erfüllten damit die Erwartungen. Für den SunOyster Crystal wurde ein Gebrauchsmuster angemeldet. Die Zahl der Linsen im Receiver steigt von 60 auf 84. Dies hat den positiven Nebeneffekt, dass durch die entsprechend erhöhte Zahl der zugeordneten und in Serie geschalteten Zellenassemblies auch die Spannung steigt. Allerdings: Mit der gepressten Glaslinse werden die Werte noch nicht stabil erreicht, so dass weitere Optimierungen erforderlich sind.

Für die anderen Komponenten gilt:

Das Wärmeträgerrohr aus extrudiertem Aluminium hat sich bewährt und kann in seiner Form im Einzelnen ohne weiteres an leichte Änderungen anderer Komponenten angepasst werden.

Die Zellenassemblies haben sich bewährt, wobei die Zahl der Zellen pro Assembly von 8 auf nur noch 5 reduziert wird. Alternativ könnte man auch eine längliche Zelle auf das DCB auflöten. Um den Herstellungsprozess beim Lieferanten Azurspace rationeller zu gestalten, sollen die elektrischen Kontakte nunmehr gebondet werden. Dies bedingt, dass die elektrischen Kontakte der Zellenassemblies untereinander mit Hilfe von kleinen Kupferfahnen hergestellt werden, die zunächst flach auf dem Zellenassembly liegen und erst nach dem Bonding-Prozess aufgerichtet werden.

Die Zellenassemblies können wie bisher durch Federn an das Wärmeträgerrohr angepresst werden. Wir haben aber auch ein Verfahren entwickelt, wie die Zellenassemblies mit selbstschneidenden Schrauben in Nuten im Aluprofil spanfrei verschraubt werden können, um einen höheren Anpressdruck und damit noch besseren Wärmeübergang zu erreichen.

Die Receiver-Hülle hat sich überwiegend bewährt. Dies gilt ohne Abstriche für das von da Fa. Zettl mit einer Antireflex-Beschichtung versehene Borosilikat-Glasrohr mit 125 mm Außendurchmesser. Bei den Kompensatoren können wir noch eine Verbesserung in der Form realisieren, dass alle elektrischen Durchführungen – für die Leistungskabel ebenso wie für einen neuen Temperaturschalter auf dem Receiver-Rohr – preiswerter auf einer Seite des Receivers in der Nähe des Schaltkastens untergebracht werden. Mit Einschränkungen gilt es für die Verklebung der Kompensatoren auf dem Glasrohr. Der anfänglich allein verwendete Silikonkleber ließ zu viel Diffusion von Wasserdampf durch die Verklebung zu. Dies wurde in einem ersten Schritt durch eine Versiegelung mit dem recht diffusionsdichten Vakuumtechnischen Kunststoff Viton reduziert. In einem zweiten Schritt wurde auch noch eine Metaldichtung zwischen den beiden Klebern eingeführt.

I. Einleitung



Abb. 1: Folie aus SunOyster-Präsentation: HOT Receiver in Halstenbek in Betrieb; Hinweis auf Förderung durch DBU.

In Phase I des Projektes wurde folgende Gesamtkonstruktion des Receivers (Darstellung ohne seitliche Lichtfalle und Glashüllrohr) zur Kogeneration von Strom und Wärme entwickelt und teilweise bereits gebaut:

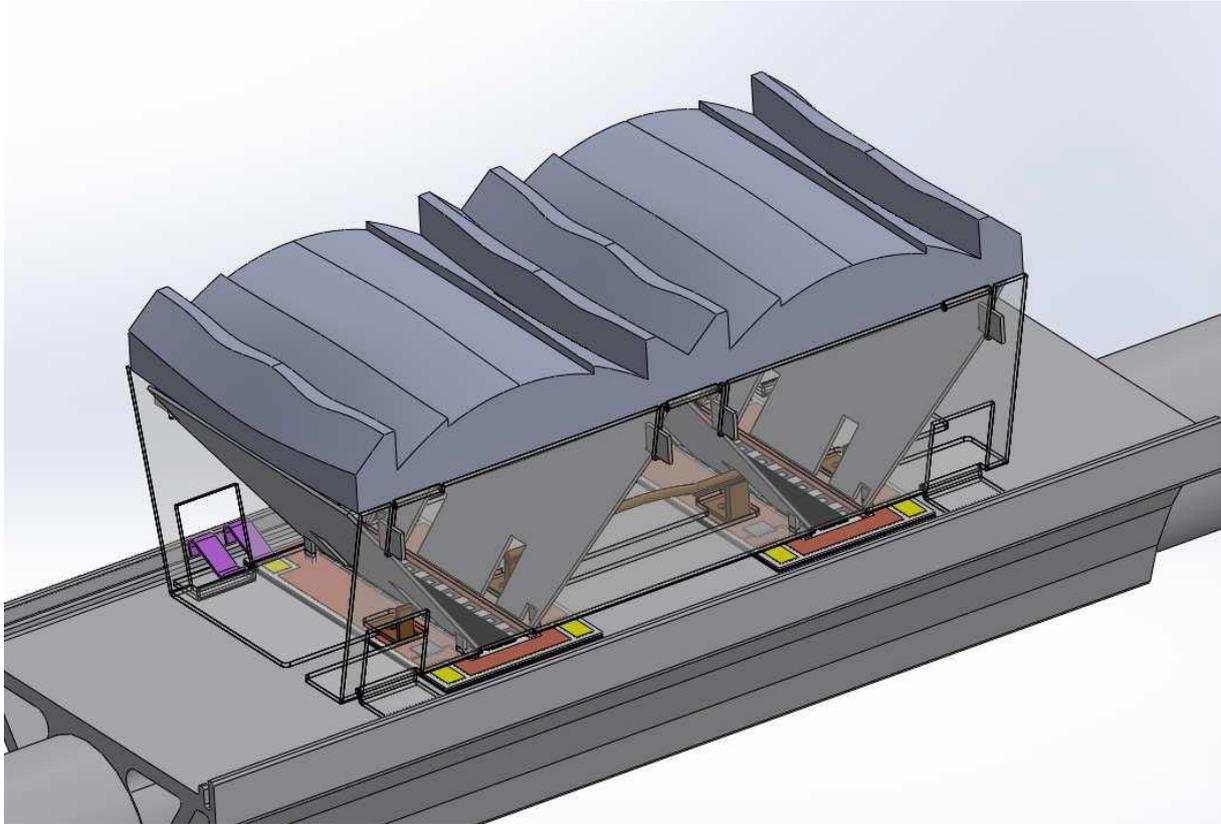


Abb. 2: 3D CAD-Zeichnung von zwei Zellenassemblies auf dem Wärmeträgerrohr mit seitlicher Lichtfalle und Doppellinse, ohne untere Lichtfalle und Glashüllrohr (SOS) zum Ende der Phase I

In der vorliegenden Phase II wurde nicht nur der Bau der Prototypen abgeschlossen. Vor allem ging es darum, die Komponenten des Receivers sowie den Receiver insgesamt zu testen und weiter zu verbessern. Am Ende der zweiten Phase sieht das Design im Schnitt mit Einzeichnung von Strom (gelb) und Wärme (von blau nach rot) folgendermaßen aus:

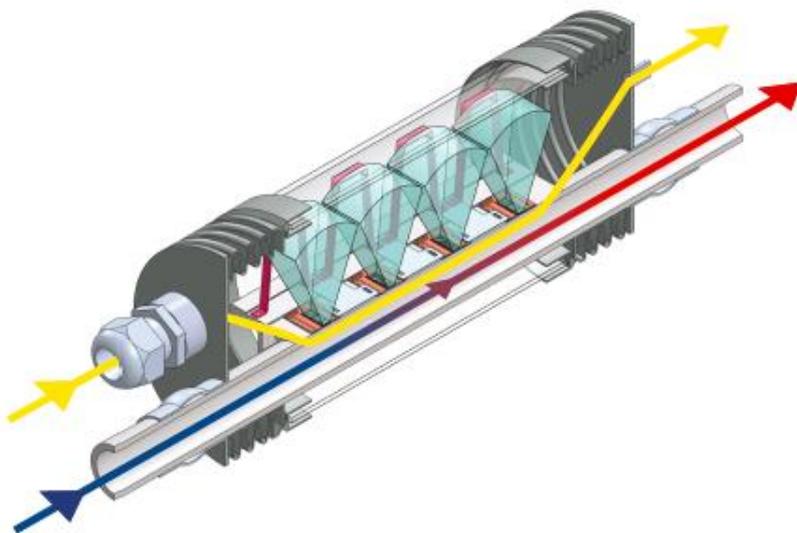


Abb. 2 a: CAD-Schnitt durch Receiver Stand April 2017

Hierfür war es erforderlich, eine Testplattform mit hochwertiger Fokuslinie und automatischer Sonnennachführung zu bauen. Zur Beschleunigung der Tests wurde auch noch ein Handspiegel gebaut (siehe dazu nachfolgend III. 1). Anschließend werden die wesentlichen Komponenten Linse (III.2.), Wärmeträgerrohr (3.), Zelleassembly (4.), und Receiverhülle (5.) eingegangen. Anschließend werden Überlegungen zur Fertigung angestellt (6.), bevor auf Umweltaspekte (7.) eingegangen wird. Den Abschluss bilden der Schutz geistigen Eigentums (8.) und die Verbreitung der Vorhabensergebnisse (9.).

II. Hauptteil

1. Testplattformen

a) Mit automatischem Tracking

Die Testplattform mit automatischem Tracking ist eine SunOyster, die in Ihrer Entwicklung zwischen der Nullserie und der Vorserie der SunOyster-Technologie steht. Sie ist nach dem bekannten Fund eines Frühmenschen (australopithecus afarensis) „Lucy“ genannt. Konstrukteur ist Siegfried Zipfel, gebaut wurde die Maschine von Stephan Ulrich und die Elektrik und Steuerung verantwortet Roy Ehlers.



Abb. 3: Foto der SunOyster Testplattform „Lucy“ in Halstenbek, aufgenommen von einer Drohne, mit dem Projektmitarbeitern (von oben links: Werkstattdirektor Stephan Ulrich, Projektleiter Roy Ehlers, Konstrukteur Siegfried Zipfel, Geschäftsführer Carsten Corino, Praktikant Michael Adam)

Die SunOyster Testplattform weist gegenüber der zwei Jahre älteren vorhergehenden Anlagengeneration folgende Änderungen auf:

- Verwendung von **Dickglasspiegeln** anstelle der vorherigen Dünnlasspiegel mit Sandwichkonstruktion. Die Dickglasspiegel sind mit gut 10 kg pro m² Spiegelfläche zwar deutlich schwerer als ihre Vorgänger, dafür aber auch robuster. Während bei dem Dünnlasspiegel eifersüchtige Vogelmännchen für punktförmige Schäden sorgen, übersteht das Dickglas Vogelunfälle unbeschadet. Die Befestigung der Spiegel mit Keramikpads sorgt für einen guten Wasserabfluss und Sauberkeit auf der Spiegelseite.

Die optische Qualität der Spiegel wurde von unserem Spiegelexperten Christoph Prah (DLR – Plataforma Solar) mit der Methode der Nahbereichsphotogrammetrie vermessen: Dabei werden markante Punkte mit runden, retro-reflektierenden Aufklebern markiert. Bilder aus vielen Perspektiven ergeben 3D Koordinaten mit einer Genauigkeit besser als 0,5 mm. Die Spiegelkoordinaten werden mit der Idealparabel hinsichtlich

Höhenabweichung, Abweichung der Spiegelsteigung und Fokusabweichung verglichen. Für das Beispiel des hinteren Spiegels ergab dies folgende Ergebnisse für den Fokus, in denen Christoph Prahl nach Elimination einiger Pionierfehler das Potential für einen sehr guten Primärkonzentrator sieht:

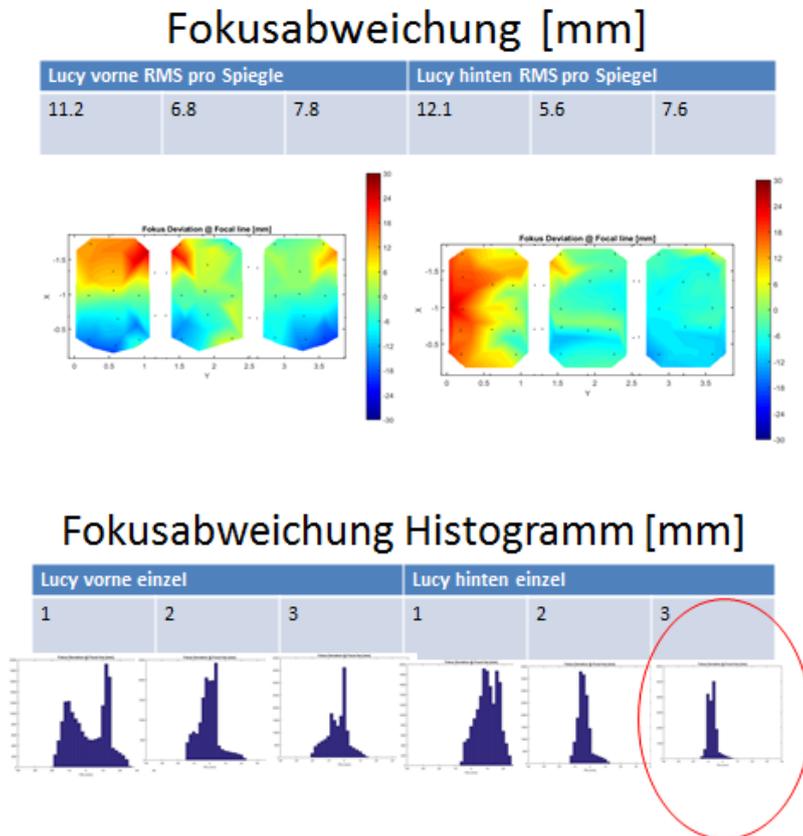


Abb. 4: Darstellungen zur Fokusabweichung der Lucy-Spiegel

- Während die Vorgängermodelle nur etwa minütlich und dann sehr grob nachgeführt haben, trackt Lucy im Rhythmus weniger Sekunden sehr fein und sorgt für eine deutlich **exaktere Nachführung**.
- Weitere Verbesserungen wie etwa eine kompaktere **Bauweise der Thermierohre** zwischen SunOyster und Substruktur haben keine größere Relevanz für den Receiver und brauchen hier nicht näher thematisiert werden.

b) Mit manuellem Tracking

Daneben wurde ein Handspiegel gebaut, der sehr schnelle Messungen in den oft nur kurzen Sonnenphasen am Teststandort Hamburg erlaubte. Er verfügt über eine manuell-elektrische Verstellung der Elevation und wird manuell nachgeführt. Der Receiver wird mit Hilfe von kaltem Wasser und einer Umwälzpumpe gekühlt.



Abb. 5: Foto des Handspiegels in älterer Konfiguration vor der SunOyster-Werkstatt in Halstenbek

2. Linse

Wegen der Probleme und ihrer zentralen Bedeutung für die Arbeiten in Phase II soll nunmehr von allen Komponenten des Receivers die Linse an die erste Stelle gestellt werden. Dabei wird zunächst auf die Untersuchung der von Opsira entworfenen Linse eingegangen (a), anschließend auf die zweite Linsengeneration des Fraunhofer ISE (b) und schließlich auf die dritte Generation, die mit Dr. Ralf Leutz entwickelt wurde (c).

a) Opsira-Linse

Die Form der Opsira-Linse – eine Freiform-Linse mit Fresnel-Stufen – ist bereits im Abschlussbericht zu Phase I dargestellt worden.

aa) Fertigungsprobleme von Auer Lighting

Die Linse von Opsira ist bei dem Hersteller Auer Lighting hergestellt worden. Dort ist das Glas bei 1.300 Grad in der Form in einer Weise ausgekühlt, dass sich auf der sonnenabgewandten Seite viele Fließwellen gebildet haben. Dies wurde durch eine anschließende Feuerpolitur der Linsen abgemildert. Die Form der Linse blieb aber suboptimal.

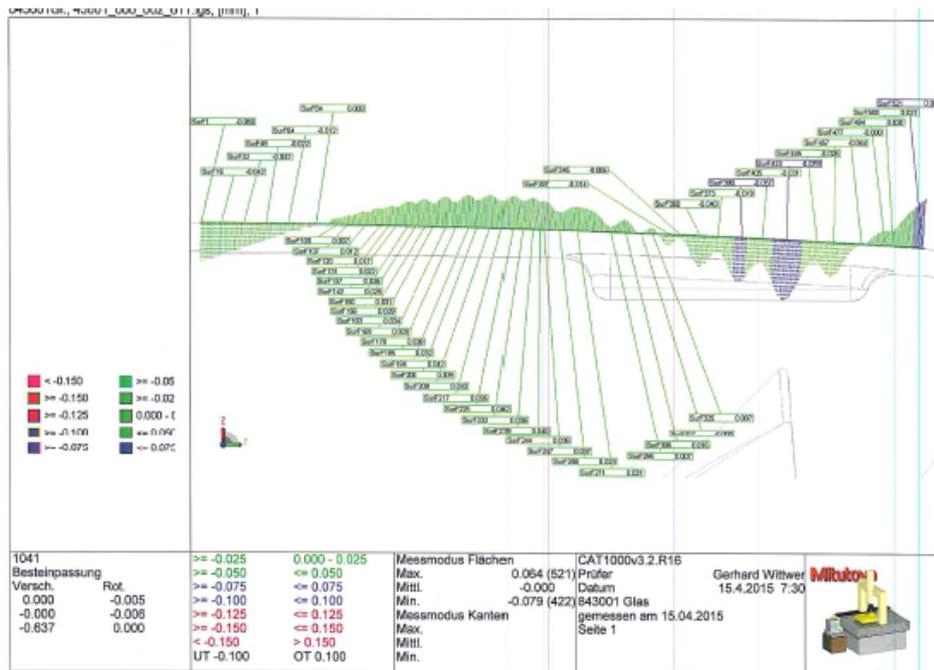
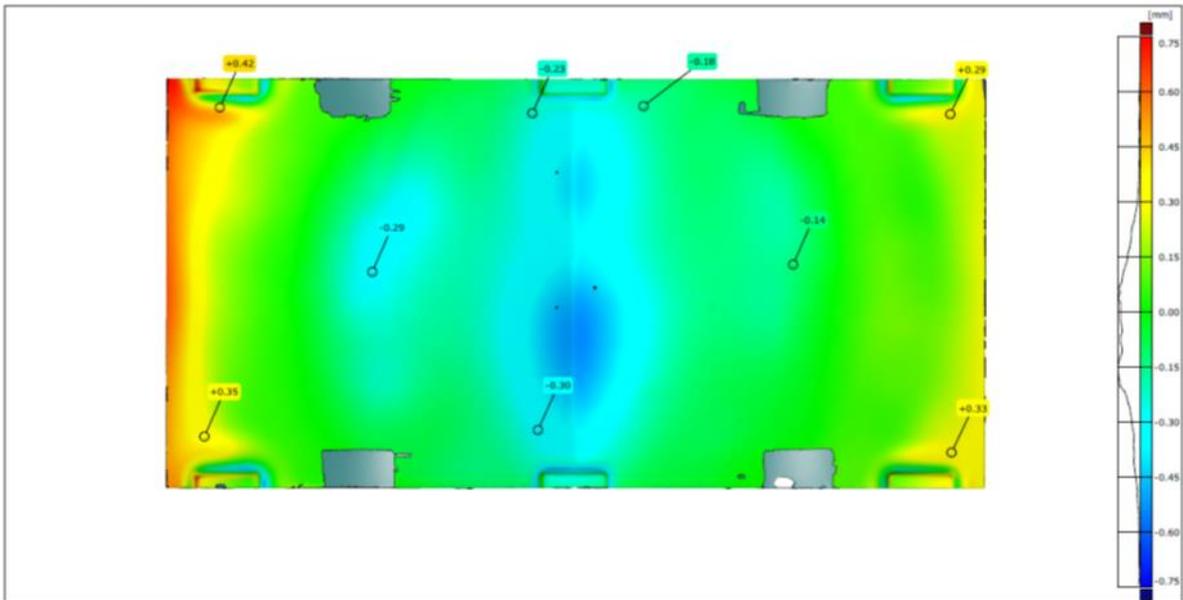


Abb. 6: Messergebnisse der welligen Rückseite der Linse der Fa. Auer Lighting nach dem Pressen (vor der Feuerpolitur)



Abb. 7: Strahlenbild der Linse von Auer Lighting nach dem Pressen (vor Feuerpolitur)



| | | | |
|---------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---|
| Prüfer: T.Lehnhof | Projekt: Konturprüfung | System: ATOS II SO |  |
| Firma: Auer Lighting GmbH | Bauteil: LED Modul | Ausrichtung: Lokales Best-Fit Formber | |
| Abteilung: ALG-Q | Teile-Nr.: 843001 SunOyster Dopp | TN-001 | |
| Ort: Bad Gandersheim | Datenstand: 43001_000_002_611.ig | Muster Feuerpoliert | |
| Datum: 27.04.15 | Chargen-Nr.: | | |

Generated with ATOS Professional V7.5 SR2

Abb. 8: Bild der Höhenabweichung der Linse von Auer Lighting auf der Rückseite

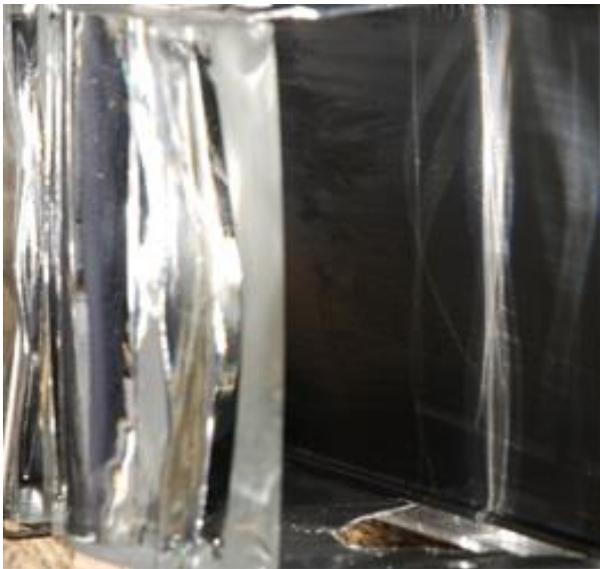


Abb. 9: Strahlenbild der Auer-Linse nach der Feuerpolitur

Insbesondere auf der sonnenzugewandten Seite der Linse war das Material an den von Opsira 16 mm dick entworfenen Stellen – viel dicker als von uns ursprünglich geplant – geschrumpft und über einen Millimeter zu dünn, so dass auch die Steigungen und die erforderlichen Brechungswinkel nicht stimmen.

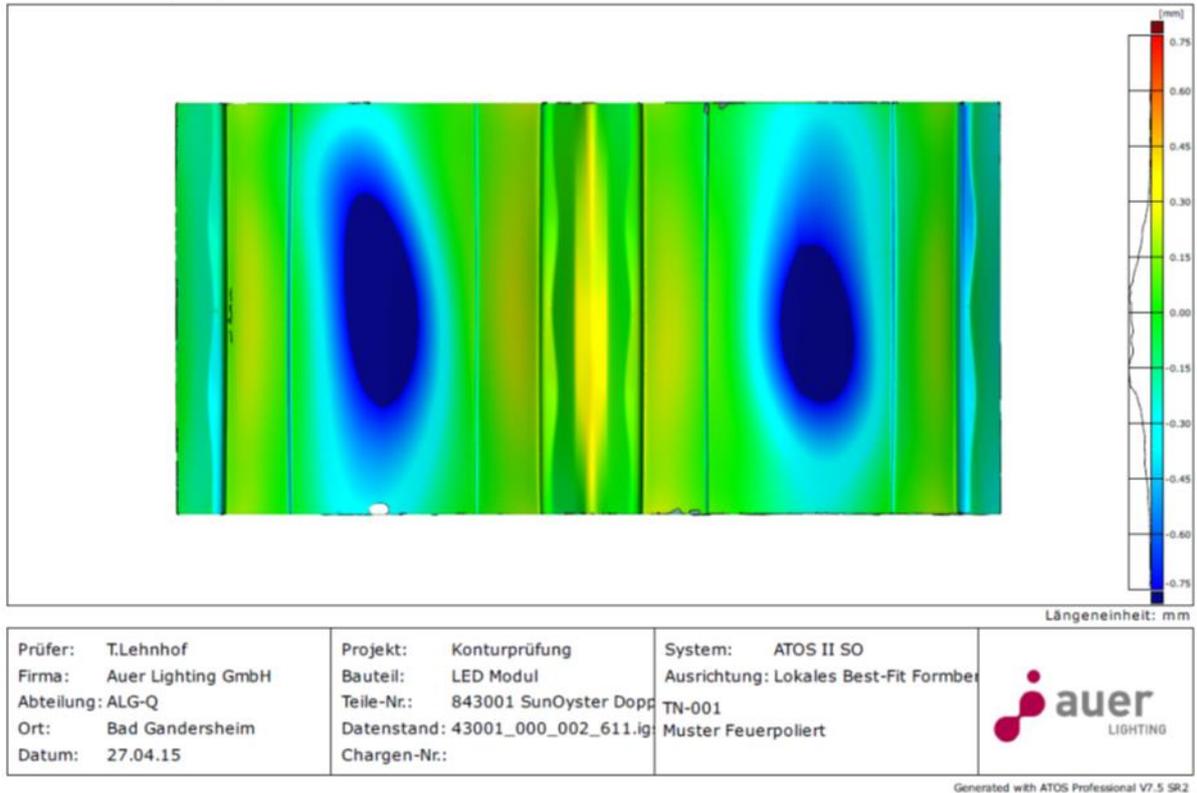


Abb. 10: Höhenabweichung auf der Vorderseite der Auer-Linse

Eine Messung mit einer Wärmekamera wirft die Frage auf, ob die Transmission des Glases so gut ist wie angenommen. Denn dort erscheint das Glas als heißeste Stelle, heißer als der Fokusbereich der Linse, der auf dem geweißten Wärmeträgerrohr liegt.

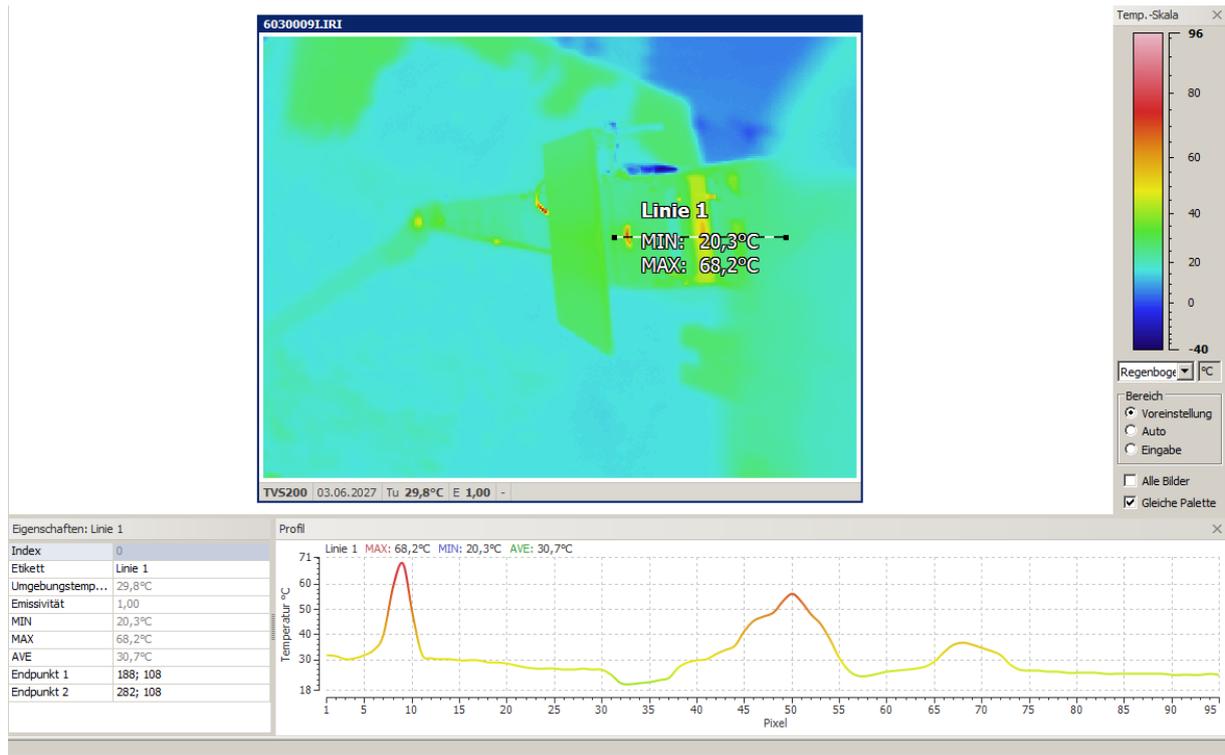
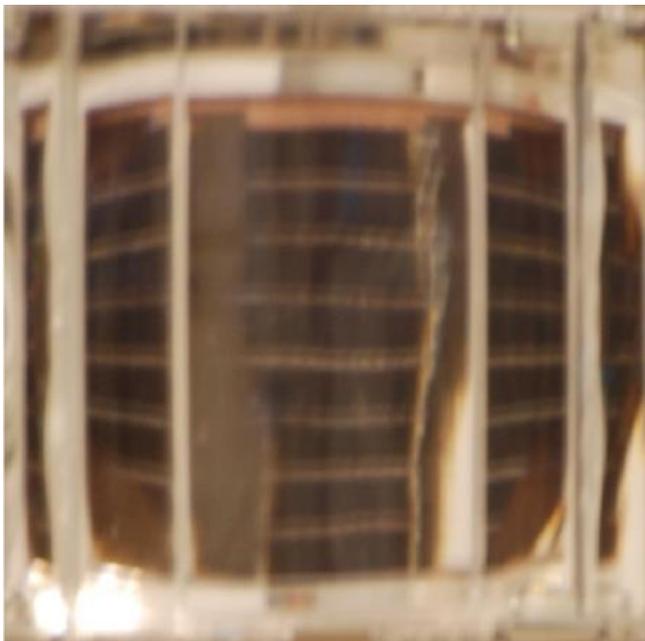


Abb. 11: Thermographie zeigt, dass Linse sehr heiß wird

Fotografiert man die Linse mit dem Zellaassembly mittig aus großer Entfernung, so müsste die gesamte Linsenfläche von dem Zellaassembly ausgefüllt sein. Dem ist jedoch nicht so, was auch noch mit einer rot hervorgehobenen Fläche illustriert werden soll. Nur auf gut der Hälfte der Linse ist die Zellafläche zu sehen.



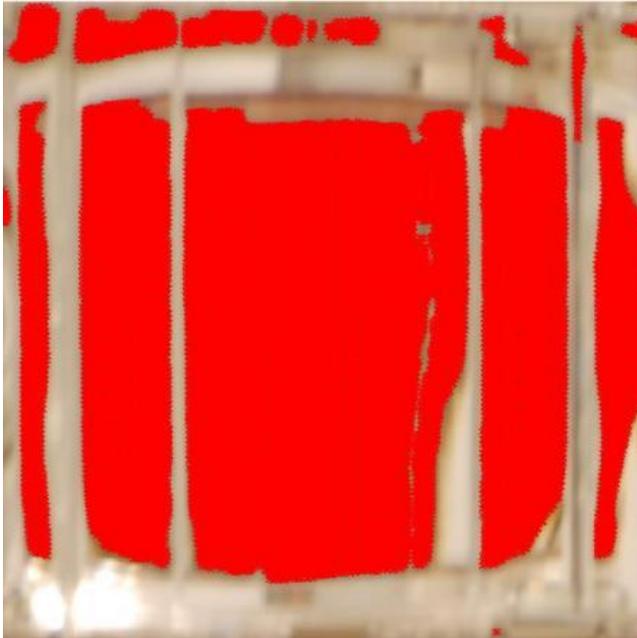


Abb. 12: Foto der Linse mit Zellenassembly mit Teleobjektiv aus großer Entfernung (oben) und Rotdarstellung der dunklen Flächen (unten, 54%)

Abgesehen von den Randbereichen – die wahrscheinlich durch die genannten Fertigungsfehler betroffen sind – fallen dabei insbesondere die Bereiche auf, in denen sich auf der Sonnenseite der Linse die Fresnel-Stufen befinden. Betrachtet man diese von der Seite, so erkennt man sofort, dass die von der Vorderseite nach innen konzentrierte Strahlung in einem so steilen Winkel auf die senkrechten Stufen auftritt, dass es zu einer Totalreflexion kommt und das Licht nicht auf die Zellen findet. Dies hätte Opsira mit Fresnel-Strukturen, die sich – wie üblich (siehe oben 4 c)) – auf der sonnenabgewandten Seite befinden, eher vermeiden können.

Vor diesem Hintergrund vermessen wir mit Christoph Prahel die Transmission der Linse, indem die Helligkeit der sekundär konzentrierten Strahlung auf weißen Untergrund mit der Helligkeit der primär konzentrierten Strahlung auf dem gleichen weißen Untergrund auf Fotos verglichen wird. Der Vergleich wird anhand des grünen Kanals vorgenommen. Die Fotoaufnahmen verwenden Filter und kurze Belichtungszeiten, um eine Überbelichtung zu vermeiden.



Abb. 13: Foto des Testreceivers in der Fokuslinie der SunOyster mit Linse und geweißter Receiver-Oberfläche, aufgenommen mit Filter aus Schweißerglas

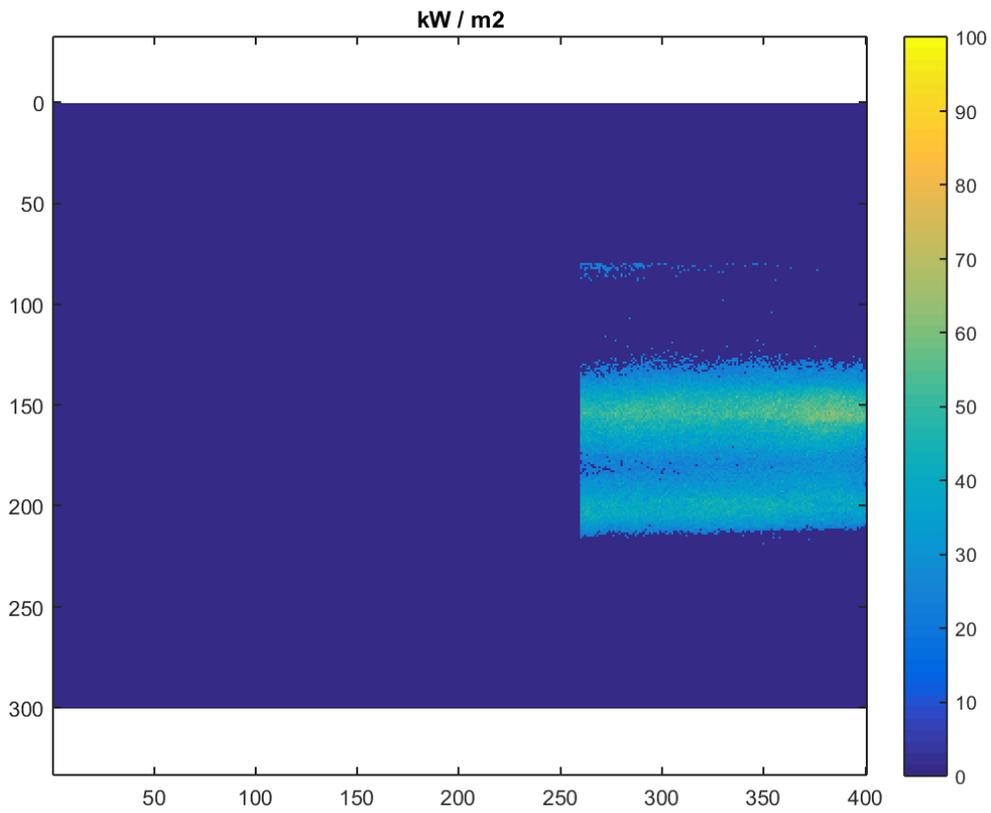


Abb. 14: Auswertung der Leistung auf dem Receiver

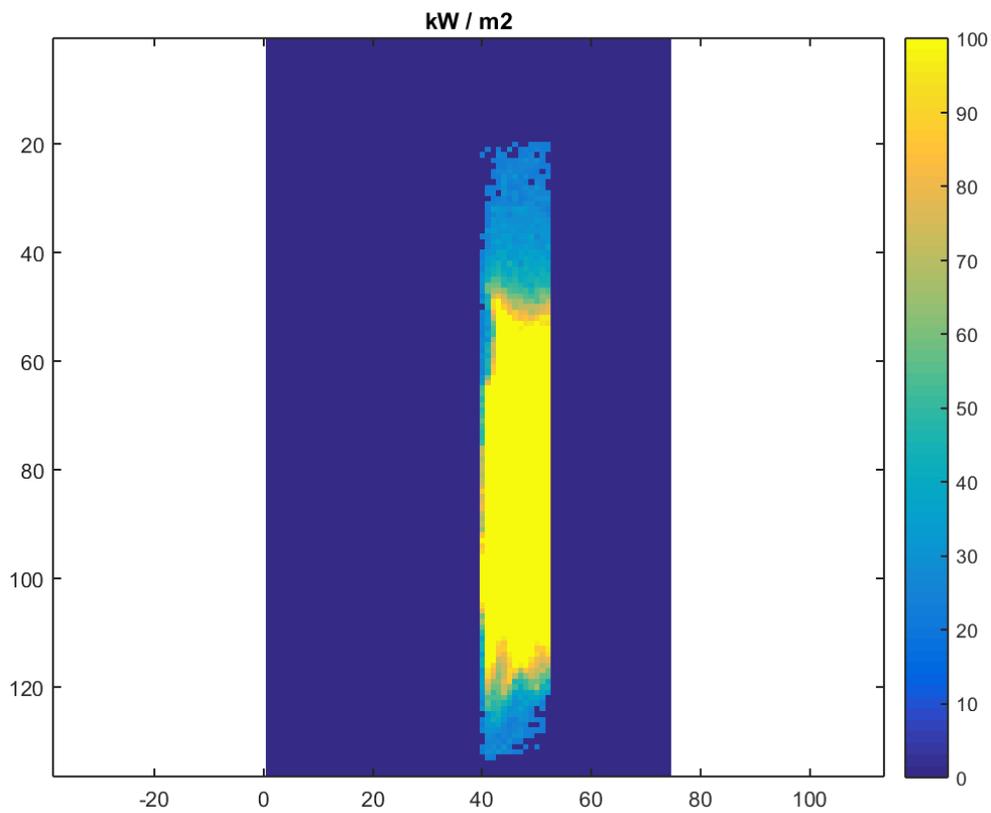


Abb. 15: Auswertung der Leistung auf der Zellfläche

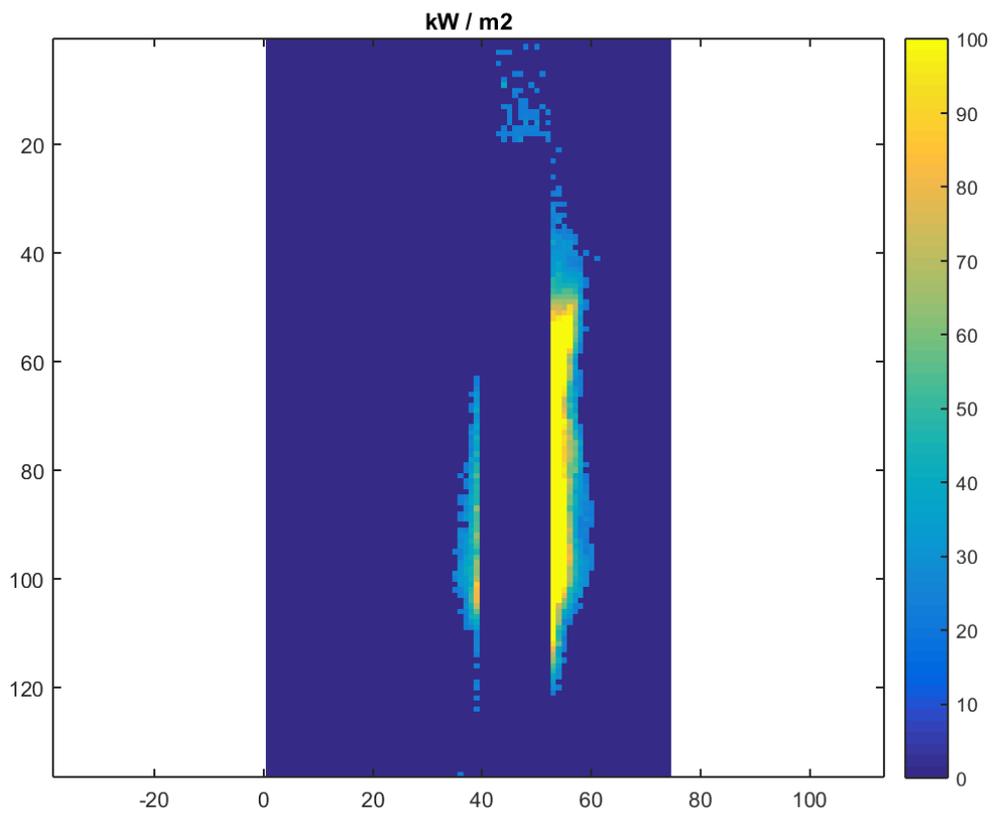


Abb. 16: Auswertung der Leistung neben der Zellfläche (Spillage)

Um Effekte auszuschließen, die sich aus der Primärkonzentration ergeben, wird die Linse noch einmal mit einer Sonne vermessen. Die Ergebnisse sind den Ergebnissen mit Primärkonzentration vergleichbar:



Abb. 17: Fotos des Zellassemblies mit Linse bei einer Sonne, einmal bei normaler Belichtung und einmal mit Filter bestehend aus Schweißerglas

Schließlich wird diese Analyse leider auch durch die Ergebnisse der elektrischen Leistungsmessung bestätigt. Eine gute Messung ergibt eine Assembly-Leistung von 14 W. Das entspricht einem Gesamtwirkungsgrad von 11,2 Prozent, also nur gut ein Drittel des erwarteten Wertes. Unterstellt man hier einmal, dass die vermessenen und für gut befundenen Zellassemblies nach wie vor wie vermessen funktionieren, liegt auf den Zellassemblies nur eine Konzentration von 186 Sonnen anstelle der erwarteten etwa 500 Sonnen.

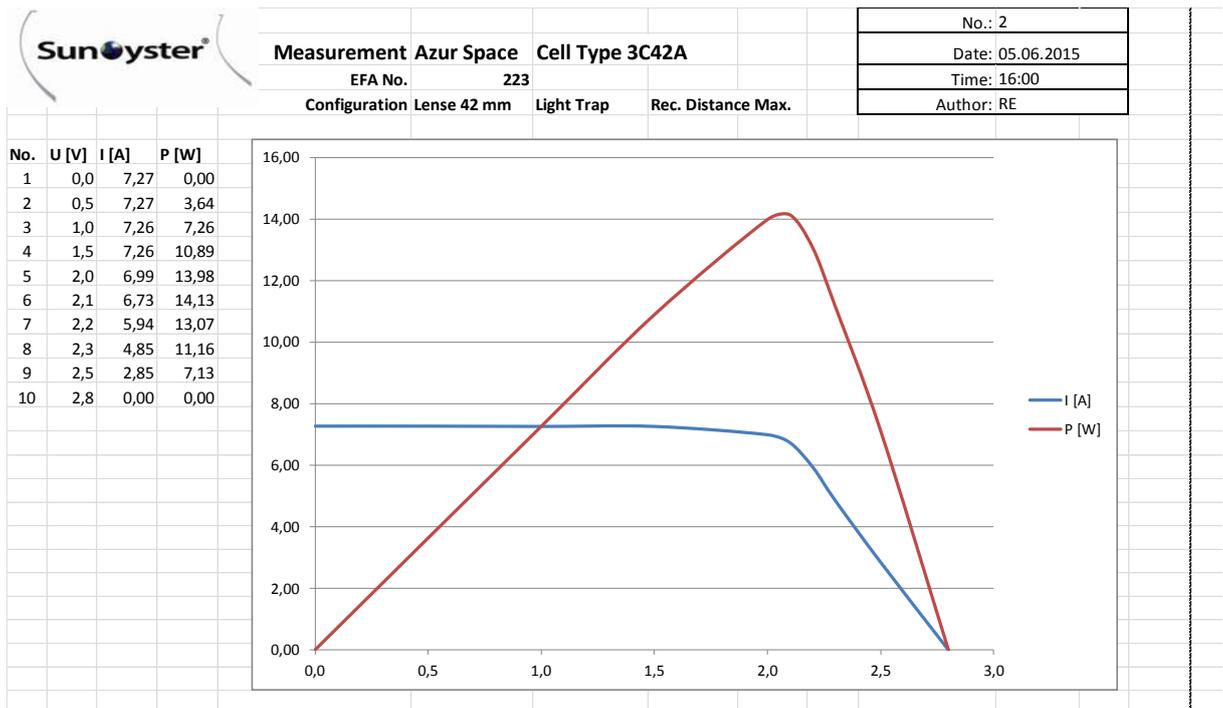


Abb. 18: U-I-Diagramm einer Linsen-Zell-Kombination mit der Opsira Linse auf Lucy

b) Linse des Fraunhofer ISE

Die noch nicht befriedigenden Ergebnisse machen es erforderlich, einen anderen Optik-Dienstleister mit dem Entwurf der Linse zu beauftragen. Um vermeintlich kein weiteres Risiko einzugehen, wird nunmehr das Fraunhofer ISE – dessen Angebot in der ersten Projektphase zugunsten des deutlich preiswerteren Angebots von Opsira abgelehnt worden war – mit dem Entwurf einer neuen Linse zu beauftragt.

Der resultierende Bericht – der sehr gut geschrieben ist – wurde unserem Zwischenbericht beigelegt. Auf ihn kann weitgehend verwiesen werden, so dass hier nur die Kernpunkte herausgegriffen werden sollen.

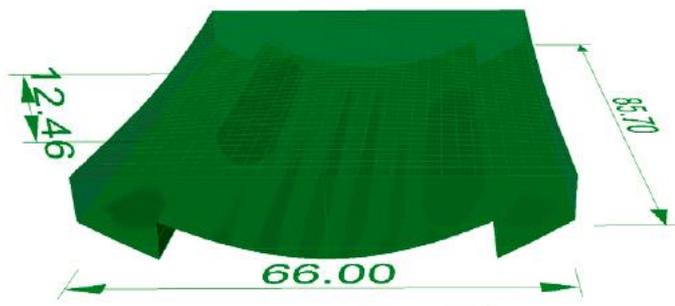


Abb. 19: CAD der vom Fraunhofer ISE entworfenen Linse „Gen. 14“

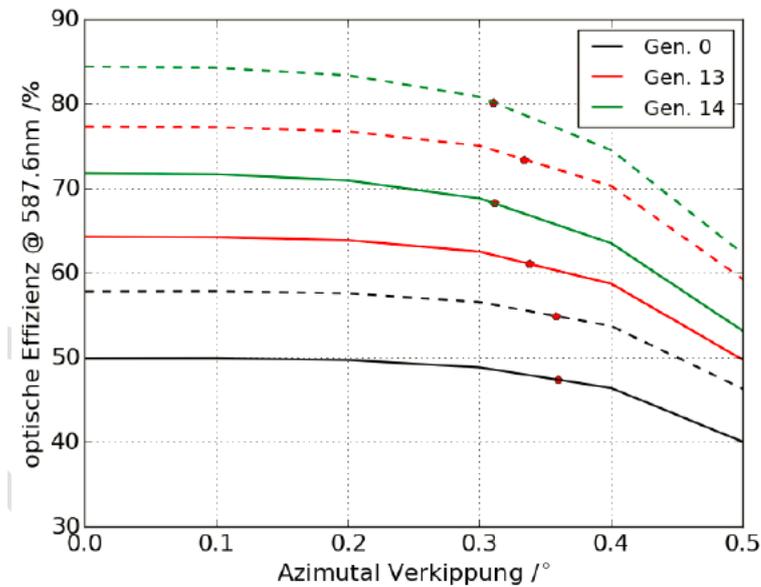


Abb. 20: Darstellung der optischen Effizienz und des Akzeptanzwinkels von Opsira-Linse (schwarz), Linse Gen. 13 (rot) und Linse Gen. 14 (grün), jeweils ohne Antireflexbeschichtung (durchgezogene Linie) und mit (gestrichelt) (Fraunhofer ISE) bei einem Tracking-Fehler im Azimut

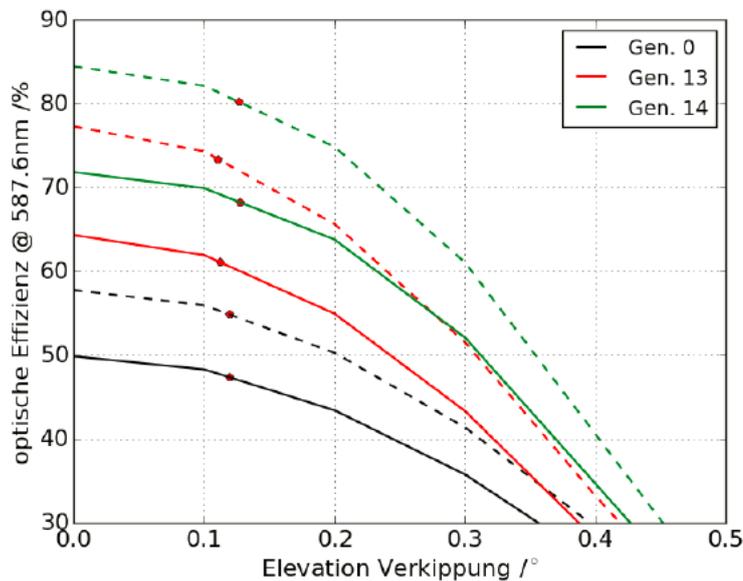


Abb. 21: Darstellung der optischen Effizienz und des Akzeptanzwinkels von Opsira-Linse (schwarz), Linse Gen. 13 (rot) und Linse Gen. 14 (grün), jeweils ohne Antireflexbeschichtung (durchgezogene Linie) und mit (gestrichelt) (Fraunhofer ISE) bei einem Tracking-Fehler in der Elevation

Leider bestätigen die Messergebnisse die Simulationen des Fraunhofer ISE nicht. Die Flussdichtemessung ergibt folgende Ergebnisse:

Noch ohne Berücksichtigung der Spiegelverluste liegt der optische Wirkungsgrad der ISE-Linsen nur bei 49%, mit Spiegel bei 47%. Zudem ist die Strahlung auf den Zellen sehr ungleich verteilt, was weitere negative Auswirkungen auf den Füllfaktor der Zellen hat.

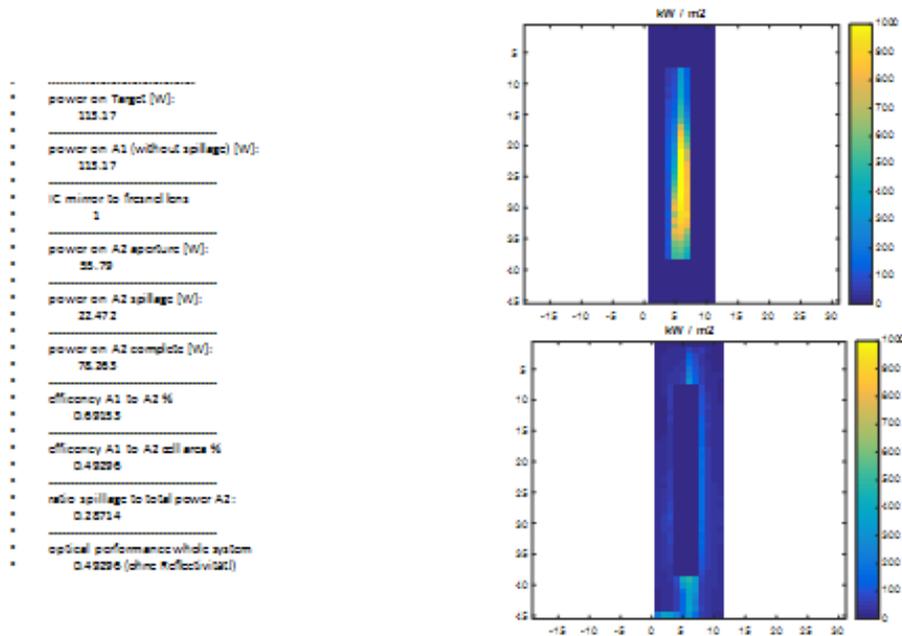


Abb. 22: Flussdichteauswertung für die ISE-Linse bei einer Konzentration auf eine Fläche von 30 mm x 3 mm (was 1354x entspricht)

Ein wenig besser sieht es aus, wenn man auf eine größere Zellfläche von 48 mm x 5,5 mm konzentriert. Der Wirkungsgrad steigt dann auf 61% ohne Spiegel und 58% mit Berücksichtigung des Spiegels, wobei die Strahlung sehr inhomogen bleibt:

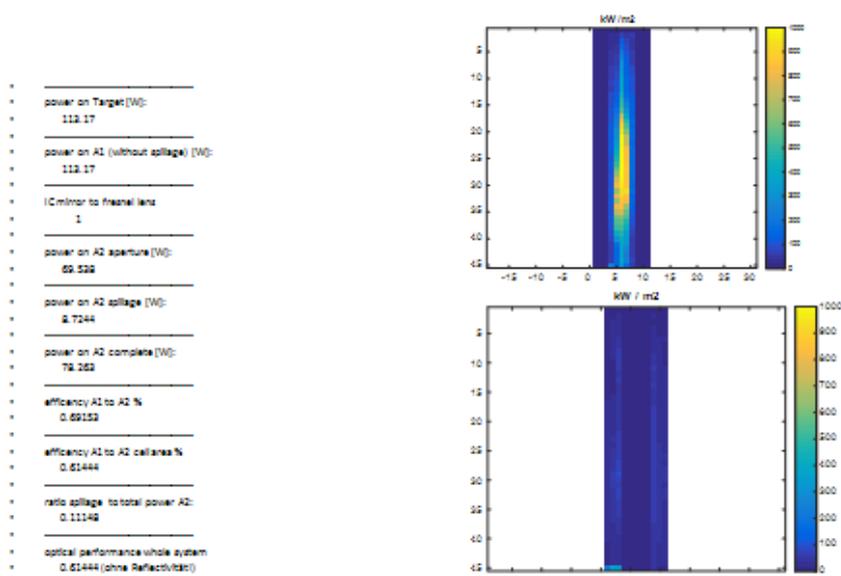


Abb. 23: Flussdichteauswertung für die ISE-Linse bei einer Konzentration auf eine Fläche von 48 mm x 5,5 mm (was 541x entspricht)

Die optischen Ergebnisse wurden durch die elektrischen Ergebnisse bestätigt: Die Messung mit dem (kleineren) Handspiegel ergab nur 11,5 W, was hochgerechnet auf den großen Spiegel etwa 14 W entspricht – demselben geringen Wert der Opsira-Linse!

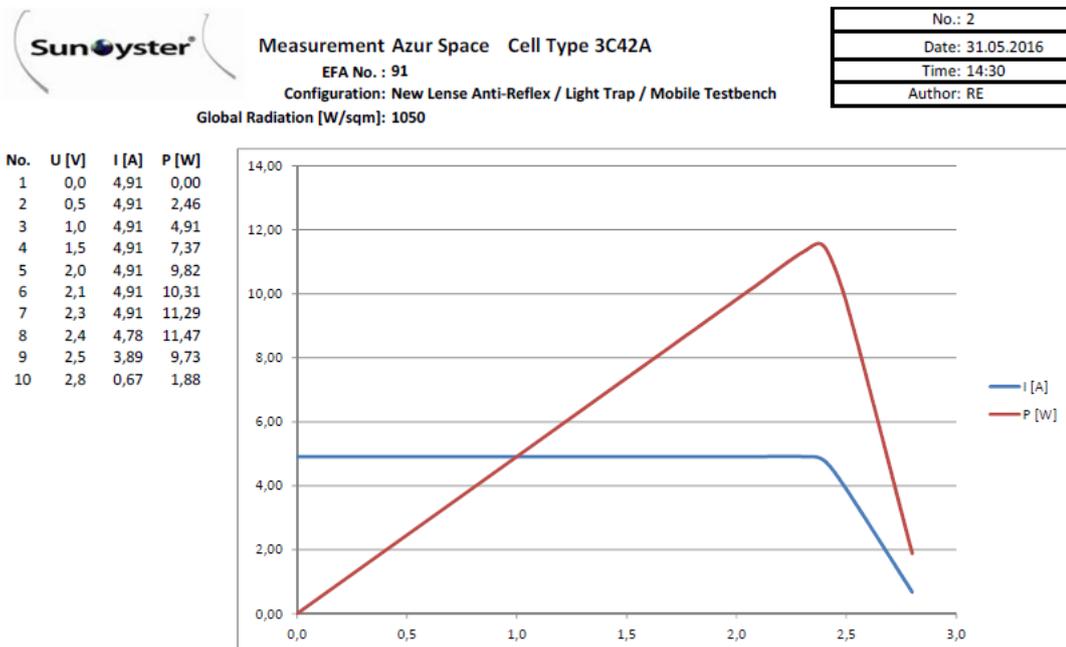


Abb. 24: U-I-Kurve der Linsen-Zell-Kombination mit der ISE-Linse auf dem Handspiegel

Eine Einzelstrahlverfolgung mit dem Laser zeigt, dass bereits geringe Abweichungen der tatsächlichen Position von der Idealposition bei der ISE-Linse dazu führen, dass der Strahl das Ziel verfehlt.

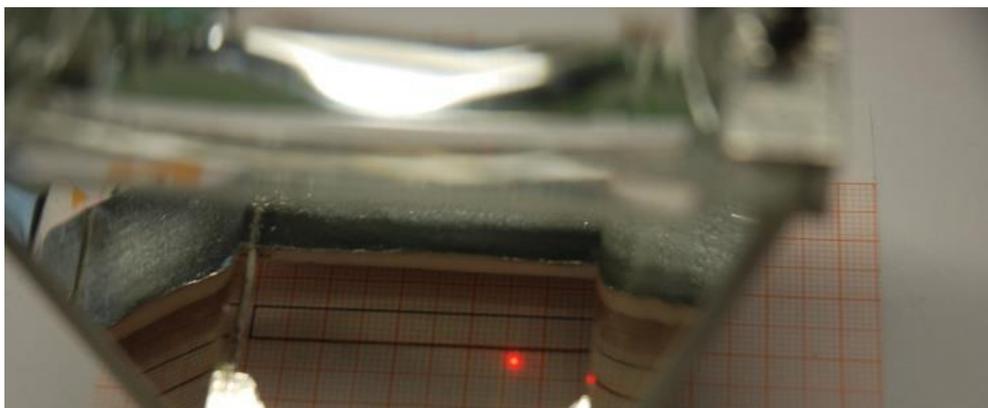


Abb. 25: Foto eines Raytracing mit rotem Laser und der ISE-Linse

Dies legt die Annahme nahe, dass das ISE bei seiner Auslegung die übermittelten Informationen zur Standardabweichung des Spiegels, die 6 mm in der x-Richtung und 12 mm in der y-Richtung beträgt, nicht richtig berücksichtigt hat.

c) Dritte Linsengeneration: SunOyster Crystal

Versuche mit einer Linse direkt auf den Zellen und die Literatur (vgl. Benítez) legten nahe, dass man die Linse direkt an die Zellen anbinden sollte. In einem Workshop mit Christoph Prahl und Dr. Ralf Leutz wurde daraufhin der SunOyster Crystal entwickelt:

Die Linse kombiniert eine konvexe zylindrische Apertur, welche die Strahlung in der Fokuslinie in der y-Richtung auf den Zellstreifen konzentriert. Zudem hat der Körper die Form einer umgekehrten und abgeschnittenen Pyramide (reverse truncated pyramid - RPB), welche die Strahlen in beiden Richtungen der Konzentration reflektiert. Dabei handelt es sich um eine Totalreflektion an den Linsenwänden, die verlustfrei arbeitet.

Die Details der Entwicklung können dem in Anlage 1 beigefügten Bericht entnommen werden. Die Einbindung der Linse wird in der in Anlage 2 beigefügten Anmeldung eines Gebrauchsmusters näher beschrieben.

Die Linsen wurden aus Zeitgründen nicht gepresst, sondern von der Fa. Poschinger aus dem Bayerwald per Hand geschliffen. Dabei wurde die in dem Bericht genannte kleine Linse aus dem Original-Glas B270 hergestellt und präzise gefertigt. Die Linsen wurden auf dem Handspiegel vermessen.

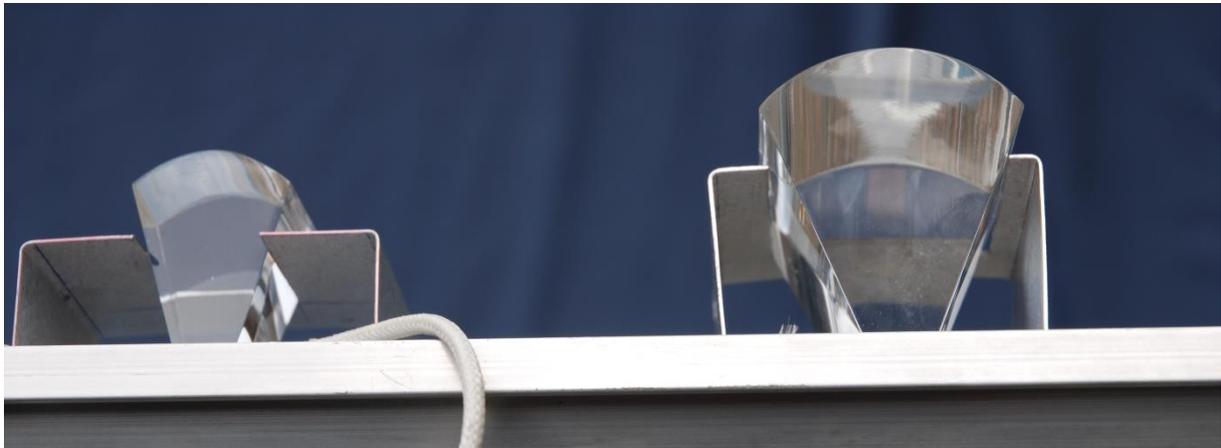


Abb. 26: Foto des kleinen Crystals aus B270 und des großen Crystals aus dem hauseigenen Kristallglas von Poschinger mit Leistungskabel

Die elektrische Vermessung am 5. August 2016 mit der Senke bestätigte den guten optischen Eindruck des kleinen SunOyster Crystals: Maximal 7,70 W im Punkt der maximalen Leistung bei einer Spannung von 2,6 V und einem Strom von 2,96 A ergeben bezogen auf die kleine Aperturfläche dieser Linse bei 900 W Direktstrahlung einen Wirkungsgrad von 30,8%.

Die Linse wurde anschließend von Süd-Optik aus Glas gepresst. Die gepresste Linse weist im ersten Zugriff noch einen Schrumpf auf, der zu leicht konkaven Flächen an

allen großen Seitenflächen führt. Von dieser Linse wurden einige professionelle Fotos gemacht:



Abb. 26 a: Foto des SunOyster Crystal (Schulze-Alex)



Abb. 26 b: Foto (Schulze-Alex) der drei Linsengenerationen (von links nach rechts)

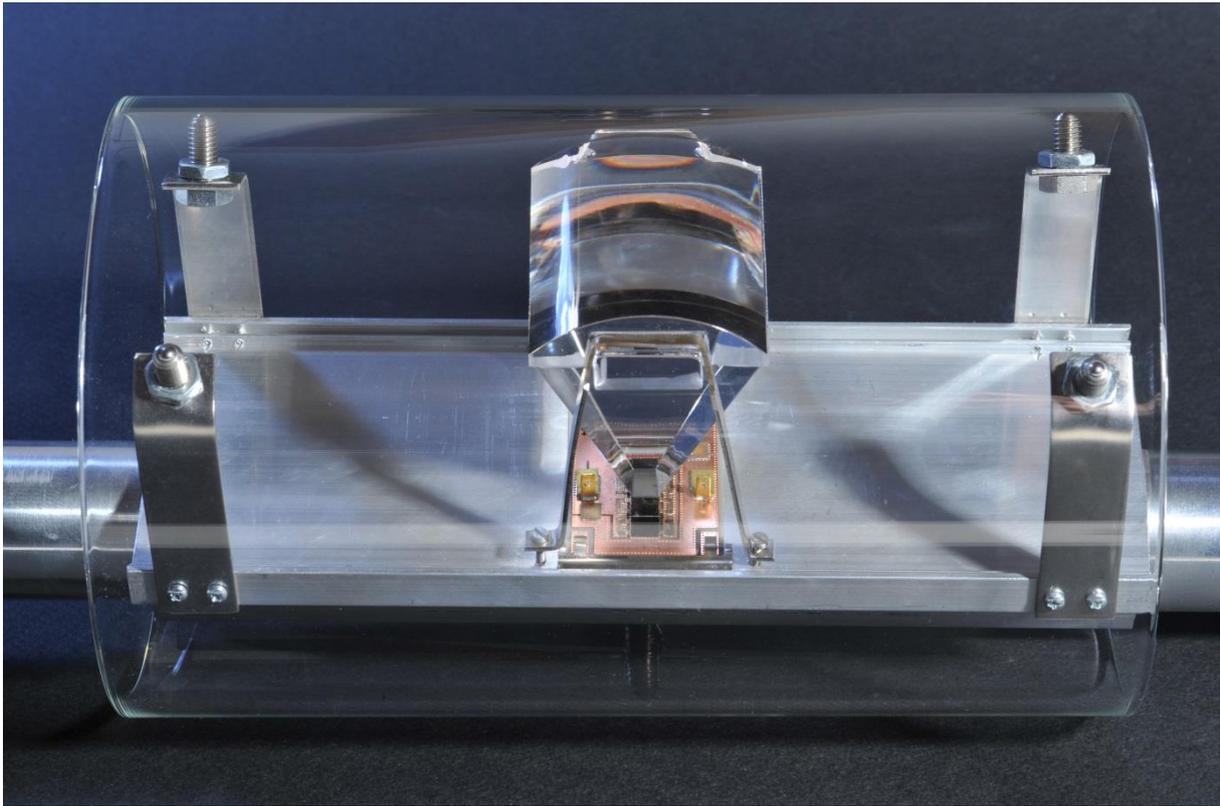


Abb. 26 c: Foto (Schulze-Alex) der in das Glasrohr eingebauten Linse

Auf einer eigens dafür gebauten Messapparatur wurde der Interzept der neuen Linse bestimmt. Dazu wurden Zellen umgekehrt bestromt, so dass sie rot leuchten, aus einer Distanz von mehr als der Brennweite von 1,7 m (konkret 5 m) fotografiert. Je mehr der Linsenfläche rot leuchtet, desto besser. Einige beispielhafte Ergebnisse waren wie folgt:

RGB



Abb. 26 d: Interzept bei Azimutfehler 0° und Elevationsfehler 0°: 88%

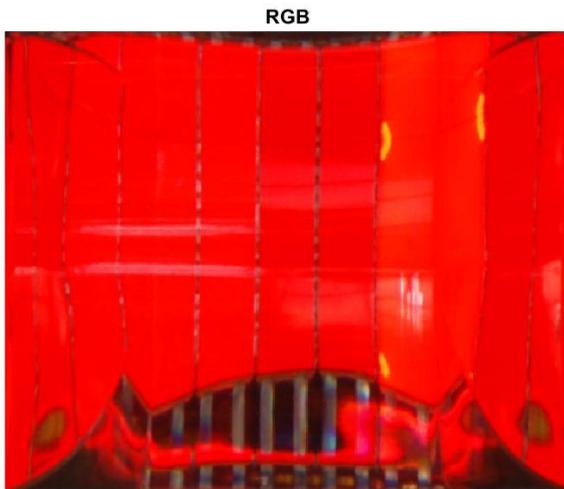


Abb. 26 e: Interzept bei Azimutfehler -3° und Elevationsfehler 0°: 84%.

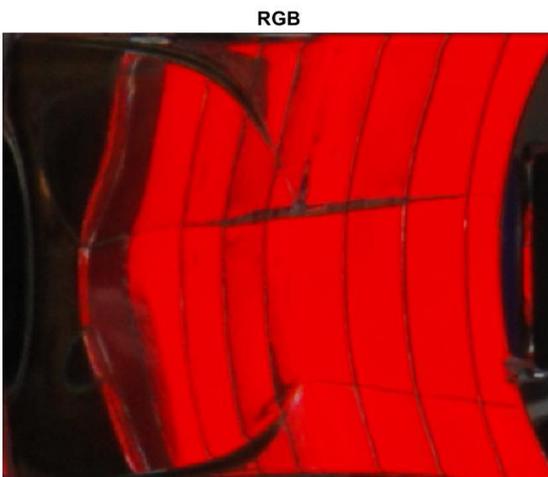


Abb. 26 f: Interzept bei einem Azimutfehler von 0° und einem Elevationsfehler von 29°: 62%

Insgesamt sieht der Interzept beim SunOyster Chrystal zwar besser aus als bei den flachen Linsen der Generationen 1 und 2, ist aber noch nicht perfekt. Insbesondere die Strahlen von der Unterseite und Oberseite des Spiegels werden bei diesem Design und dieser Verarbeitung von Zellembly und Linse noch nicht in vollständig befriedigendem Umfang auf die Zellen konzentriert.

Ende April wurde eine weitere Messung zusammen mit dem TÜV vorgenommen. Der entsprechende Bericht ist als Anlage 3 beigefügt. Die Messung auf dem Handspiegel ergab bei 1050 W Globalstrahlung (kurz zuvor hatte die Leistung auf der DNI-Messung neben Lucy bei ebenfalls 1050 W Globalstrahlung bei 700 W gelegen) ergab eine Leistung am Maximum Power Point von 8,64 W bei 2,4 V und 3,6 A. Bezogen auf die 700 W und die Flächen entspricht dies einem elektrischen

Systemwirkungsgrad von rund 14% - mehr als frühe PV, aber deutlich weniger als erwartet. Die Fehlersuche dauert zum Ende des Projektzeitraums an: Die Klebung der Linsen mit Silikon kann durch eine Elimination der Microblasen durch Ausgasen des Silikons im Unterdruck deutlich verbessert werden. Die Haftung des Silikons vor allem auf den Zellen kann durch eine Niederdruckplasma-Behandlung verbessert werden. Die verwendeten Zellenassemblies mit 8 Zellen, von denen drei zwecks Deckung mit der Linse elektrisch stillgelegt wurden, sind mit Ihrer Anti-Reflexbeschichtung auf Luft optimiert; möglicherweise führt dies – gerade bei den teilweise recht flachen Einfallswinkeln der Strahlen – zu erhöhten Verlusten. In der Theorie sollten sich am Exit der Linse keine großen spektralen Verschiebungen gegenüber der Strahlung der Sonne ergeben. Zur Verifikation dieser Annahmen könnten Messungen mit Teilzellen unserer Konzentrazorzellen (jeweils nur obere, mittlere und untere Zelle) Aufschlüsse ergeben. Ein Anschluss von Effekten durch die Parallelschaltung könnte mit einer Ganzzelle von 30 mm x 5,5 mm erfolgen.

3. Wärmeträger-Rohr und Wärmeträger

a) Bilder des Wärmeträger-Rohres

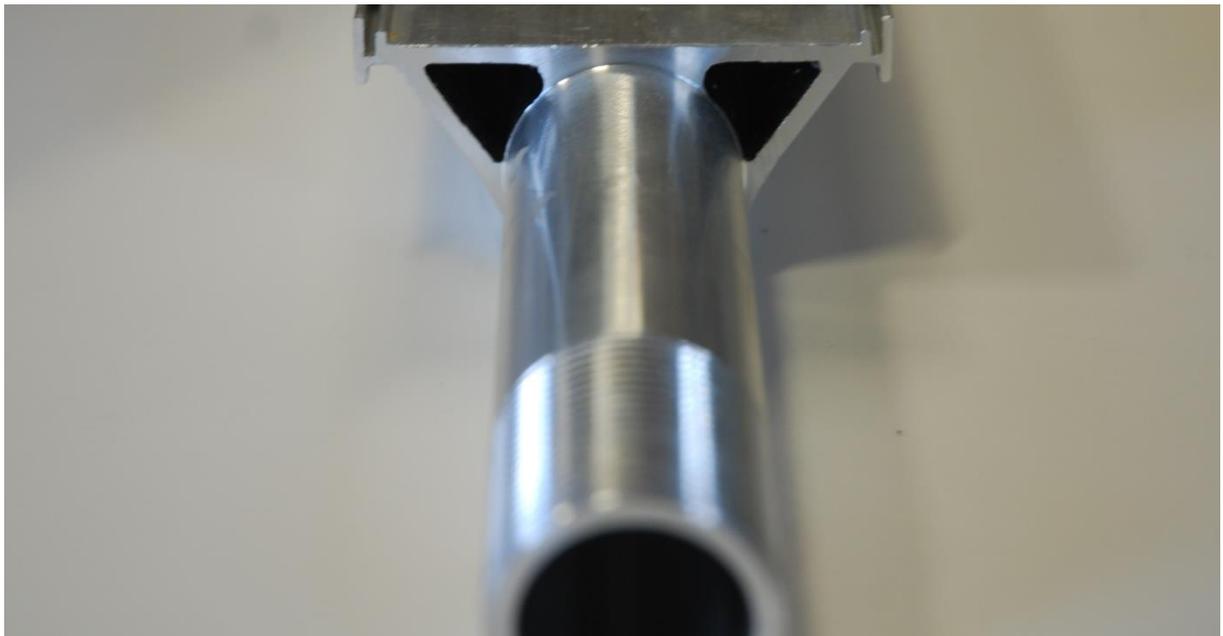


Abb. 27: Foto des extrudierten an den Enden abgefrästen Aluminiumrohres

b) Klemmung der Zellenassemblies auf dem Wärmeträger-Rohr

Die Zellenassemblies werden in der Schablone aufgelegt und mit den Edelstahlfedern festgeklemmt. Bereits eine der beiden Federn bewirkt eine gute Fixierung der Zellenassemblies. Mit zwei Federn werden sie normalerweise so gut fixiert, dass ein Verrutschen unter üblichen Einsatzbedingungen ausgeschlossen erscheint. Gleichzeitig könnten die großen Kräfte, bedingt durch die unterschiedliche Wärmeausdehnung von Zellenassembly und Wärmeträger-Rohr, in Extremsituationen

doch dazu führen, dass das Zellassembly unter der Klammer nach außen oder innen gleitet, ohne dass dies zu einer Beschädigung des Zellassemblys oder der Klammer führt. In einzelnen Fällen ist nach der Klemmung allerdings ein geringer Anpressdruck festgestellt worden.

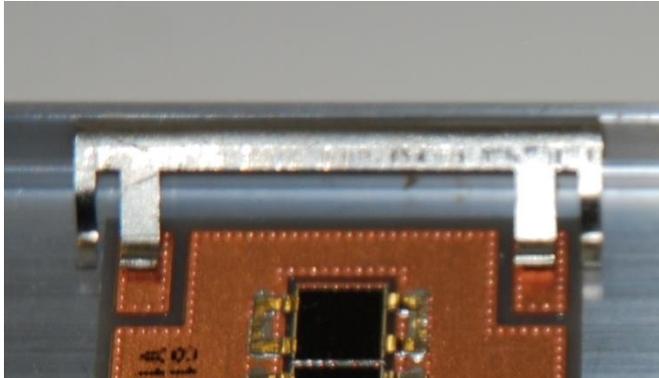


Abb. 28: Foto des mit Edelstahlfedern fixierten Zellassemblys

Daneben ist der Wärmeübergang zwischen dem aufgeklebten Zellassembly und dem Aluminiumrohr – bereits ohne Wärmeleitpaste (siehe dazu nachfolgend h) – zufriedenstellend, aber noch verbesserungsfähig:

Bei einer Messung am kleinen Messstand ergab sich eine maximale Differenz von Zellassembly und Fluid von 8 K.

Bei einer anderen Messung waren es bei nur 330 l/h Volumenstrom 16 K zwischen Zellassembly und Fluid.

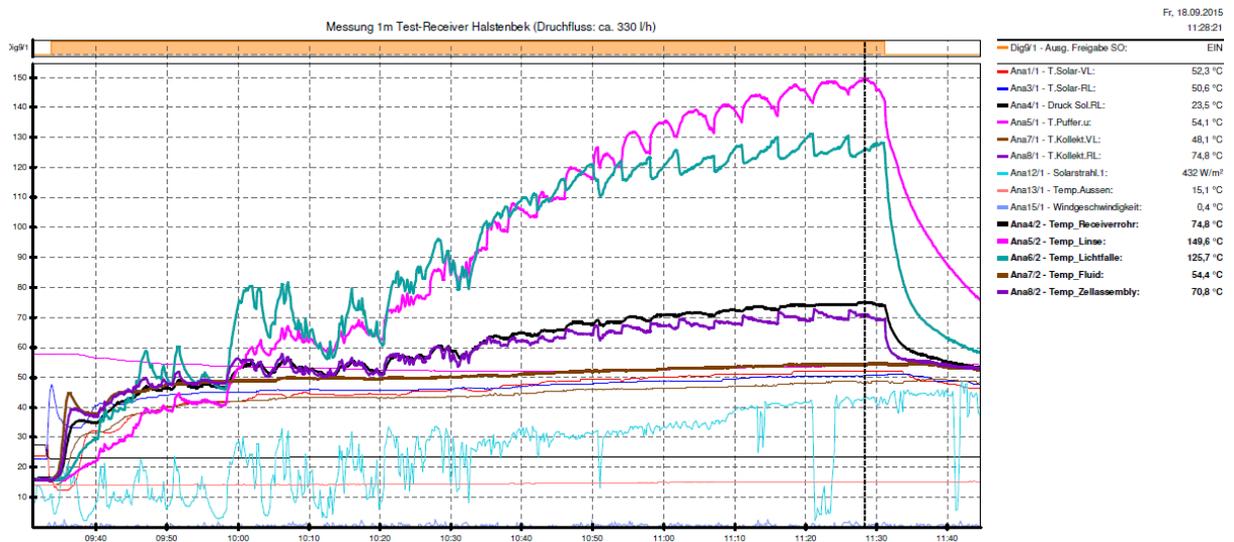


Abb. 29: Ergebnisse der Temperaturmessung im Receiver mit mehreren Sensoren

Vor dem Hintergrund der Befestigungssicherheit und eines optimalen Temperaturübergangs gibt es auch hier Überlegungen, wie das Zellassembly noch besser befestigt werden kann.

- Dies könnte zum einen dadurch erreicht werden, dass eine von einer bis zur anderen Seite quer über die Assembly-Fläche reichende Klammer die Mitte des Zellasemblies – wo die meiste Wärme anfällt und abgeleitet werden muss - anpresst. Es muss allerdings geprüft werden, ob für eine solche Klammer neben der Lichtfalle innen und den elektrischen Kontakten oben oder unten der Platz vorhanden ist.
- Noch besser erscheint jedoch, das Zellaassembly mit einer Platte umlaufend festzuklemmen, die mit vier Schrauben verschraubt wird. Bei den Schrauben handelt es sich entweder um selbstschneidende Edelstahlschrauben, die in eine Nut im Aluprofil eingedreht werden, oder bei denen auf einen aufgeschweißten Aluminiumgewindenippel sich nicht lösende Quetschmuttern mit federnden Unterlegscheiben aufgeschraubt werden. Anstelle einer umlaufenden Platte kann auch eine Platte auf je einer Seite verwendet werden, die dann zugleich noch die Funktion eines Abstandshalters zwischen den Zellasemblies haben kann.

c) Durchbiegung des Wärmeträger-Rohres

Da die Glaslinsen des Receivers bereits mit dem Entwurf von Opsira bis zu 16 mm dick und pro Stück damit 112 g schwer geworden sind, muss das Wärmeträger-Rohr bei 60 Linsen allein schon knapp 7 kg an Glas tragen. Mit dem SunOyster Crystal, der pro Zellaassembly sogar an die 190 g wiegt, wächst das Receiver-Gewicht sogar noch weiter.

In einem Versuch zum ursprünglichen Receiver-Gewicht wurden viermal 2,5 kg Gewichte verteilt über die Länge des Receivers angebracht. Dann wurde die Durchbiegung des Rohres gemessen. Diese beträgt in der steifen Richtung, also in einer aufrechten Position der Auflagefläche, 3 mm und in der weicheren Richtung (quer zur Auflagefläche) immerhin 6 mm.

Bedenkt man nun noch Transportsituationen, bei denen ein das Receiver-Rohr transportierender Lastkraftwagen z.B. durch ein Schlagloch fährt, so darf auch die Durchbiegung im Falle von plötzlichen Schlägen oder Vibrationen nicht zu Schäden führen. Bei dieser dynamischen Belastung ergab die Messung unter der genannten Gewichtsbelastung eine Durchbiegung von bis zu 6 mm in der steiferen und bis zu 12 mm in der weicheren Richtung, also jeweils doppelt so viel wie bei statischer Belastung. Dies würde zu einer Kollision der Linse oder der Unterseite des Wärmeträgerrohres mit dem Glashüllrohr und damit zu einer Zerstörung oder Beschädigung zumindest eines der beiden Glasteile führen, insbesondere zu einem Springen des Glashüllrohrs.

Hinzu kommt noch, dass die unterschiedliche Durchbiegung des Rohres über die Länge desselben dazu führt, dass die Linsen und Zellen einen verschiedenen

Abstand zum Spiegel einerseits und zum Brennpunkt des Spiegels andererseits bekommen. Das erfüllt die Anforderungen an ein möglichst genaues optisches System nicht.

Um dies zu verhindern, sollen insbesondere folgende Maßnahmen ergriffen werden:

- Transport der Receiver-Rohre in einer Position, in der die Auflagefläche aufrecht steht, um so gegen vertikale Stöße bestmöglich gewappnet zu sein;
- Wie bereits antizipiert, Einbau von Abstützungen. Hier denken wir an drei Halter, die jeweils mit einem Abstand von etwa einem Meter über die Länge verteilt werden. Diese müssen dann jeweils zwischen den Linsen positioniert werden.

Diese Halter werden nach Überlegung jedoch nicht als Federn gestaltet, weil diese zu weich sein könnten, um schädliche Beschleunigungen sicher zu verhindern. Sondern sie werden als ausgesägte Kreisscheiben gestaltet, welche auf das Aluminiumrohr geschoben werden und sich in dem sehr steifen Glasrohr abstützen. Damit sie im Glasrohr gleiten und dieses nicht zerkratzen und nicht selbst das Glashüllrohr durch mechanische oder thermische Belastungen zerstören, werden auf die Kreisscheibe im Abstand von jeweils 120° zueinander drei kleine eingesägte Stücke eines weißen Teflon-Zylinders aufgesteckt, das hervorragende Gleit- und Dämpfungseigenschaften hat. Zudem ist es über 200°C temperaturbeständig.



Abb. 30: Foto des Abstandshalters in Form einer Kreisscheibe (am linken Bildrand) mit einem der drei Teflon-Gleiter (Mitte) auf dem Wärmeträger-Rohr

Dieses Design wurde noch durch federnde Druckstücke verbessert (siehe oben vier Stück links und rechts in Abb. 26 c), welche über Edelstahlkugeln durch das Rohr gleiten, ohne das Glas zu zerkratzen, und die sich durch einen Federweg von z.B. jeweils 2 mm an Toleranzen im Glas anpassen.

d) Bearbeitung des Rohres

Das Abfräsen überflüssiger Teile des extrudierten Aluminiumprofils ist relativ teuer und stellt insbesondere bei der Originallänge von über 4 Metern eine Herausforderung an den Maschinenpark dar, die viele Hersteller nicht bewältigen können. In einer Serienproduktion wären diese technischen Herausforderungen jedoch zu meistern, und dies wohl auch zu einem guten Preis. Dennoch wurden zwei alternative Methoden getestet.

Einmal handelt es sich dabei um das Anschweißen eines Aluminium-Nippels an das dann kürzere Dreiecksrohr. Dies kann von qualifizierten Lieferanten bewältigt werden, führt aber zu kleinen Wülsten und damit im Inneren des Rohres auch zu Druckverlusten.

Das Eindrehen von Gewindenippel z.B. aus Edelstahl oder Messing in das kürzere Dreiecksrohr ist ebenfalls denkbar und preiswert durchzuführen, führt aber zu einer gewissen Verjüngung des Rohres und einem unnötigen Druckverlust. Für einen stufenlosen Übergang müsste die Wandstärke des den Wärmeträger umschließenden Rohres erhöht und dieses innen teilweise ausgedreht werden. Außerdem ist die Festigkeit eines solches Systems gegenüber den beiden vorstehenden Varianten reduziert.

e) Wärmeleitschicht

Es stellt sich die Frage, ob die Wärmeleitung zwischen Zelleassembly und Wärmeträgerrohr weiter verbessert werden kann.

Als Teil seiner Bachelorarbeit hat in der zweiten Projektphase unser Werksstudent Marko Suka die Wärmeleitpaste näher untersucht. Insoweit wird im Einzelnen auf die in der Anlage beigefügte Arbeit (S. 32 bis 49) verwiesen. Hier sollen kurz die Ergebnisse zusammengefasst werden:

Aufgrund einer Vorauswahl wurden zwei Wärmeleitpasten erhitzt. Die angeblich hochleistungsfähige und teure Paste Joujye BW TB-O.C7 verlor erheblich an Masse, härtete vollkommen aus und erwies sich somit als untauglich. Die Wärmeleitpaste Keratherm KP 92 dagegen blieb – obwohl auch sie im Langzeittest 3% an Gewicht verlor und diese ausgegaste Materie keine Schäden verursachen darf – geschmeidig und wurde für die weiteren Versuche verwendet.

In einem Test wurde der Wärmeübergang vom sich erwärmenden Fluid auf das Zelleassembly gemessen. Dieser vollzog sich mit Wärmeleitpaste schneller, wobei der Temperaturunterschied von maximal 2 K relativ gering ist.

In einem weiteren Test wurden die Zellenassemblies von Strom durchflossen und konnten ihre Wärme an ein kaltes Fluid abgeben. Dabei blieben die Zellenassemblies mit Wärmeleitpaste deutlich kühler (Erwärmung von 10° auf 13,1° anstelle von 16,3°C), wurden also besser „entwärmt“. Seine Berechnung ergab, dass sich der Wärmewiderstand durch die Wärmeleitpaste halbiert.

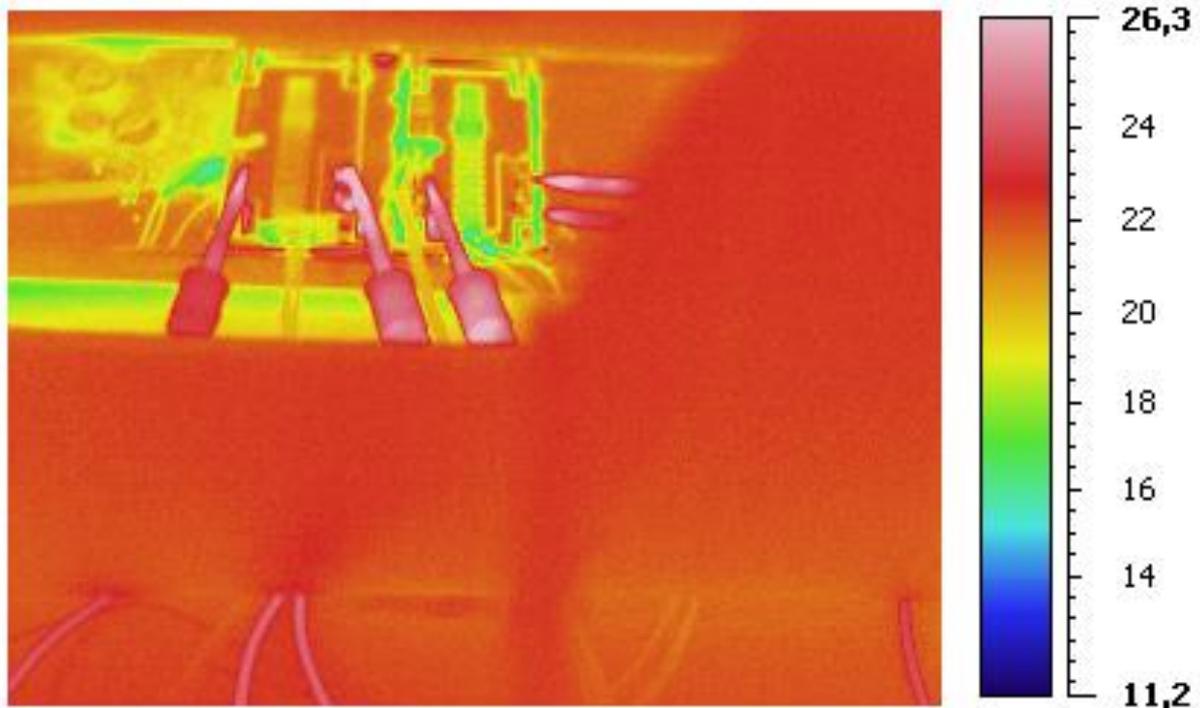


Abb. 31: Infrarotbild der durch Bestromung erwärmten Zellenassemblies; links ohne Wärmeleitpaste, rechts mit Wärmeleitpaste kühler (Foto: Suka, Bachelorarbeit S. 48)

Dieser reduzierte Wärmewiderstand ist ein erwünschtes Ergebnis. Es bestehen jedoch die beiden erwähnten Fragezeichen, ob die Haltbarkeit über 20 Jahre Betriebsdauer gegeben ist und ob sich die Ausgasungen aus der Wärmeleitpaste ggf. als unerwünschter, die Transmission reduzierender oder das Lichtspektrum verändernder Belag auf dem Glashüllrohr oder auf den Zellen niederschlägt. Da die Wärmeleitung auch durch eine bessere Anpressung mittels einer verschraubten Platte verbessert werden kann, soll lieber auf diese Lösung zurückgegriffen werden, welche unerwünschte Nebenwirkungen sicher vermeiden kann.

4. Zellenassembly

a) Verbindung von Zellenassemblies

Zur Montage der Zellenassemblies auf dem Wärmeträgerrohr siehe bereits oben 1 g). Hier muss noch die elektrische Verbindung der Zellenassemblies besprochen werden.

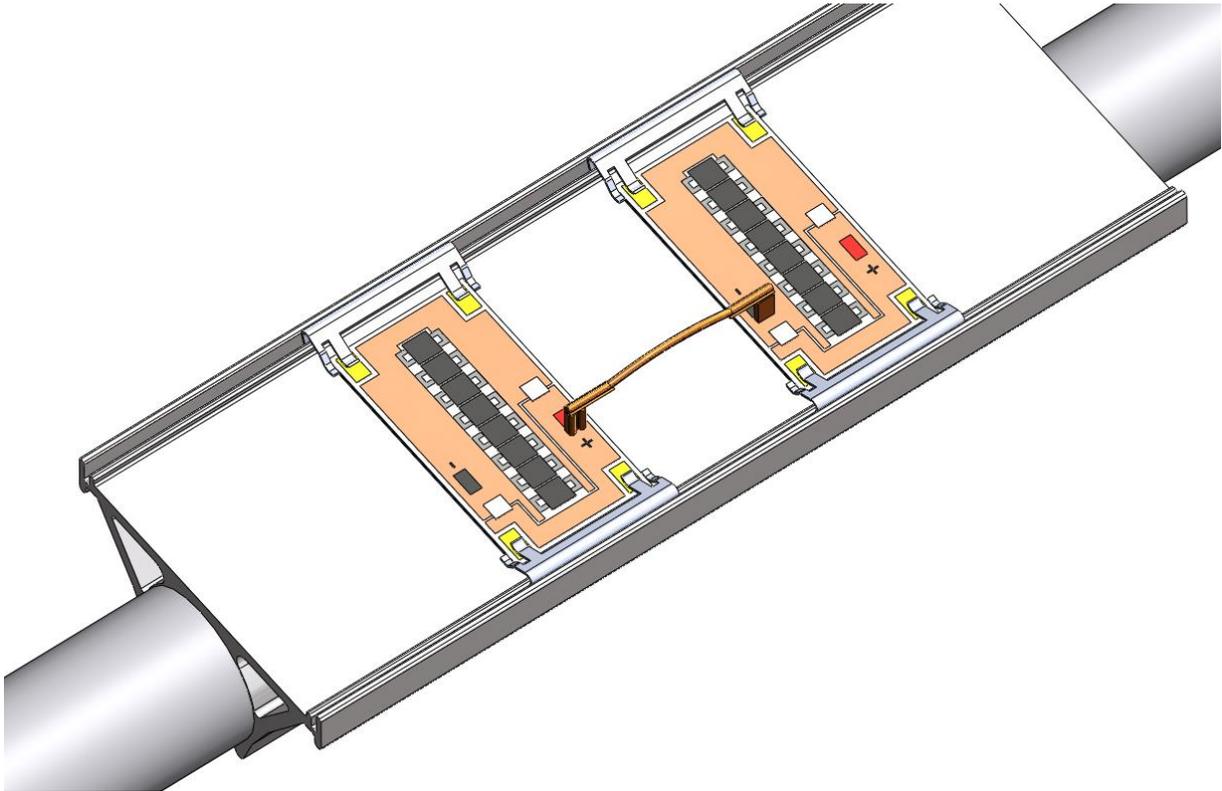


Abb. 32: 3D CAD-Zeichnung von zwei Zellenassemblies mit Verbinder auf dem Wärmeträgerrohr mit Doppelklammern (SOS)

Die aufgeklebten Verbinder stellen eine mechanisch und elektrisch sichere Verbindung der Zellenassemblies dar. Allerdings muss das Aufpressen der steifen Verbinder mit viel Fingerspitzengefühl und zugleich Kraft erfolgen und kann wohl nur schwer automatisiert werden. Im Hinblick auf die Arbeitskosten ist hier noch an andere Verbindungsweisen zu denken.

Allerdings hat der Lieferant der Zellenassemblies, Azurspace, mitgeteilt, dass er die Kontakte der Zellen nicht mehr händisch schweißen, sondern automatisch bonden möchte. Dann würden die hohen Stecker die Bonding-Maschine bei der Arbeit stören und die Stecker müssten anschließend kostspielig per Hand aufgelötet werden. Deshalb sollen auf dem Zellenassembly Kupferfahnen vorgesehen werden, welche nach dem Bonden aufgestellt werden können. Auf diese Kupferfahnen sollen dann flexible Drähte mit Glasseideisolierung aufgelötet werden. Aus Platzgründen (zur Minimierung der DCB-Fläche) soll die Verbindung der Zellenassemblies dann diagonal erfolgen.

b) Bypass-Diode

Wenn Solarzellen verschattet werden, kehrt sich die Spannung über der Zelle um und diese kann durch Umkehrströme erhitzt werden (HOT Spots), was zur Zerstörung der Zelle führen kann.

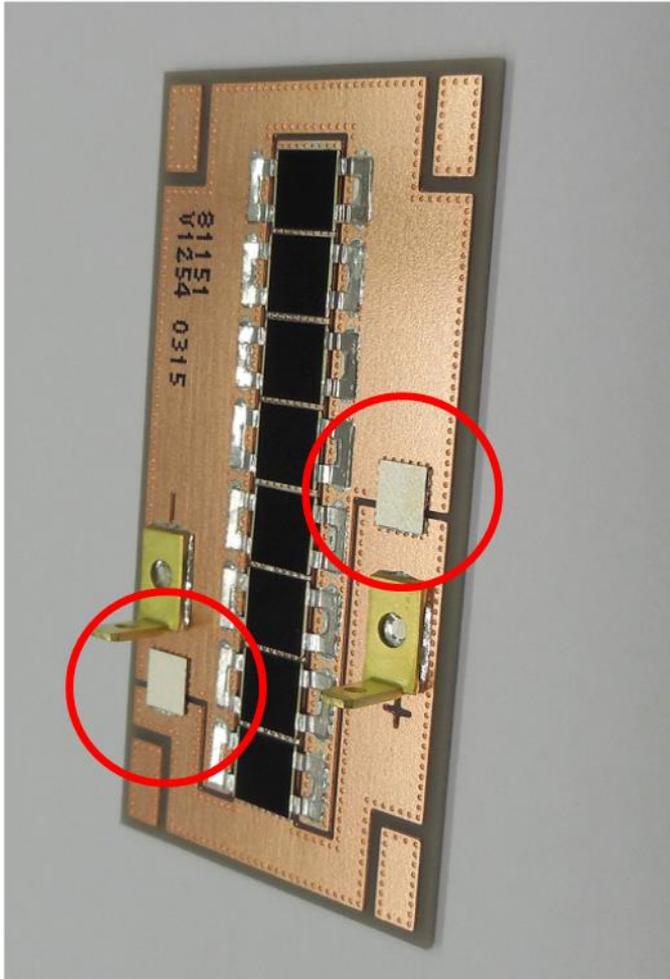


Abb. 33: Foto des Zellasemblies mit Hervorhebung der Bypass-Dioden

Bei den Tests der beiden Bypass-Diode ergab sich sowohl in Halstenbek als auch bei den Arbeiten von Marko Suka an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW), dass die Bypass-Dioden nur dann eingreifen, wenn die Verschattung der Zellen vollständig ist, so vollständig, wie dies bei einem dicken Glasrohr etwa durch Vogelexkrementen oder ein Blatt auf dem Receiver praktischerweise kaum auftreten kann. Die Schutzfunktion der Bypass-Dioden wird dadurch stark reduziert. Sie kann dann nur noch für andere Fehlerzustände wie etwa hochgradig rissige Zellen oder Unterbrechungen des Stromkreises eingreifen.

Bedenkt man zudem, dass die „Operating Junction Temperature“ der von Azurspace eingesetzten Siliziumdiode bei 175°C liegt, für die Zellen jedoch bis zu 190°C zugelassen werden sollen und dass sie dadurch auch zu einer Fehlerquelle werden können, sinkt der Wert der Bypass-Dioden erheblich. Bei den bisherigen Tests mit zwei Bypass-Dioden und 200° C Maximaltemperatur waren die Dioden noch funktionsfähig. Die Angabe von 175° C bezieht sich jedoch auf alle Exemplare der Diode, und wenn eine von 60 Dioden bereits bei 175°C zerstört wird, könnte dies die Funktionsweise des gesamten Receivers beeinträchtigen.

Gegen ein Weglassen der zweiten Bypass-Diode spricht noch, dass die Norm DIN EN 62108 in 10.17 eine Hot-Spot-Dauerprüfung vorsieht, die wohl nur mit einer Bypass-Diode bestanden werden kann. Der Test ist nicht erforderlich, wenn jede Zelle mit einer Bypass-Diode ausgestattet ist. Bei dem ungewöhnlichen Aufbau des Zellenassemblies des HOT-Receiver mit Parallelschaltung von acht Zellen wird man dafür wohl eine Bypass-Diode für jedes Zellenassembly ausreichen lassen.

Wenn man die Bypassdiode im Aufbau belässt, so sollte sie jedoch idealerweise schon bei geringerer Teilverschattung eingreifen. Und sie sollte höhere Temperaturen aushalten. Eine hohe Temperaturresistenz weisen Siliziumkarbidioden auf. Hier wurde aber bislang noch keine passende und bezahlbare Diode identifiziert.

Jedenfalls eine der derzeit redundant vorgesehenen Dioden sollte jedenfalls zur Kostensenkung (und zur Reduzierung von möglichen Fehlerquellen) weggelassen werden.

c) Temperaturkoeffizient und -beständigkeit der Zellen

Ein Vermessung der Temperaturkoeffizienten im Sonnensimulator von Marko Suka (Bachelorarbeit S. 57 bis 59) für den Temperaturbereich von 20 bis 80°C ergab einen Temperaturkoeffizienten der Leistung von -0,14%, der nur geringfügig schlechter war als der von Azurspace angegebene von -0,106%.

| | Relative Temperaturkoeffizienten a_{rel} | |
|-----------|--|-----------------|
| | Messung | Datenblatt [13] |
| U_L | -0,19 %/K | -0,135 %/K |
| I_K | 0,13 %/K | 0,080 %/K |
| P_{MPP} | -0,14 %/K | -0,106 %/K |

Tab. 1: Temperaturkoeffizient der Zellen in der Messung durch Marko Suka von 20° bis 80°C

Somit ergab sich folgende Darstellung der Temperaturkoeffizienten:

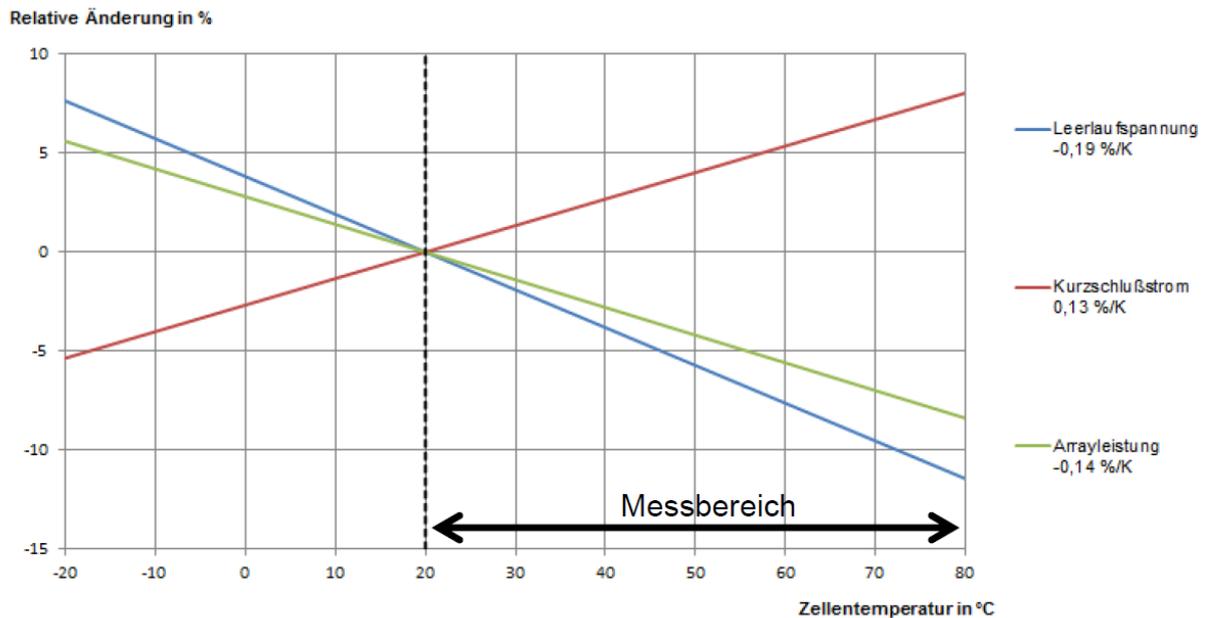


Abb. 34: Diagramm der von Marko Suka gemessenen Temperaturentwicklung von 20° bis 80°C im Diagramm

Wir haben diese Messung in Halstenbek noch einmal wiederholt, wobei das Zellassembly unter den Sonnensimulator gelegt und das Wärmeträgerrohr mit Heißluft von innen auf die gewünschten Temperaturen aufgeheizt wurde. Allerdings weist der Sonnensimulator ein in der Intensität nicht sehr homogenes, ungerichtetes Licht mit 10 bis 15 Sonnen auf, das zudem deutlich weniger UV-Licht und IR-Licht enthält als AM 1,5d NREL.

- Die Zellassemblys haben die kurzzeitigen Belastungen mit 200°C anscheinend ohne Schädigung oder Leistungsver schlechterung überstanden. Das ist ein gutes Ergebnis.
- Allerdings: Der Temperaturkoeffizient ist mit 0,23 bis 0,26% sehr viel schlechter als der auf dem Datenblatt angegebene von 0,106% und nähert sich fast schon dem Wert der von uns vorher benutzten SunPower-Zellen an (0,38% laut Datenblatt). Dabei liegt er mit Linse (Messung 5) und dadurch höherer Konzentration und Leistung mit 0,26% besonders hoch.

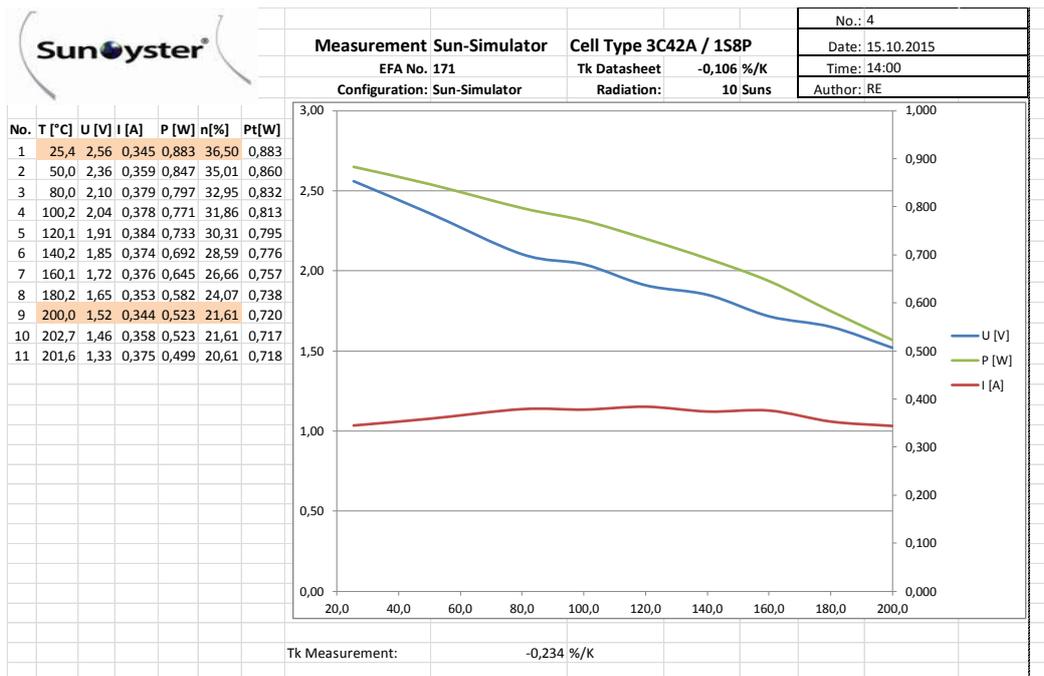


Abb. 35: Messergebnisse der Temperaturkoeffizienten aus dem Halstenbeker Sonnensimulator

- Der Wirkungsgrad sinkt – ohne Linse – bei unterstellten 15 Sonnen (Messung 4) von 24,3 auf 13,7%. Bei unterstellten 10 Sonnen (Messung 4a) sinkt er von freundlicheren 36,5 auf 20,6%.

Bei einer Literaturrecherche ergab sich eine Erklärung für den bei dieser niedrigen Konzentration schlechten Temperaturkoeffizienten (vgl. Siefer):

Zwar hängen die Temperaturkoeffizienten nicht von dem – bei der vorstehenden Messung von dem echten Sonnenspektrum abweichenden – Strahlungsspektrum ab. Sie hängen aber stark von der Stärke der Strahlung ab. Während bei einer Sonne Leistungskoeffizienten von – 0,3% relativ gemessen werden, sinken sie bei 1,000 Sonnen auf Werte von – 0,1% und weniger ab. Dies spricht für eine möglichst hohe Konzentration des Lichts.

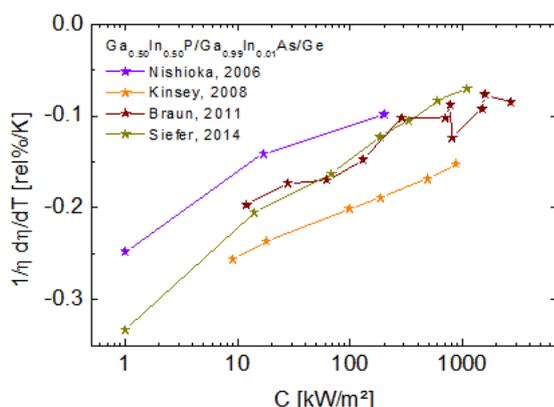


Abb. 36: Messergebnisse des Temperaturkoeffizienten in Abhängigkeit von dem Konzentrationsfaktor C (Siefer)

Und noch etwas Weiteres spricht nach Helmers et al. (Influence) für eine hohe Konzentration: Die Grenztemperatur, also die Temperatur, ab der die Teilzelle keine Spannung mehr liefert, liegt bei der Germaniumteilzelle niedriger als bei den beiden anderen Teilzellen. Bei 500 bis 1.000 Sonnen liegt sie bei rund 205 bis 220°C. Die Grenztemperatur steigt mit zunehmender Strahlungsstärke an. Wenn man also hohe Temperaturen erreichen möchte, dann muss man mit hohen Strahlungsstärken arbeiten.

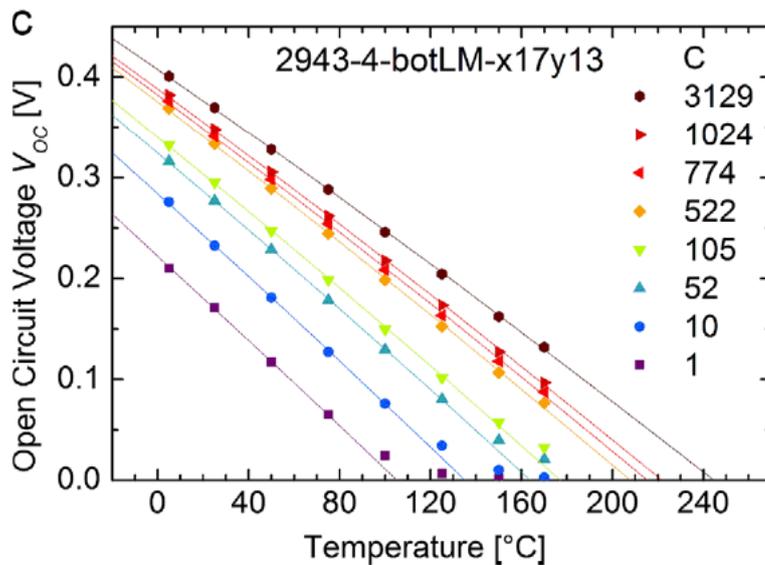


Fig. 8. Temperature dependence of the open circuit voltages ((a) $\text{Ga}_{0.50}\text{In}_{0.50}\text{P}$ top cell, (b) $\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}$ middle cell, and (c) Ge bottom cell) for various concentration ratios. Symbols represent measured data and solid lines fits after Eq. (3.3).

Abb. 37: Messergebnisse der Temperaturabhängigkeit der Leerlaufspannungen von Konzentrationsfaktoren (Helmers, Influence)

Für Anwendungen, die ganz überwiegend in dem hohen Temperaturbereich arbeiten – wie etwa zweistufige Absorptionskältemaschinen mit 140 bis 170°C – ist sogar daran zu denken, die temperaturempfindliche Germanium-Teilzelle wegzulassen oder durch ein weniger empfindliches Material zu ersetzen (so auch Helmers, Influence, S. 152).

Zur Temperaturbeständigkeit der Zellen haben wir – unter dem Siegel der Verschwiegenheit – eine Liste der Zertifikate von Azurspace erhalten, welche nachweisen, dass bei Versuchen mit 140°C und vielen hundert thermischen Zyklen keine unzulässige Degradation der Zellen eingetreten ist. Vor diesem Hintergrund haben wir auf eigene Tests zur Temperaturbeständigkeit verzichtet und die Ressourcen auf das Hauptproblem Sekundärkonzentration (siehe oben 1.) fokussiert.

d) Form bzw. Fläche der Zellen

Die von Azurspace ausgegebenen Datenblätter für die neueste Zellgeneration C44 weisen höhere Werte für die Effizienz auf, je kleiner die Zellen werden:

Die Effizienz sinkt in der Version MC/Air bei 250 Sonnen von 44% bei nur 3 mm x 3 mm Kantenlänge auf 42,9% bei 5,5 mm x 5,5 mm Kantenlänge und auf 42,1% bei 10 mm x 10 mm Kantenlänge. Ursache ist, dass die durch die Photonen in Bewegung gesetzten Elektronen in den größeren Zellen einen längeren Weg in den metallischen Kontakten zurücklegen müssen und dadurch höheren Ohm'schen Verlusten unterliegen.

Dies spricht für kleine Zellen – oder genauer gesagt für Zellen, bei denen die Wegstrecke für die Elektronen in den metallischen Kontakten kurz ist.

Zu bedenken ist nämlich noch: Das auf das Zellaassembly treffende Licht wird in den blanken und hochreflektieren Zellzwischenräumen nicht genutzt. Entgegen erster Annahmen eines Zellabstandes von 0,1 mm, konnte Azurspace den Abstand dann doch nicht geringer als 0,4 mm machen. Bei einem Zellaassembly aus 8 Zellen mit 5,5 mm x 5,5 mm Zellfläche ist dies bei sieben Zellzwischenräumen ein Abstand von 2,8 mm oder rund 6%. Bei 10 Zellen mit 3 mm x 3 mm würden es sogar 10,7 Prozent! Die Verluste durch nackte Assembly-Flächen würden damit bei den 3C44 Zellen rund 4,7% Effizienz kosten. Das wäre mehr als Azurspace an Effizienzverbesserungen erreicht hat. Und es wäre etwa das Doppelte dessen, was unvermeidbarer Weise an Transmissionsverlusten durch das saubere Glashüllrohr auftritt. Dies sollte unbedingt verhindert werden. Hierfür gibt es mehrere Möglichkeiten.

- Am nächsten liegt, die Abstände zwischen den Zellen zu reduzieren. Möglich wäre dies jedenfalls mit einer Randisolierung der Zellen, welche aber wiederum höhere Herstellungskosten mit sich bringt.
- Alternativ oder besser kumulativ eine weitere Möglichkeit ist, dass man längliche Zellen einsetzt, die in Richtung des Elektronenflusses nach wie vor 3 mm kurz sind, die quer hierzu aber z.B. 6 oder 9 mm lang sind, oder ob man eine 30 mm x 5,5 mm große Zelle herstellt. Es fragt sich jedoch, inwieweit dies möglich oder sinnvoll ist.
 - o Ein Gesichtspunkt ist zunächst, dass die Flächenausbeute aus dem runden Wafer bei größeren Zellen geringer wird. Bei nur 3 mm hohen Zellen sind diese Verluste aber sehr begrenzt und akzeptabel, bei den größeren Zellen wiegen sie schwerer.
 - o Die größere Zelle verursacht bei Azurspace einen zu bezahlenden Entwicklungsaufwand, der erst in Serie in Kauf genommen werden sollen.
 - o Ferner stellt sich die Frage, ob die länglichen Zellen größeren thermischen Spannungen ausgesetzt werden. Die 10 mm x 10 mm großen Zellen, welche Azurspace anbietet, zeigen, dass eine

Zellausdehnung von 6 oder 9 oder 10 mm grundsätzlich machbar ist und dass die Unterschiede in der Längenausdehnung zwischen dem DCB einerseits und den auf sie im Vakuum verlöteten Stapelzellen andererseits akzeptabel sind. 0,4 mm breite Zwischenräume zwischen drei 10 mm hohen Zellen würden nur 3,7% reflektierende Fläche zeigen. Drei nur 0,1 mm hohe Zwischenräume würden sogar nur 1% der Absorberfläche blank lassen.

- Schließlich könnte noch daran gedacht werden, dass nach den beiden vorstehenden Maßnahmen immer noch verbleibende Zwischenräume zumindest eine dunkle Oberfläche aufweisen, so dass die Strahlung zumindest absorbiert und in Wärme umgewandelt wird. Bei nur noch 1 % reflektierender Fläche wäre allerdings zu prüfen, ob sich der damit verbundene Aufwand noch lohnt.

d) Leistungsverlust durch Potentialausgleich

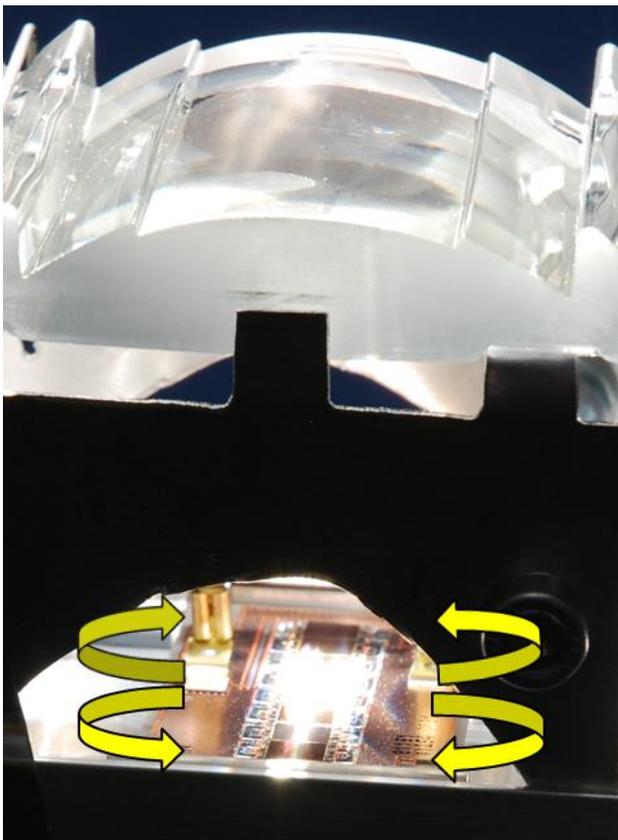


Abb. 38: Foto der Strahlungsverteilung auf dem Zellaassembly mit Opsira-Linse

Bei sehr ungleichmäßiger Ausleuchtung der Zellen gegenüber anderen Zellen kam es zu einem deutlichen Absinken der Spannung: Während bei drei durch den kleinen SunOyster Crystal gleichmäßig beleuchteten Zellen die MPP-Spannung 2,6 V betrug,

sank sie bei fünf durch den großen, etwas suboptimal beschaffenen Crystal auf etwa 2,4 V ab und erreichte bei der sehr schwachen Ausleuchtung der ein oder zwei äußeren Zellen des Zellasemblies unterhalb der Opsira oder der ISE-Linse nur noch 2,2 V.

Gedeutet wird dies so, dass es dann zu Querströmen auf dem Zellaassembly kommt, welche die Spannung des Assemblies absinken lassen.

Mit einem perfekt geformten SunOyster Crystal und entsprechend großen Zellflächen sollte sich eine hohe Spannung erreichen lassen.

f) Kommerzielle Perspektiven der Zellasemblies

aa) Perspektivische Kosten der Angebote von Azurspace

Unser Lieferant Azurspace wurde um eine Indikation gebeten, mit welchen Kosten neben der zurückliegenden Nullserienlieferung, nämlich bei einer Kleinserienlieferung und bei einer jährlichen Lieferung von 150 MW an Zellasemblies unterschiedlicher Beschaffenheit zu rechnen ist. Die Angaben sollen in der folgenden Tabelle zusammengefasst werden:

| Zahl und Beschaffenheit der Zellasemblies | Kosten pro Assembly | Kosten pro lfdm Meter bei 15 Assemblies pro m |
|--|---------------------|---|
| 320 Zellasemblies 8x5,5mmx5,5 mm Keramik AlN | 31,25 | 468,75 |
| 8500 Assemblies 8x3mmx3mm Keramik AlN | 19,12 | 286,80 |
| 8500 Assemblies 8x3mmx3mm Keramik Al2O3 | 18,15 | 272,25 |
| | | |
| 150 MW Assemblies 8x3mmx3mm Keramik AlN | 7,92 | 118,80 |
| 150 MW Assemblies 8x3mmx3mm Keramik Al2O3 | 5,61 | 84,15 |
| 150 MW 10x2mmx2mm AlN | 6,57 | 98,55 |
| 150 MW 10x2mmx2mm Al2O3 | 4,60 | 69 |

Tab. 2: Preise für Zellasemblies

Der letztgenannte indikative Preis von 69 Euro pro lfdm liegt unter dem Zielwert von 80 Euro pro lfdm für die Zellkosten. Er entspricht (bei 30% Wirkungsgrad und damit 560 W Leistung pro lfdm) Zellkosten von 123 Euro pro kW. Allerdings ist die dort für nur 20x2 mm Zellfläche zugrunde gelegte ultrahohe Konzentration von über 2,000 Sonnen technisch zu riskant. Zu bedenken ist jedoch, dass alle genannten Preise

noch nicht verhandelt sind und die zu erwartende Lernkurve bis zur Realisierung der Serienproduktion noch nicht berücksichtigt ist.

Danach erscheint es realistisch, dass der Zielpreis von SOS für die Zellassemblies erreicht werden kann.

Dies gilt umso mehr, als Azurspace in der zweiten Hälfte 2016 die Entscheidung getroffen hat, in eine automatische Fertigung von Zellassemblies (sowie auch von CPV-Modulen) zu investieren. Von der Zellassemblies-Fertigung mit automatischem Bonding wird auch der HOT-Receiver profitieren.

bb) Allgemeine Überlegungen zur Lernkurve für Halbleiter

In der konventionellen Fotovoltaik wurde über viele Jahre eine Lernkurve erreicht, die bei einer Verdoppelung der Produktionsmenge jeweils eine Kostensenkung um 20% zeigte. Bei den Konzentration-Zellassemblies handelt es sich um Module ähnlicher Halbleiter, die grundsätzlich ähnliche Kostensenkungen erwarten lassen sollten wie PV-Module. Da die Konzentration-Zellen noch komplizierter aufgebaut sind, könnte der Lerneffekt vielleicht sogar noch größer sein als bei den vergleichsweise einfachen Siliziumzellen. Beim Hochskalieren von den derzeit bestellten ca. 13,5 kW elektrischer Leistung auf eine industrielle Produktionskapazität von 150 MW, dessen Anlagegüter über 10 Jahre abgeschrieben werden, ergibt sich bei insgesamt 1.500 MW Produktionsmenge folgendes Bild:

| Produktionsmenge (MW) | Kosten in Euro/ lfdm | Kosten in Bezug auf Anfangskosten von 100 |
|------------------------------|-----------------------------|--|
| 0,01 | 468,75 | 100,00 |
| 0,03 | 375,00 | 80,00 |
| 0,05 | 300,00 | 64,00 |
| 0,11 | 240,00 | 51,20 |
| 0,22 | 192,00 | 40,96 |
| 0,43 | 153,60 | 32,77 |
| 0,86 | 122,88 | 26,21 |
| 1,73 | 98,30 | 20,97 |
| 3,46 | 78,64 | 16,78 |
| 6,91 | 62,91 | 13,42 |
| 13,82 | 50,33 | 10,74 |
| 27,65 | 40,27 | 8,59 |
| 55,30 | 32,21 | 6,87 |
| 110,59 | 25,77 | 5,50 |
| 221,18 | 20,62 | 4,40 |
| 442,37 | 16,49 | 3,52 |
| 884,74 | 13,19 | 2,81 |
| 1769,47 | 10,56 | 2,25 |

Tab. 3: Theoretische Lernkurve für die Kosten von Zellassemblies

Diese Überlegungen legen bereits für die ersten 150 MW nahe, dass die Kosten mit 20 bis 25 Euro pro lfdm die Zielkosten von 80 Euro deutlich unterschreiten sollten. Über einen Produktionszeitraum von 10 Jahren oder 1.500 MW sollten bei einer ähnlichen Lernkurve sogar Zellkosten für den laufenden Meter von nur 10 bis 13 Euro möglich werden. Das entspräche Zellkosten pro kW von 18 bis 23 Euro.

5. Lichtfalle/ Befestigung der Linse

Der Lichtfalle war die doppelte Funktion zugeordnet, die Linse sicher zu halten und zugleich für zusätzliche Lichtlenkung zu sorgen.

Auch wenn die Lichtfalle durch die neue Form der Linse, den SunOyster Crystal, vollständig entfällt, sei hier der Vollständigkeit halber kurz auf älteren Überlegungen eingegangen.

a) Bau und Test

Weil unsere gängigen Lieferanten die Lichtfalle nicht herstellen konnten, wurde die Konstruktion geändert. Von der Seite betrachtet hat die Lichtfalle jetzt eine einfache M-Struktur, in die in der Mitte ein H gesägt wird, welches nach unten geklappt wird. Diese Lichtfalle konnte von einem Feinblechverarbeiter präzise verarbeitet werden.

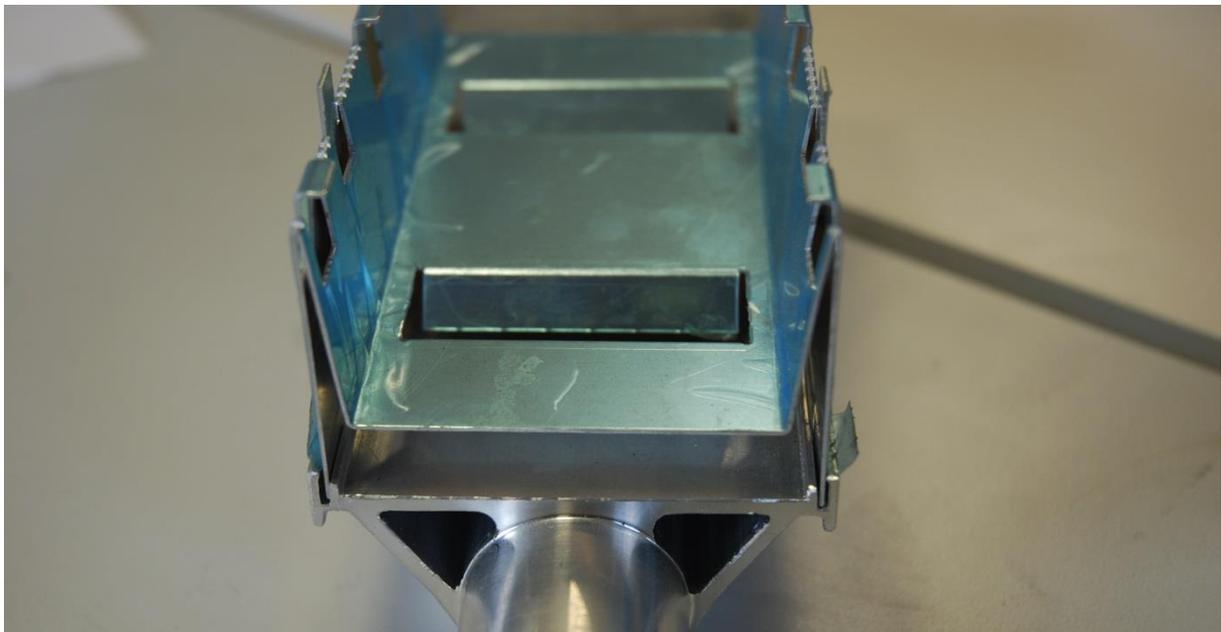


Abb. 39: Foto der Lichtfalle von der Seite (noch mit Schutzfolie)

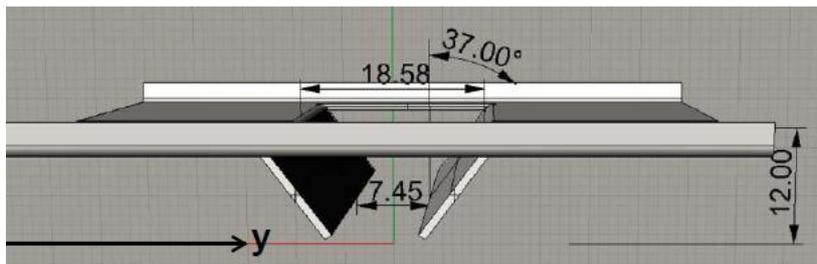


Abb. 40: CAD der Lichtfalle von der Seite

Die Lichtfalle erfüllt ihre Funktionen, wenngleich in Grenzen.

Das gilt zunächst für die Tragfunktion für die Linse. Sie ist bei dem nur 0,7 mm dicken Alublech unter normalen Bedingungen gegeben. Im Fall einer Stagnation in der Leitung, bei der es zu Temperaturen von etwa 300°C im Receiver-Rohr kam, wurde das Aluminium aber so weich, dass es sich der Schwerkraft folgend verzogen hat. Auch wenn Stagnationsschäden ausgeschlossen werden sollen – und in Zukunft durch einen Temperaturschalter im Receiver, der bei 175°C auf dem Rohr das Sicherheitssystem der SunOyster auslöst und diese geschlossen wird, auch sicher ausgeschlossen werden – so wäre eine größere Wandstärke zur sicheren Verhinderung langfristiger Verformungen wünschenswert.

Daneben führt die Lichtfalle bei guter Ausrichtung zu einer leichten Leistungssteigerung der Zellen. Besonders deutlich wird dies bei Messungen ohne Linse. Hier wurde die Leistung um etwa 22% gesteigert.

Bei Messungen mit Linse dominiert diese die Leistung; die Lichtfalle kann – auf einem höheren Niveau - aber immer noch eine Leistungssteigerung um 10% bewirken.

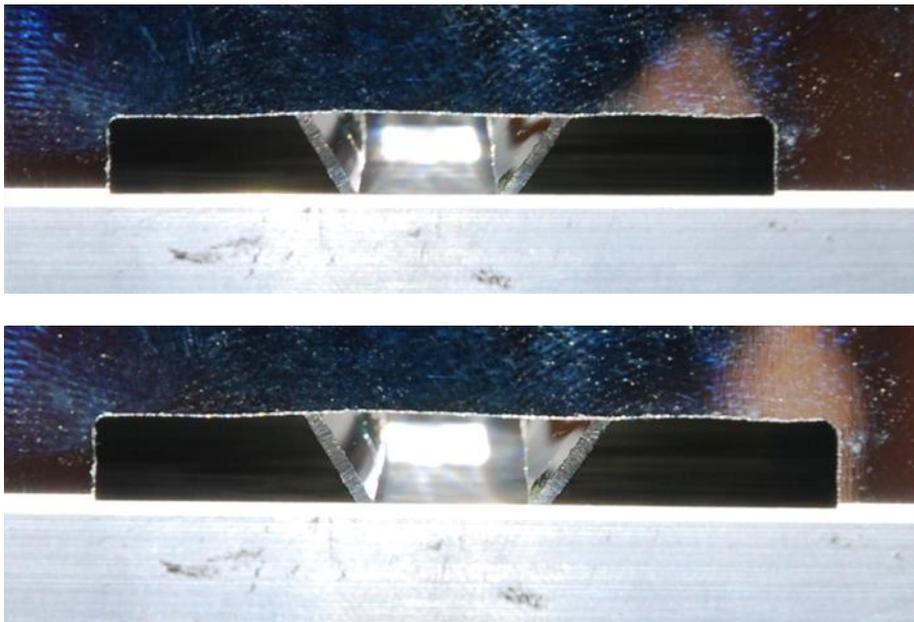


Abb. 41: Fotos der Lichtfalle mit besserer (oben) und schlechterer (unten) Ausrichtung im Azimut

Bei dem Einsatz einer Lichtfalle kommt es nach den Erfahrungen des Teams Konzentrationsoptik des Fraunhofer ISE weniger darauf an, dass sie oben möglichst nah an die Linse herangeführt wird. Wichtiger ist, dass sie unten möglichst nah an die Zellen heranrückt. Da sich Zellen und deren Anschlüsse einerseits und Lichtfalle andererseits jedoch auf einem unterschiedlichen elektrischen Potential befinden, darf der Abstand zur Vermeidung eines elektrischen Überschlags (siehe dazu unten 4 e)) nicht zu klein werden und 2 mm jedenfalls nicht unterschreiten.

b) Montagefreundlichkeit

Da die Lichtfallen aus Fertigungsgründen so kurz gestaltet wurden, dass sie nur jeweils zwei Linsen und einen Glaskörper tragen, müssen sie jeweils einzeln befestigt werden. Kleber, der ausdünsten oder versagen könnte, soll nicht zur Befestigung verwendet werden. Deshalb haben wir uns zur Befestigung der Lichtfallen mit Schrauben entschieden. Da die Lichtfallen und die Aluminiumprofile jedoch jeweils aufgesetzt, vorgebohrt, gereinigt, wieder aufgesetzt und mit 30 Schrauben pro Seite verschraubt werden müssen, ist der Vorgang sehr aufwändig.

Zur Vermeidung dessen soll die Lichtfalle an ihrem Fuß so umgebogen werden und in eine extrudierte gekrümmte Nut eingeschoben werden, dass sie schon dadurch fest sitzt. Anstelle von Schrauben könnte die Lichtfalle genietet werden.

c) Befestigung des SunOyster Crystals

Der SunOyster Crystal wird mit einem hochtransparenten, vergilbungsfesten und temperaturbeständigen Silikon, Sylgard 184, auf den Zellen befestigt. Dieses hat allerdings in erster Linie eine optische Funktion. Die Haftung ist demgegenüber begrenzt.

Zur Erhöhung der Haftung wird auf beiden Seiten, Linse und Solarzellen, nach der Reinigung mit Aceton, ein Primer aufgetragen. Dies muss allerdings sehr dünn geschehen, weil das Primern sonst eher kontraproduktiv ist.

Eine höhere Haftung könnte noch mit einer Plasmabehandlung der Zelloberfläche erreicht werden, wobei von den drei angewandten Verfahren Niederdruck, Kammervorgang und Atmosphärendruckverfahren vor allem Letzteres vorliegend interessant sein könnte. Ein Beispiel für die Veränderung der Oberfläche zeigen die folgenden Bilder für den Kunststoff POM:

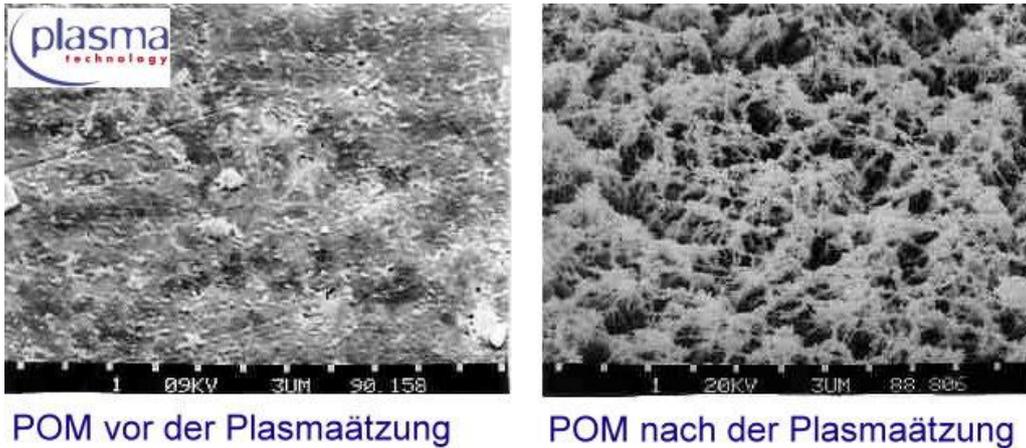


Abb. 42: Bilder des Kunststoff POM vor und nach der Plasmaätzung

In jedem Falle wird der fast 200 g schwere Glaskörper aber noch eine weitere Halterung brauchen, um sicher für mindestens 20 Jahre auf den Zellen zu sitzen. Hierfür wurde daran gedacht, die Seitenwände des Aluminiumrohres hochzuziehen und die Linse mit Federn zu befestigen.

Dabei muss allerdings darauf geachtet werden, dass die Halterung am Pressflansch der Linse gut herstellbar ist, ohne dass das Glas nach dem Pressen aufwändig bearbeitet werden muss oder bricht. Letztlich haben wir uns für eine nur leichte breitere Rille auf dem Pressflansch der Rille entschieden, in die ein Federstahlband eingelegt und unten am Wärmeträgerrohr befestigt wird. Die Befestigung soll mit selbstschneidenden Edelstahlschrauben realisiert werden, die in einen Schraubenkanal im extrudierten Wärmeträgerrohr greifen. Diese Art der Befestigung wird schon seit längerem bei der Befestigung von Kühlkörpern in der Elektronik verwandt. Es ist dabei besonders wichtig, dass keine freien Metallspäne entstehen oder diese bei der Entstehung vollständig abgesaugt werden.

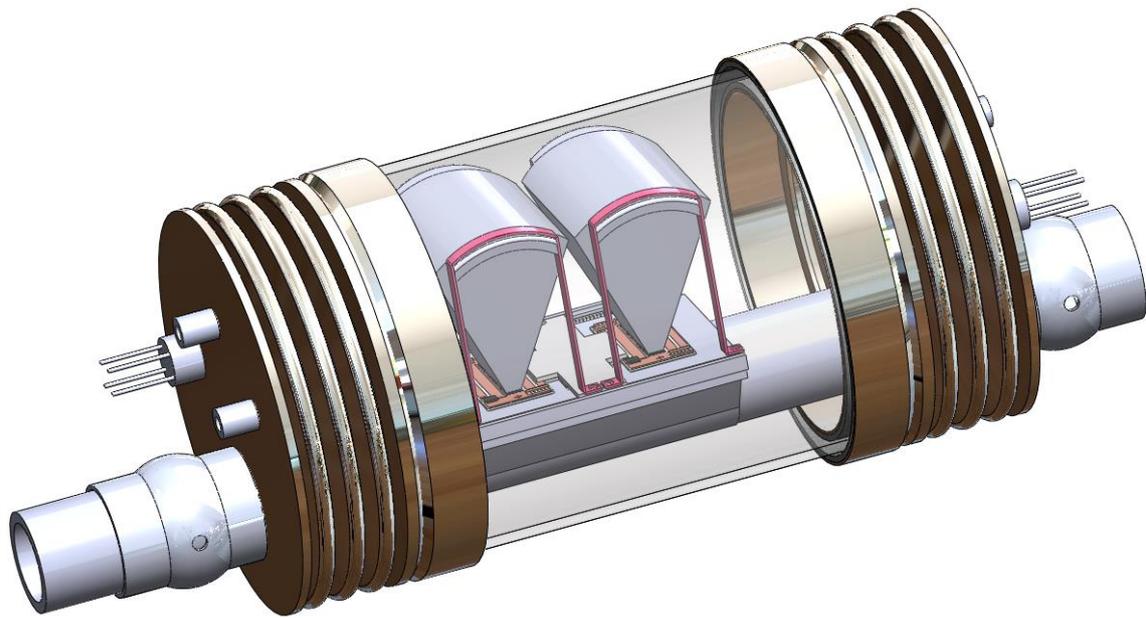


Abb. 43: 3 D CAD-Modell der Befestigung des SunOyster Crystal auf dem Wärmeträgerrohr mit Kompensatoren

6. Hüllrohr, Verschlusskappe und Füllung

a) Transmission durch das Glashüllrohr

Das Glashüllrohr mit Anti-Reflexbeschichtung glänzt sichtbar weniger als das nicht entspiegelte Glas. Nach einer Vermessung durch das Fraunhofer ISE vom 22.10.2012 verbessert sich die Transmission vor allem im Bereich des sichtbaren Lichts, aber auch im UV-Bereich, ganz erheblich.

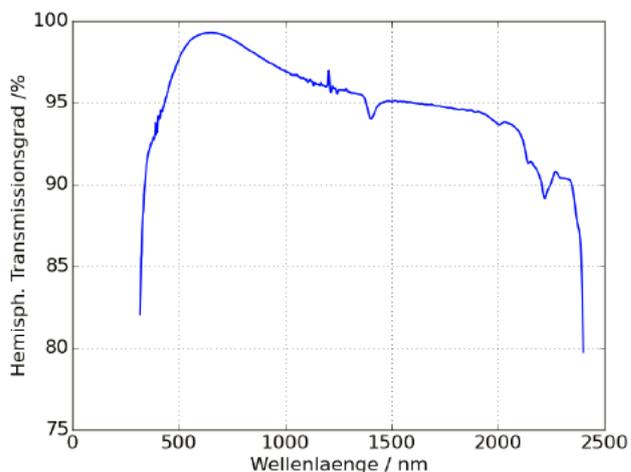


Abb. 44: Messkurve der Transmission durch das Glashüllrohr (Fraunhofer ISE)

Da die untere Germanium-Teilzelle für die Infrarotstrahlung typischerweise die stromstärkste Zelle ist, während die beiden oberen Teilzellen den Strom begrenzen, sollte es durch mehr kurzwelliges Licht auch zu einer effektiven Erhöhung des Stromes durch die Zelle kommen.

Denkbar ist, den Innen- und damit Außendurchmesser des Rohres zu erhöhen, um eine längere Brennweite der Linse zu ermöglichen. Es gibt mit Bohemia Crystal in Tschechien einen Hersteller, der Borosilikat-Glasrohr mit 150 mm Außendurchmesser bei gleichbleibenden 3 mm Wanddicke anbietet, während der deutsche Hersteller Schott bei dieser Größe auf 5 mm Wandstärke geht und die Rohre dadurch sehr viel schwerer (und teurer) macht. Um eine große Zahl von möglichen Lieferanten für das Glasrohr – und den zugehörigen Kompensator! – zu haben und das Gewicht des Receivers nicht noch weiter zu erhöhen, soll es jedoch möglichst bei 125 mm Außendurchmesser bleiben.

b) Testergebnisse und Weiterentwicklung der Verschlusskappe

Die Verschlusskappe hat sich im Wesentlichen bewährt.



Abb. 45: Foto von vier Kompensatoren mit Rohrdurchführung, Kabeldurchführung und Füllventil

Wie Helium-Lecktests durch den Hersteller Polo Italia gezeigt und eigene Tests bei Überdruck im Wasserbecken bestätigt haben, sind die von Polo Italia gefertigten

Verschlusskappen trotz der teilweise sehr geringen Wandstärken von nur 0,2 bis 0,3 mm Edelstahl dicht. Bis auf eine Ausnahme: Hier waren auf das Edelstahl des Faltenbalgs (bellows) kleine Schweißperlen vom Verschweißen der Flansche gekommen, die den Stahl beschädigt und an einer Stelle durchdrungen haben. Dies ist in Zukunft zu vermeiden. Ferner sollte die Qualitätskontrolle der nach dem Schweißen noch einmal nachgeschnittenen Gewinde verbessert werden.

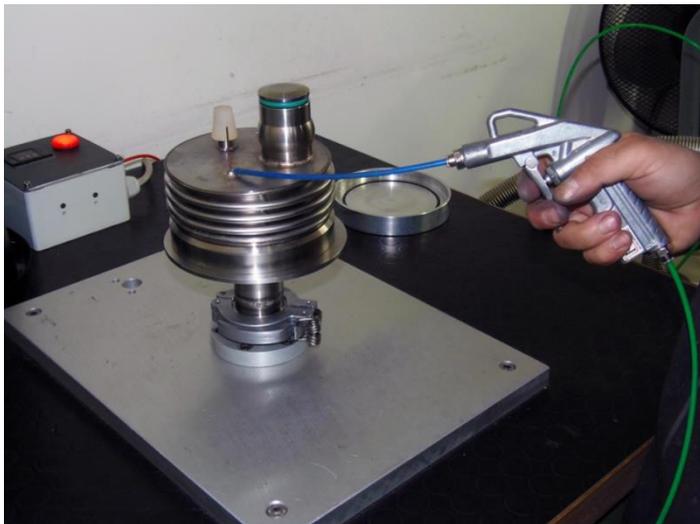


Abb. 46: Fotos von Helium-Lecktests (Polo Italia)

Die mechanische Festigkeit der Verklebung mit den Silikon-Klebern von Henkel Loctite 5615 A&B (2 K Klebstoff, Mischungsverhältnis 1:2, Shore A 34, Gbus 1,3 bis 180 °C, Farbe schwarz) und des Loctite SI 5612 (2 K Klebstoff, Mischungsverhältnis 1:4, Shore A 45, Gbus 1,5, bis 220 Grad °, Farbe rot) sowie von Bodo Möller CAF 99 (2 K Klebstoff, Mischungsverhältnis 1:2, Shore A 51, bis 250°, kurzfristig bis 300°C, Farbe schwarz) war sehr zufriedenstellend. Ein zerstörungsfreier Auseinanderbau ist – im Hinblick auf die dadurch ausgeschlossene nochmalige Verwendung von Testkomponenten „leider“ – nicht möglich. Der ebenfalls getestete Viton-Kleber von AET Lezaud löst sich jedoch leicht von den Untergründen und

scheidet als Kleber aus. Insoweit wurde nur die Viton-Dichtmasse desselben Herstellers LEZ-VIT Seal (1 K, Härte Shore A 70, bis 200°C, kurzzeitig 315° C) als ergänzende Siegelung des Silikonklebers genutzt.

Die Temperaturbeständigkeit der Henkel-Kleber reicht bis 180° bzw. 220°C, der von Bodo Möller kurzzeitig bis 300°C. Bei einem Fall der Stagnation in der Zuleitung kam es zu einer starken Temperaturerhöhung in der Röhre auf wohl 300°C. Dabei ist es zu einem deutlich erhöhten Innendruck gekommen. War der Druck bei Zimmertemperatur zuvor etwa 1,5 bar, so hat er sich durch die Verdoppelung der (absoluten) Temperatur auf vermutlich knapp 600 K (gut 330°C) nach der Formel $p_1 \cdot V_1 / T_1 = p_2 \cdot V_2 / T_2$ bzw. bei etwa konstantem Druck auf $p_2 = T_2 / T_1$ etwa auf 3 bar verdoppelt. In dieser Situation ist der Teil des Kompensators, der auf dem Wärmeträgerrohr sitzt, etwa 1,5 cm nach außen geschoben worden. Der bis 220°C beständige Kleber von Henkel muss in dieser Situation also seine Klebekraft verloren haben, vielleicht auch dadurch, dass er verbrannt oder aufgeschmolzen ist. Auch die Madenschrauben, die durch die beiden Fülllöcher des das Wärmeträgerrohr umschließenden Rings gedreht wurden, haben dieses Verrutschen nicht aufhalten können. Hier kann in Zukunft noch eine kleine Bohrung gesetzt werden, damit sich die Madenschrauben besser am Wärmeträgerrohr halten können. Als Konsequenz sollen die Receiver nur mit etwa 0,5 bar inertem Gas gefüllt werden, damit sie auch bei der Erhöhung der Innentemperatur auf rund 170°C noch einen Unterdruck aufweisen und die Kompensatoren nach innen zusammen ziehen.

Die verklebten Verschlusskappen sind hermetisch dicht. So halten sowohl auf Unterdruck als auch auf Überdruck gebrachte verschlossene Glasrohre ihren Ausgangsdruck.

Eine Herausforderung stellt allerdings die Diffusionsdichtigkeit für Wasserdampf dar. Ein mit Argon mit 1,5 bar gefüllter Receiver wurde mit jeweils einem empfindlichen Sensor für Feuchtigkeit ausgestattet, der eine Messgenauigkeit von +/- 1 Prozent aufweist. Dieser Sensor zeigte bei zwei 20 cm Prüfstücken mit aufgeklebten Kompensatoren folgende Ergebnisse an:

| Zeit | Verklebung mit 180° C Henkel-Kleber und Viton Dichtmasse | Verklebung mit 180° C Henkel-Kleber |
|-------------------|--|--|
| 22.9. morgens | 0,1% | 0,1% |
| 22.9. nachmittags | 0,75% | 2,25% |
| 23.9. | 12,20% | 12,98% |
| 25.9. | 15,27% | 16,71% |
| 2.10. | | 23,12% |

Tab. 4: Messergebnisse zur relativen Luftfeuchtigkeit

Leider hörten die Sensoren am 2.10 aus ungeklärten Gründen auf, Ergebnisse anzuzeigen, so dass die Messreihe nicht weiter fortgesetzt werden konnte. Wie zu erwarten, drang bei dem Receiver mit zusätzlicher Viton-Abdichtung weniger

Feuchtigkeit ein. Die gemessenen Werte waren aber insgesamt überraschend hoch und im Hinblick auf die Empfindlichkeit von Germanium gegenüber Wasser unerfreulich.

Ein einjähriger Langzeittest eines kurzen Testreceivers mit dem Kleber von Bodo Möller und dem Viton Dichtstoff – der über das Jahr seinen starken Unterdruck gehalten hatte – ergab in graphischer Darstellung folgende Werte für die relative Luftfeuchtigkeit über die Tage eines Jahres:

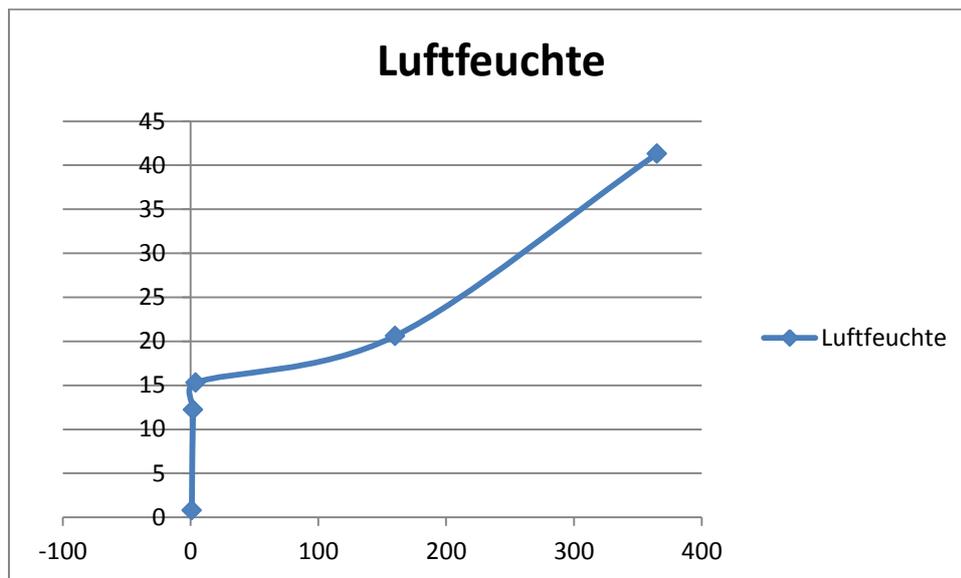


Abb. 47: Messkurve der relativen Luftfeuchte über die Tage eines Jahres

Obwohl hermetisch dicht, zogen die Receiver also bis zu 42% relative Luftfeuchte (bei einer Umgebungsluftfeuchte von 66%). Bei den 4-Meter-Testreceivern auf der Freilandanlage sind allerdings – im Gegensatz zu früheren hybriden Receivern mit Siliziumzellen und einfacherem Verschluss – keine Spuren von kondensierendem Wasser festzustellen.

Es erscheint demnach denkbar, dass bei der geplanten fünfjährigen Regelwartung die Ventile am Kompensator geöffnet, das im Receiver befindliche Gas aus dem Receiver gezogen und dieser frisch mit inertem Gas gefüllt wird.

Besser allerdings wäre noch eine stärkere Barriere gegen Diffusion von Wasserdampf.

Dafür sollen nunmehr vier Barrieren aufgebaut werden:

- Die Verklebung mit dem Silikonkleber;
- Dann eine in den Zwischenraum zwischen Glass und Metall eingepresste Metallschnur, z.B. aus Blei (muss recycelt werden!);
- Anschließend eine Versiegelung mit Viton und
- Schließlich eine Abdeckung aus kräftigem Aluklebeband.

Zum Konzept der **Durchführungen durch den Kompensator:**

Zur elektrischen Durchführung muss noch bedacht werden, dass SOS zur sicheren und schnellen Überwachung der Receiver-Temperatur und zur Abschaltung bei unzulässig hohen Temperaturen nunmehr in jedem Receiver einen Temperaturschalter auf einem Zellaassembly auf der warmen Seite des Receivers platzieren möchte. Durch diesen Temperaturwächter werden zwei weitere Drahtdurchführungen benötigt, insgesamt mit den beiden Leistungskabeln also vier. Der Lieferant der Kabeldurchführungen, Allectra, bietet eine Vierfachdurchführung an, die eingesetzt werden kann. Setzt man diese Vierfachdurchführung nur bei dem Kompensator auf der heißen Seite ein, so kann man den Temperaturschalter auf dieser Seite montieren. Das Leistungskabel muss man dann im Inneren der Glasröhre – z.B. eingelegt in einen der Hohlräume des Wärmerträger-Rohrs – auf die Seite mit der Durchführung zurückführen.

Vorteil ist, dass die Vierfachdurchführung preiswerter ist als zwei Zweifachdurchführungen und erst recht als vier Einfachdurchführungen. Außerdem werden die Leckrate und der Verarbeitungsaufwand für die Kompensatoren bei nur einer Durchführung geringer. Weiterer Vorteil ist, dass die Kabel nur auf einer Seite durch den Receiver-Arm bzw. in der die Isolierung geführt werden müssen – und wenn man dies auf die Seite der Steuerung setzt, werden auch noch alle Anschlusskabeln kürzer. Dies soll künftig so gemacht werden.

c) Füllung des Glashüllrohrs

Anstelle eines ursprünglich geplanten Überdrucks kann ein Unterdruck, der die Kompensatoren nach innen zieht, im Hinblick auf die dauerhafte Dichtigkeit des Receivers besser sein. Deshalb muss noch einmal näher überprüft werden, wie ein elektrischer Überschlag verhindert werden kann. Bei bestimmten Spannungen kann es zu einem elektrischen Durchschlag kommen. Dabei ergibt sich für unterschiedliche Gase ein unterschiedlicher Verlauf. Bei geringen Drücken (Nahdurchschlagsbereich) ist die für einen Durchschlag erforderliche Spannung ebenso wie hohen Drücken komfortabel hoch. Dazwischen ergibt sich das sog. Paschen-Minimum, unterhalb dessen kein Durchschlag erfolgt. Bei Argon liegt dieses Minimum bei etwa 100 V, bei Stickstoff bei 250 V und zwar bei $7,3 \text{ mbar} \cdot 1 \text{ cm}$. Bei einem bar also bei $7,3 \text{ }\mu\text{m}$. Im HOT-Receiver sind die Bauteile unterschiedlichen elektrischen Potentials nach bisheriger Gestaltung nur wenige Millimeter voneinander entfernt, und insbesondere für das Zellaassembly ist eine große räumliche Nähe zur Flächenminimierung ausdrücklich wünschenswert. Bei 2 Millimetern liegt das Paschen-Minimum dann bei 3,65 mbar. Dieser Druckbereich muss entsprechend vermieden werden, weil dann ein Durchschlag erfolgen könnte.

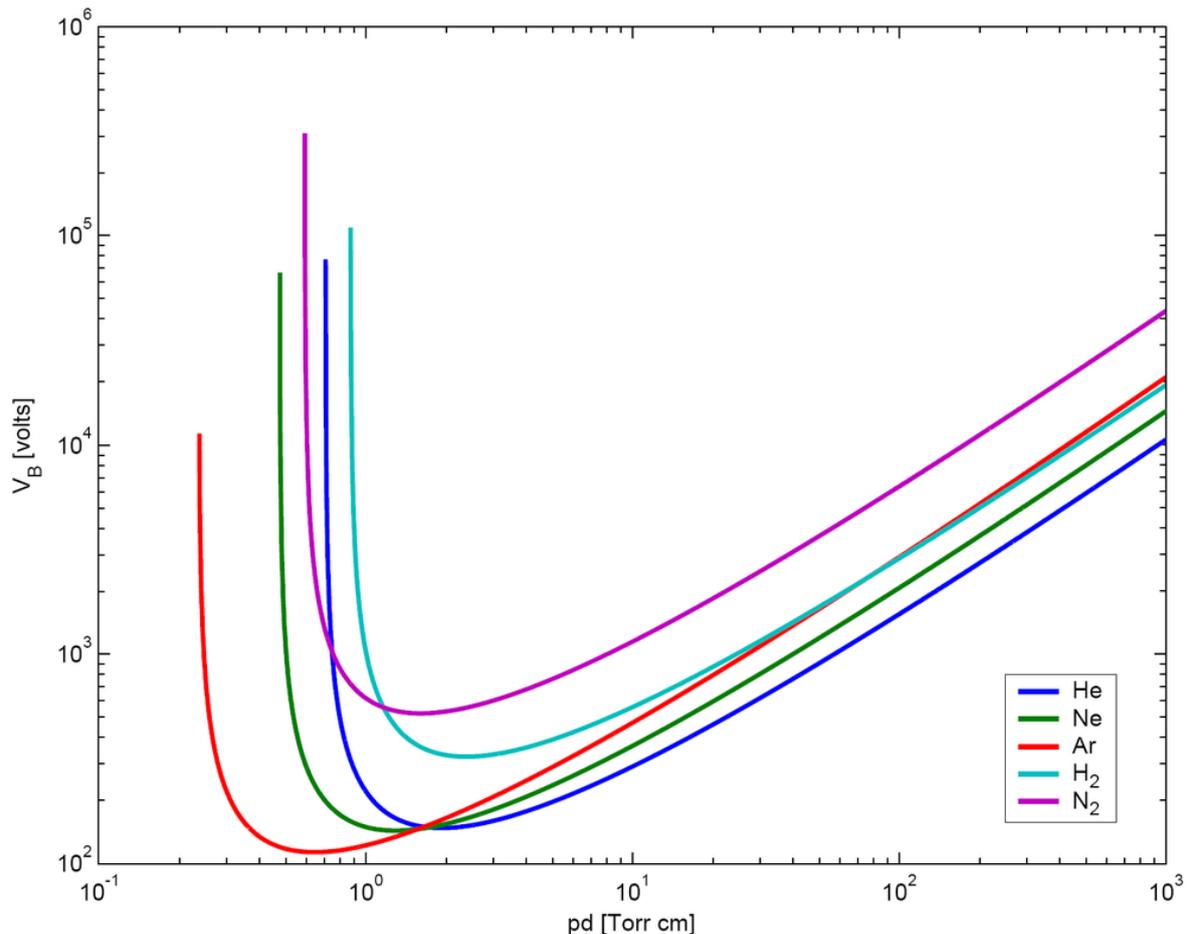


Abb. 48: Darstellung der Paschen-Kurve (Quelle: Wikipedia)

Wenn wir nach einer Temperaturerhöhung auf 200°C im Receiver immer noch einen Unterdruck p_2 von maximal 800 mbar haben wollen, damit der Kompensator zusammengezogen wird, dann muss der Druck p_1 bei Zimmertemperatur $p_2 \cdot T_1 / T_2 = 800 \text{ mbar} \cdot 303,15 \text{ K} / 473,15 \text{ K} = 513 \text{ mbar} = 0,513 \text{ bar}$ sein. Bei diesem Druck und 2 mm Abstand, also einem $p \cdot s$ von 0,1 bar*mm nach der Formel $U_d / \text{min} = B \cdot (p \cdot s)$ bei B von Stickstoff von 25,5 kV/mm*bar ergibt dies einen Durchschlag bei 2550 V. Angesichts von geplanten Betriebsspannungen von etwa 200 bis 500 V sollte dies eigentlich ausreichend sein, vorausgesetzt, die Werte verschlechtern sich nicht durch Faktoren wie eindringenden Wasserdampf.

Zudem befindet sich nicht überall ein homogenes elektrisches Feld. Insbesondere an Graten können sich höhere Feldstärken ergeben, die bereits bei einer niedrigeren Spannung zu Überschlägen führen. Außerdem testet der TÜV mit einer erhöhten Spannung von 1000 V plus zweimal die Systemspannung, also bei einer Systemspannung von 500 V bis zu 2000 V. Unter diesen Bedingungen könnte ein Abstand von nur 2 mm möglicherweise zu Durchschlägen führen. Verhindert werden könnte dies bei gleichbleibenden Abständen und Drücken nur durch ein Gas mit deutlich höherer Durchschlagsfestigkeit. Kohlendioxid CO₂ kann knapp doppelt so gut sein wie Stickstoff. Insbesondere wird das Isoliergas Schwefelhexafluorid SF₆ für

dreimal besser gehalten. Nachteil dieses Gases ist aber neben seinem höheren Preis insbesondere ein Treibhausgaspotential bei Freisetzung, das noch 23.900mal höher ist als das des klimaschädlichen CO₂. Es scheidet deshalb für uns aus.

7. Überlegungen zur Fertigung des HOT-Receiver

a) Manuelle Fertigung

Die bisherigen Modelle und Prototypen des HOT-Receiver wurden manuell, insbesondere von unserem Werkstattleiter Stephan Ulrich, hergestellt. Dabei wurden teilweise Schablonen genutzt.

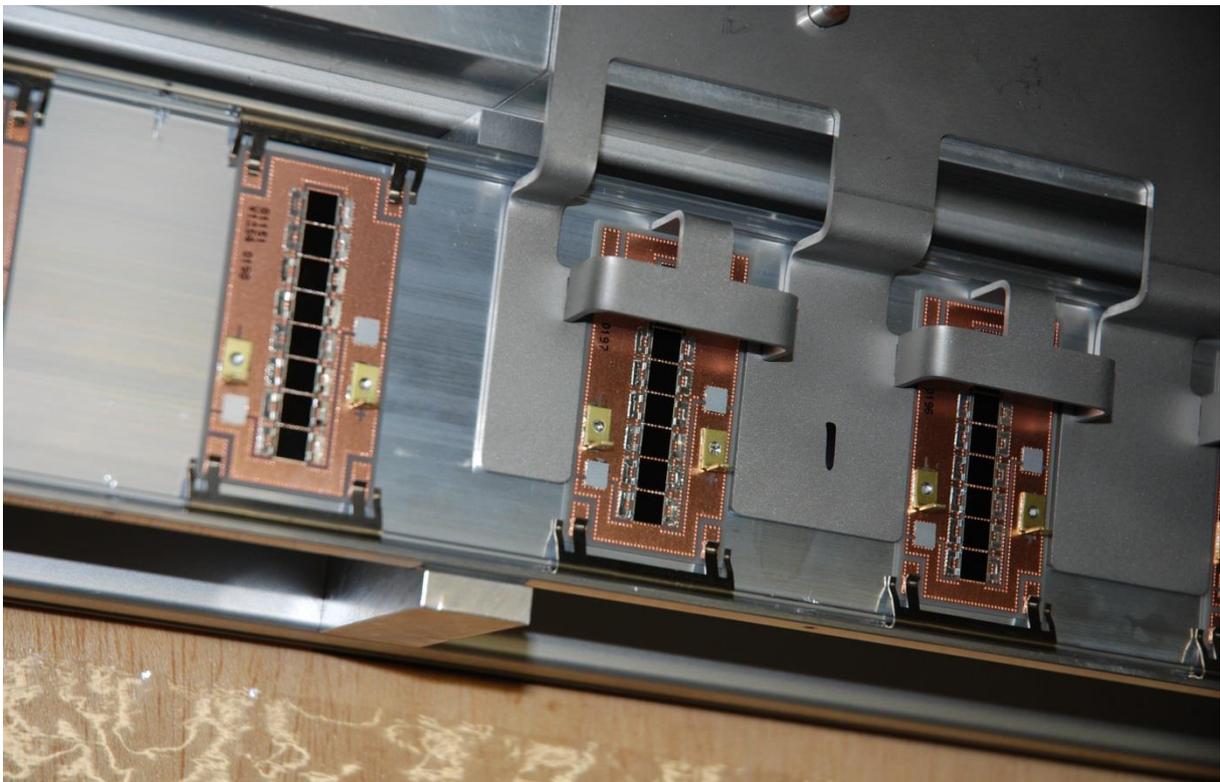


Abb. 49: Foto der Schablone aus Edelstahl zur Positionierung von Zellensembles auf dem Wärmeträger-Rohr zur Fertigung der 4 m langen HOT-Receiver

Wir sind deshalb zuversichtlich, dass eine hinreichende Genauigkeit der gefertigten Receiver auch in einem manuellen Herstellungsprozess erreicht werden kann.

Eine manuelle Serienfertigung, welche in drei Schichten geschätzt 50 MW elektrische plus 75 MW thermische Jahresproduktions-Kapazität hat, könnte (noch auf der Basis der ISE-Linse) etwa folgendermaßen aussehen:

**First phase: Production Scheme of Receiver – Manually
(200 m², 3 shifts of 5-6 employees, >=50 MW el; 250 k€)**

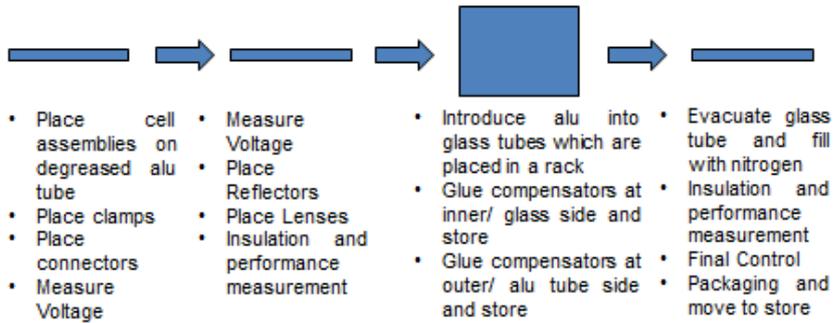


Abb. 50: Folie zum Ablauf der manuellen Produktion des Receivers (noch mit Ise-Linse)

Dabei wären die Investitionskosten für eine solche Fertigung sehr niedrig. Zusammen mit der Fertigung weiterer Komponenten könnte eine solche Produktion – z.B. in Indien – in einer gemieteten Halle mit etwa einer Viertelmillion Euro realisiert werden.

| Production Equipment for a Manual 50 MW el + 75 MW th SunOyster Production | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------------------------|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Space requirements: 200 m ² of a relatively clean and climatized room for the receiver production; 500 m ² for pipes, cables, pre-assembly and quality checks/maintenance; 300 m ² storage; plus office space. | | | | | | | | | |
| Volume: 50 MW el = 10,640 SunOysters per day, so on 250 working days p.a. 42 Sunoysters or 84 receivers per day, so in a 24 hours production 3.5 receivers and 210 cell assemblies per hour. Assumption: Components are coming ready for use, e.g. the glass tubes clean inside with light caps at the two ends. | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Item | Origin | Amount | Estimated total cost (€) | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Receiver Production | | | | | | | | | |
| Tables with transport belt | India | 1 | 10000 | | | | | | |
| Template lens support | India | 1 | 5000 | | | | | | |
| Automatic screw driver | India | 3 | 3000 | | | | | | |
| Halogen lamp test stand | India | 2 | 2000 | | | | | | |
| Electric measurement | India | 2 | 4000 | | | | | | |
| Mobile store rack | India | 8 | 8000 | | | | | | |
| Gluing machine | India | 2 | 12000 | | | | | | |
| Evacuation and gas | India | 2 | 10000 | | | | | | |

| | | | | | | | | |
|---|---------|---|--------|--|--|--|--|--|
| filling | | | | | | | | |
| Packaging station | India | 2 | 8000 | | | | | |
| Ancillary Parts | | | | | | | | |
| Pipe cutting low temp | India | 2 | 2000 | | | | | |
| Pipe cutting high temp | Turkey | 1 | 10000 | | | | | |
| Cable preparation | India | 3 | 12000 | | | | | |
| Mechanical Pre-assembly | | | | | | | | |
| Tables and bolt drives | India | 5 | 15000 | | | | | |
| Maintenance workshop | Germany | 1 | 10000 | | | | | |
| Quality Assurance for incoming goods and ready products | Germany | 1 | 20000 | | | | | |
| General Infrastructure | | | | | | | | |
| Compressor room and distribution | India | | 10000 | | | | | |
| Fork lift | India | | 20000 | | | | | |
| Storage | India | | 30000 | | | | | |
| Other | In/Ger | | 59000 | | | | | |
| Total | | | 250000 | | | | | |

Tab. 5: Erwartete Investitionskosten für eine manuelle Fertigung

b) Automatisierte Fertigung

Daneben ist eine automatisierte Fertigung denkbar, beispielsweise in einer späteren Phase, wenn ein größeres Produktionsvolumen benötigt wird und wenn breite Erfahrung mit dem anfänglichen manuellen Produktionsverfahren bestehen, oder wenn die Produktion in einem Hochlohn-Land stattfinden soll. Anbei eine grobe Skizze, wie (ebenfalls noch auf der Basis der ISE-Linse) eine automatisierte Produktion aussehen könnte. Hier sind der Flächen- und Geldbedarf etwa 10 Mal so hoch; die Produktionskapazität liegt bei mindestens 150 MW th plus 225 MW elektrisch.

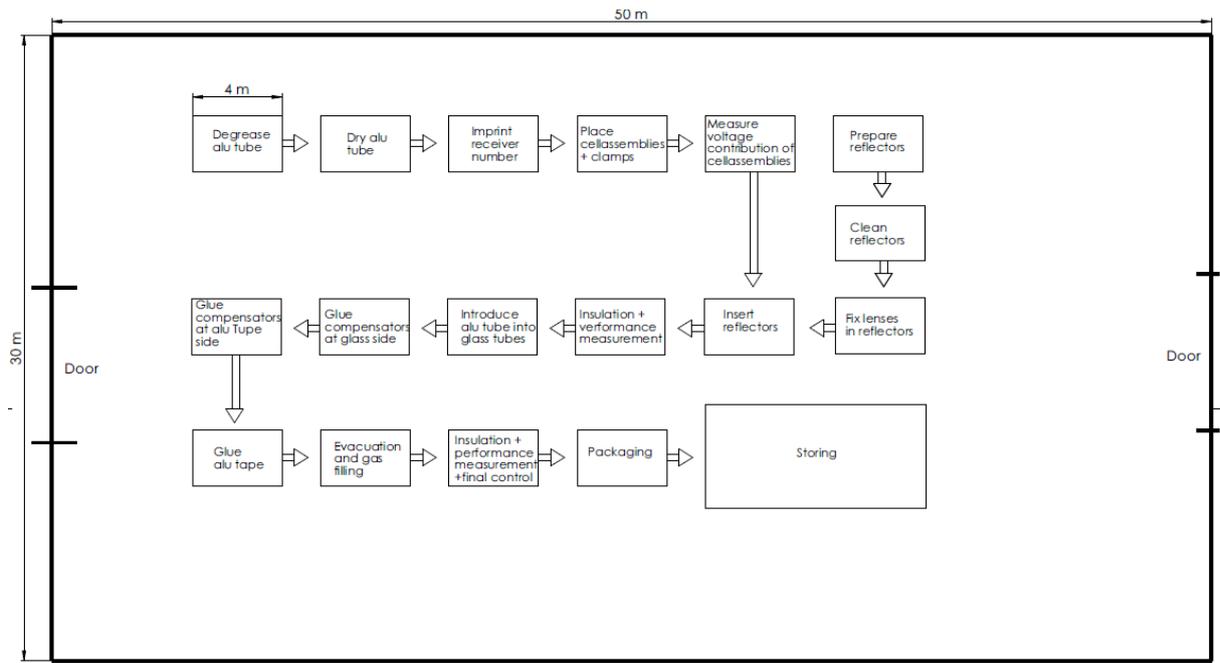


Abb. 51: Schema zur automatisierten Produktion des HOT-Receiver

8. Ökologische Bewertung der Vorhabensergebnisse

Bei der industriellen Energieerzeugung aus fossilen Quellen werden (neben anderen für die Umwelt nachteiligen Effekten) große Mengen des klimaschädlichen Gases Kohlendioxid (CO₂) sowie weitere Treibhausgase freigesetzt. Auch die Nutzung von Kernenergie wirft neben der Frage der Endlichkeit der Ausgangsstoffe große und nicht gelöste ökologische Probleme auf (Lagerung des atomaren Abfalls). Notwendig für eine nachhaltige und umweltfreundliche Energieerzeugung ist die Nutzung von Technologien, die bei ihrer Anwendung bestenfalls keine klimaschädlichen Emissionen abgeben und deren Einsatz nicht durch Endlichkeit fossiler Rohstoffe limitiert ist. Diese Umweltproblematik wird durch das vorliegende Projekt HOT-KPVST direkt adressiert.

SOS möchte bis 2022 zusammen mit den internationalen Joint Ventures und Lizenznehmern eine kumulierte elektrische Leistung von 3.000 MW und eine kumulierte thermische Leistung von 4.500 MW aufstellen. Diese würden beim typischen Welt-Energiemix und bei einer angenommenen durchschnittlichen Direktnormalstrahlung von 1533 kWh/m² Spiegelfläche und über eine Lebensdauer von 20 Jahren die Freisetzung von 2,9 Mio. t CO₂ im Stromsektor und 9,2 Mio. t CO₂ im Wärmesektor vermeiden. Wenn die Antragstellerin diese ambitionierten Ziele erreicht, würde sie einen ganz erheblichen Beitrag zum Klimaschutz leisten.

Darüber hinaus ist die SunOyster aber auch hinsichtlich der Stoff- und Energieströme nachhaltig gestaltet: Der wesentliche Rohstoff ist Stahl, der nach dem Ende der Lebensdauer vollständig recycelt werden kann. Selbst die PV-Zellen, die der Kern des HOT-Projektes sind, können zur Wiedergewinnung des verwendeten

Germaniums recycelt werden. Bei Verwendung einer Bleischnur zur Dichtung der geklebten Kompensatoren muss ein besonderes Augenmerk auf die Rückholung dieses Schwermetalls gelegt werden.

PV-Anlagen in Deutschland sind typischerweise bei einer energetischen Amortisationsdauer von ein bis zwei Jahren angelangt. Mit ihrem fünfmal so hohen energetischen Gesamtwirkungsgrad von 75% und dem hohen Recyclinganteil wird die SunOyster voraussichtlich eine noch kürzere energetische Rückzahlzeit und damit auch eine ausgezeichnete Ökobilanz aufweisen.

9. Schutz des geistigen Eigentums

Die Patentanmeldung zum HOT-Receiver wurde im Patent Cooperation Treaty (PCT) Verfahren in folgenden Ländern zur Anmeldung gebracht: Europa, USA, China und Indien.

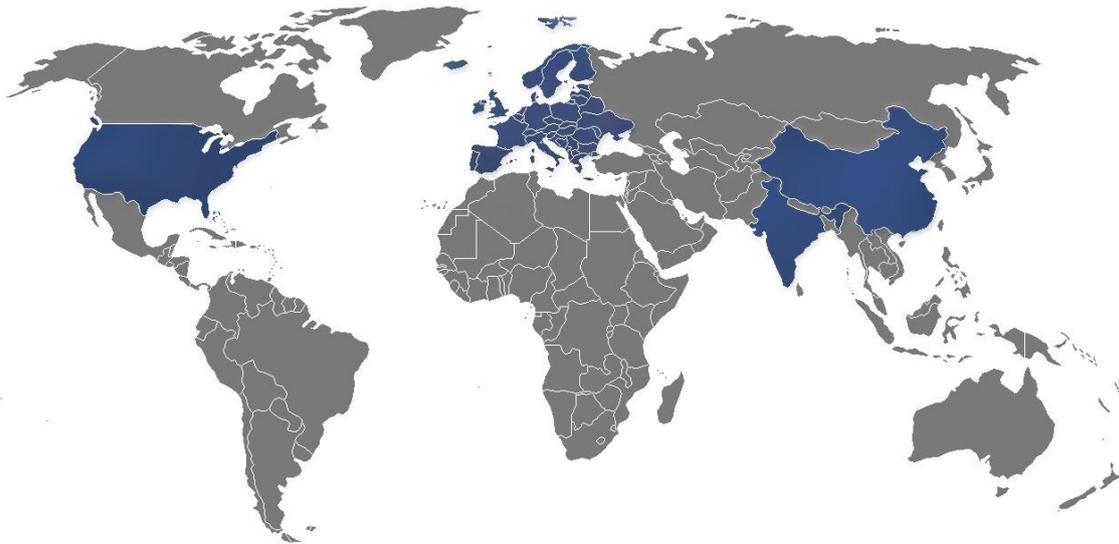


Abb. 52: Geographischer Umfang der Patentanmeldung zum HOT-Receiver

Daneben wurde aktuell im September 2016 zusammen mit unserem Dienstleister Dr. Ralf Leutz ein deutsches Gebrauchsmuster zum SunOyster Crystal sowie zur detaillierten Ausgestaltung des Receiver-Rohrs angemeldet. Hier sollen noch internationale Anmeldungen in Ländern mit Gebrauchsmusterschutz, z.B. China, folgen. Die Anmeldung wird als Anlage 2 diesem Bericht beigelegt.

10. Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Die Verbreitung der Vorhabensergebnisse soll Anfang 2017 handfest in Form einer Vorserie der HOT-Receiver erfolgen.

Die Grundzüge der Entwicklungsergebnisse wurden und werden auf diversen Fach- und Startup-Konferenzen präsentiert, wie:

- Neujahrsempfang des Bundesverbands Erneuerbare Energien in Berlin im Februar 2016
- EcoSummit in Berlin im April 2016
- Hannover-Messe im April 2016
- Indo-German Energy Forum in Berlin im September 2016
- Cleantech Conference New York im November 2016
- Construct 4.0 in Changsha, China im November 2016

IV. Fazit

Die Entwicklung des HOT-Receivers hat länger gedauert als gedacht. Die auf den ersten Blick trivial wirkende sekundäre Konzentration – klassische Optik – stellte unerwartete Herausforderungen.

Bei einigen Messungen hat die 3. Linsengeneration, den SunOyster Crystal, gute elektrische Ergebnisse erbracht. Die Ergebnisse sind aber noch stark streuend, so dass Fehlerquellen noch systematisch ausgeschaltet werden müssen.

| Ziel/ Merkmal vor Phase II | Urspr. Ziel | Erreicht | Kommentar |
|-------------------------------------|---------------------|-------------|---|
| Elektrischer Wirkungsgrad | $\geq 30\%$ bei STC | 30,8% | Einerseits um 4% gestiegene Zelleffizienz. andererseits gibt es anfangs nicht bedachte Verlustmechanismen (Potentialausgleich, relevant große Lücken zwischen Zellen) |
| (Geometrische) Konzentration | 933x | 530x | Für diese Konzentration ist auch ein hinreichend präzises Tracking bezahlbar |
| Thermische Effizienz | $\geq 45\%$ bei STC | Annähernd | Schwieriger zu erreichen, weil die Zelleffizienz steigt und keine Vakuumisolierung mehr. |
| Max. Zell-/ Fluidtemperatur | 186°C/170°C | 186°C/170°C | Wegen Begrenzungen von Zelle (Germanium), Lot und Dioden sowie Glykol als Frostschutzmittel im Fluid. |
| Zelltemperatur über Fluidtemperatur | ≤ 20 K | ≤ 16 K | Mit verschraubten Zellassemblies wird Temperaturunterschied noch geringer |

| | | | |
|-----------------------------|---|---|--|
| Isolierung | Vakuum in hermetisch geschlossenem Receiver | Stickstoff in hermetisch geschlossenem Receiver | Für Wärmeisolierung bei vorliegende Temperaturen ist Vakuum nicht erforderlich, Wasser und schädliche Gase können auch durch Stickstofffüllung ferngehalten werden, verschiedene entgegenstehende Patente. |
| Kosten der Serienproduktion | $\leq 125 \text{ €/m}$ | $\leq 125 \text{ €/m}$ | Weitere konstruktive und herstellungsseitige Kostensenkungen möglich |

Tab. 6: Übersicht über die Erreichung der Entwicklungsziele (SOS)

Durch die unerwarteten Schwierigkeiten mit der ersten Linsengeneration von Opsira und auch der zweiten Linsengeneration des Fraunhofer ISE konnten von dem vorgesehenen Testprogramm keine ausgedehnten Temperatur-Dauertests und keine Zertifizierung mehr durchgeführt werden. Dass sich das Programm der Entwicklung gemessen an dem engen zeitlichen und finanziellen Budget des Projekts als zu ambitioniert erwies, war von einigen Gutachtern bereits vorher gesehen worden.

Literaturverzeichnis

Normen:

DIN EN IEC 62108:2008 Konzentration-Photovoltaik (CPV)-Module und – Anordnungen – Bauartzeichnung und Bauartzulassung

DIN EN ISO 9806:2013 Solarenergie – Thermische Solarkollektoren - Prüfverfahren

Sonstige Literatur:

Barlev, David/ Vidu, Ruxandra/ Stroeve, Pieter, Innovation in concentrated solar power, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95 (2011), 2703-2725

Benítez, Pablo et al., High Performance Fresnel-based photovoltaic concentrator, *Optics Express* Vol. 18, No. S1 of 26 April 2010, p. A25-A40

Hasan, Arif/ Sumathy, K., Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010), 1845-1859

Helmers, Henning, *Concentration of Photovoltaic Electricity and Heat Using Concentrated Solar Radiation*, Oldenburg, 2013

Helmers et al., Influence of temperature and irradiance on triple-junction solar subcells, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 116 (2013), 144–152

Ibrahim, Adnan et al., Recent Advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011), 352-365

Jiang, Shouli et al., Optical Modeling for a two-stage parabolic trough concentrating photovoltaic/thermal system using spectral beam splitting technology, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 94 (2010), 1686-1696

Leutz, Ralf/ Suzuki, Akio, *Nonimaging Fresnel Lenses*, Berlin Heidelberg 2010

Li, Ming et al., Performance Study of solar cell arrays based on a Trough Concentrating Photovoltaic/Thermal System, *Applied Energy* 88 (2011), 3218-3227

Lovegrove, Keith/ Stein, Wes, *Concentrating solar power technology*, Oxford 2012

Perez-Higueras, Pedro/ Fernandez, Eduardo F., *High Concentrator Photovoltaics*, Cham Heidelberg 2015

Siefer, Gerald/ Bett, Andreas W., Analysis of temperature coefficients for III-V multi-junction concentrator cells, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 2014 (22), 515-524.

Xie, W.T. et al., Concentrated solar energy applications using Fresnel Lenses, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011), 2588-2606

Anhänge

Anhang 1: Studie von Dr. Ralf Leutz zum SunOyster Crystal

Anhang 2: Anmeldung des Gebrauchsmusters Gekreuzte Konzentratoren Optik

Anhang 3: Messung des TÜV Nord