

Black Photon Instruments GmbH

**Entwicklung von Sensoren zur vereinfachten Erfassung der Spektralverteilung
der Solarstrahlung für Photovoltaik-Stapelzellen**

Abschlussbericht Entwicklungsprojekt

gefördert unter Az: 29371

von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Projektleiter

Dr.-Ing. Joachim Jaus

Freiburg, November 2014

Ergebnisse und Diskussion

Im Projekt „Entwicklung von Sensoren zur vereinfachten Erfassung der Spektralverteilung der Solarstrahlung für Photovoltaik-Stapelzellen“ wurden zahlreiche Technologien entwickelt, die eine einfache, genaue und robuste Möglichkeit zur Messung von spektralen Eigenschaften von Solarstrahlung eröffnen.

Da Solarstrahlungssensoren optische Präzisionsmessungen durchführen, die unter unkontrollierten und häufig rauen Außenbedingungen erfolgen, war die Entwicklung von Sensoren, die speziell auf diese Einsatzbedingungen ausgerichtet sind, ein zentraler Teil des Projekts. Für die Komponentenzellen, die als Spektral-Detektoren in den Sensoren zum Einsatz kommen, wurde daher eine zweistufige Verkapselungstechnologie entwickelt. Die innere Hülle schützt dabei vor Feuchtigkeitseinfluss und Oxidation, indem sie reinen Stickstoff enthält. Die äußere Hülle schützt gegen mechanische Beschädigungen, gegen Eindringen von Wasser sowie gegen elektromagnetische Störstrahlung, z.B. von Wechselspannungsleitungen. Die Haltbarkeit der neu entwickelten Gehäusetechnologie konnte in zahlreichen Tests zur beschleunigten Alterung nachgewiesen werden.

Zur Detektion der Spektralverteilung in der Globalstrahlung wird eine besondere Optik benötigt, die sogenannte Globalstrahlungsoptik. Hierin wird Solarstrahlung aus allen Richtungen der Hemisphäre empfangen. Innerhalb der Optik wiederum wird sichergestellt, dass egal aus welcher Richtung ein Strahl eintrifft, die Strahlung immer unter einem konstanten und relativ engen Winkelbereich auf den Detektor gelenkt wird. Gängige Lösungen sind hier häufig entweder nicht uneingeschränkt außentauglich, da nicht robust genug, oder haben eine niedrige optische Leistungsfähigkeit. Zur Entwicklung einer Globalstrahlungsoptik wurden sowohl Messaufbauten gefertigt, als auch zahlreiche Musteroptiken mit unterschiedlichen Konzepten. Die letzten Entwicklungsmuster wiesen hierbei eine vielfach verbesserte Strahlungsempfangscharakteristik auf als zu Beginn des Projekts.

An drei Standorten (Davos/Schweiz, Golden,Co./USA und Amal/Oman) wurden die im Projekt entwickelten Technologien und Sensormuster ausführlich getestet und vermessen. Hierbei konnte der erfolgreiche Einsatz der Messtechnologien sowohl unter trocken-heißen Wüsten- als auch unter extrem kalten und niederschlagsreichen Hochgebirgsbedingungen nachgewiesen werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Im Rahmen des Projektes sind folgende Veröffentlichungen erfolgt

- Konferenzbeitrag zur CPV Konferenz 2012 in Toledo: „Generalized Spectral Performance Evaluation of Multijunction Solar Cells Using a Multicore, Parallelized Version of SMARTS“.
- PES Photovoltaik Zeitschrift Artikel : „Navigating solar irradiance measurement issues“
- 13th BSRN Scientific Review and Workshop in Bologna (Italy) September 9-12, 2014: Poster zu „High precision solar trackers with integrated sensor cleaning systems“
- Pressemitteilung zusammen mit (DLR): „DLR und Black Photon Instruments haben neuen CSR-Sensor für konzentrierende solarthermische Anlagen an Wüstenstandorten entwickelt“.

Fazit

Die entwickelten Technologien ermöglichen es, empfindliche Halbleitersensoren in rauen Außenbedingungen eines typischen Solarkraftwerks einzusetzen. Als Schlüsseltechnologien hierzu wurde eine doppelte Verkapselungstechnologie sowie ein System zur Reduktion des Schmutzeintrags auf die Empfangsoptik entwickelt. Es wurden sowohl Sensoren zur Erfassung der spektralen Eigenschaften der Direktstrahlung sowie Globalstrahlung entwickelt. Die Eigenschaften der Direktstrahlung spielen eine besondere Rolle bei konzentrierenden Photovoltaik-Systemen, die Eigenschaften der Globalstrahlung sind für die nicht-konzentrierenden Systeme (z.B. Dünnschicht Stapelsolarzellen) relevant.

Basierend auf den entwickelten Technologien konnten 5 Produkte entscheidend verbessert oder neu eingeführt werden. Von diesen wurden bereits erste Exemplare verkauft und mit einem sehr positiven Feedback von den Kunden angenommen. Wir rechnen daher damit, dass wir aufgrund der Förderung durch die DBU mit den neuen Produkten unseren Beitrag zum Ausbau der Solarenergie leisten und somit zu einer umweltfreundlichen Energieerzeugung beitragen können.

Inhaltsverzeichnis

1	Verzeichnis von Bildern und Tabellen.....	6
2	Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	9
3	Zusammenfassung	10
4	Einleitung	11
5	Hauptteil	15
5.1	AP1: Konstruktion und Fertigung doppelt gekapselter spektral selektiver Sensoren	15
5.1.1	Arbeitspaket 1.1: Simulation & Design von Sensorik für Mehrfachsolarzellen	15
5.1.2	Arbeitspaket 1.2: Entwicklung einer richtungsunabhängigen Kollektoroptik	18
5.1.3	Arbeitspaket 1.3: Entwicklung eines doppelten Verkapselungsaufbaus zum Schutz der Sensoren	24
5.2	AP2: Aufbau und Test von Prototypen	25
5.2.1	Arbeitspaket 2.1: Charakterisierung und Kalibrierung von spektral selektiven Sensoren	26
5.2.2	Arbeitspaket 2.2: Tests zur beschleunigten Alterung	32
5.2.3	Arbeitspaket 2.3: Evaluation an weltweiten Kraftwerksstandorten.....	34
6	Ökonomische Bewertung und Marketingaspekte	39
6.1	Projektverlauf vs. Projektplanung.....	39
6.2	Überführung der Technologien in Produkte.....	40
6.2.1	BPI IT1: Stapelzellbasierter Spektralsensor.....	40
6.2.2	BPI-SYS: Ein System zum Monitoring von PV Kraftwerken	41
6.2.3	BPI-AirShield: Ein System zur Verhinderung von Verschmutzung von Solarsensoren .	41
6.2.4	BPI Sunscanner SC-1: Eine zweiachsige Nachführung für den autonomen Betrieb von Solarsensoren.....	41
6.2.5	BPI-AMP1: Ein hochgenauer Verstärker für Sensoren.....	41
6.3	IP & Veröffentlichungen aus dem Projekt	42
6.3.1	Patente.....	42

6.3.2	Paper zur CPV-8 in Toledo.....	42
7	Fazit.....	43
8	Literaturverzeichnis	43
9	Anhänge.....	44

1 Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Abbildung 1: Schnittansicht durch eine Dreifachsolarzelle basierend auf III-V Halbleiterbauelementen. Rechts daneben ein Spektrum, in dem zu erkennen ist, welcher Farbanteil in der jeweiligen Teilzelle umgewandelt wird.	11
Abbildung 2: Simulationsergebnisse zur Variabilität des solaren Spektrums, basierend auf der von der NASA betriebenen Klimadatenbank „AERONET“ für den Standort Maricopa in Arizona, USA. Abgebildet sind die Variationen innerhalb eines Jahres, ebenfalls eingezeichnet ist das Referenzspektrum AM1.5d ASTM G173, auf das die Solarzellen bisher optimiert werden.....	12
Abbildung 3: Aufteilung des Spektrums zwischen verschiedenen Teilzellen von Dünnschichtmodulen. Links: Typische externe Quanteneffizienz einer amorphen (a-Si:H/a-Si:H) und mikromorphen (a-Si:H/ μ c-Si:H) Tandemsolarzelle. Rechts: Typische externe Quanteneffizienz einer CGS/CIGS Tandemsolarzelle.	13
Abbildung 4: Auswertung der weltweiten Verteilung der Aerosolwerte (als „Aerosol Optical Depth“) aus der AERONET Datenbank. Hierzu wurden 6,9 Mio Messungen an 379 Stationen ausgewertet. Es ist zu erkennen, dass eine Vielzahl der Messungen vergleichsweise geringe AOD Werte von 0.1 aufweisen, jedoch auch deutlich höhere Aerosolwerte vorkommen.	16
Abbildung 5: Quantil-Plot der Spektralsimulationen mit SMARTS, basierend auf 379 Stationen aus AERONET, wobei von jeder Station 100 Messpunkte zufällig ausgewählt und dazu die Spektren simuliert wurden. Aus der Quantils-Darstellung lässt sich sehr gut die unterschiedliche Variabilität des Spektrums erkennen. Diese ist für den kurzwelligen Bereich deutlich höher als für den langwelligen Bereich.	16
Abbildung 6: Spektrale Performance von 7 Solarzelltypen unterschiedlicher Hersteller. Die Spektrale Performance beschreibt, wie hoch die Leistungsfähigkeit einer Solarzelle unter den simulierten spektralen Bedingungen im Vergleich zur Leistungsfähigkeit unter Referenzbestrahlung liegt. Für die Durchführung der Berechnungen wurden die spektralen Empfindlichkeiten von Solarzellen verschiedener Hersteller und Institute angefragt und in anonymisierter Form für die Veröffentlichung verwendet.....	17
Abbildung 7: Platine mit Verstärkerschaltung für die Messung des Kurzschlussstroms einer Komponentenzelle oder einer Photodiode. Die Schaltung beinhaltet auch die Umwandlung in ein Spannungssignal, wobei Ausgangsverstärker gewährleisten, dass auch lange Kabelwege realisiert werden können.	18
Abbildung 8: Lichtquelle zur Erzeugung eines mit parallelem Licht homogen ausgeleuchteten Lichtkegels.....	19
Abbildung 9: Bestrahlungsstärkemessung innerhalb des Lichtkegels zum Nachweis der Beleuchtungshomogenität.....	19
Abbildung 10: Ansicht von oben auf die Prüffläche des Drehtischs.	20
Abbildung 11: Gesamtaufbau zur Messung des richtungsabhängigen Verhaltens von Kollektoroptiken.	20
Abbildung 12: Vergleich ideale Cosinus Empfangscharakteristik, Cosinus Empfangscharakteristik mit Berücksichtigung der Reflektion an zwei Grenzflächen, Empfangscharakteristik einer Silizium Photodiode in ihrem primären Verkapselungsgehäuse ohne weiteren Diffusor.	21
Abbildung 13: Ergebnisse der optischen Vermessung der ersten Prototypgeneration an Globalstrahlungsoptiken (richtungsunabhängige Empfangsoptiken). Die Cosinus-Charakteristik weist	

starke Unregelmäßigkeiten auf und selbst im Falle senkrechten Lichteinfalls träten deutliche Abweichungen zur idealen Cosinus Funktion auf.	21
Abbildung 14: Verbesserter optischer Aufbau mit Opalglas und einem Mischzylinder aus optischem Teflon.	22
Abbildung 15: Neuer Diffusoraufsatz OP-D-002-2.....	22
Abbildung 16: Links: die neu entwickelte Nachführeinheit, hier bestückt mit einem Top-Komponentenzell-Spektralsensor, einem Pyrheliometer zur thermischen DNI Messung, sowie einem Tracking Sensor zur hochgenauen Positionierung. Rechts: Nachführeinheit mit Systemelektronik. Die integrierte Wettersensorik ermöglicht die Erfassung aller relevanten Parameter wie Wind, Temperatur und Luftfeuchte.	23
Abbildung 17: Der Sensor SE-185 während der Produktion. Links: Die Unterseite des Sensors ist geöffnet, sodass die Verstärkerelektronik sowie die zum neuen Stecker führenden Leitungen zu sehen sind. Rechts: Ansicht von oben mit Eintrittsfenstern und Gewinden zur Befestigung von Kollimator oder Filteroptiken.....	24
Abbildung 18: Schema des Drucktestsystems	25
Abbildung 19: Realisierung des Drucksystems	25
Abbildung 20: Temperaturabhängigkeit des Offsets. Der Offset verändert sich mit der Temperatur, ist aber niemals grösser als 0.5 mV. Dies entspricht 0.005% des Messbereichs.	26
Abbildung 21: Temperaturabhängigkeit des Offsets, Messung an 4 Platinen gleichzeitig. Der maximale Temperaturkoeffizient des Offsets beträgt 2.8×10^{-3} V/k, der maximale Offset über den Temperaturbereich 25 bis 85 °C beträgt 0.5 mV.	27
Abbildung 22: Fehler des Absoluten Verstärkungsfaktors bei verschiedenen Stromstärken, gemessen jeweils bei Raumtemperatur (25 °C). Es wurde ein maximaler Absolutfehler von 0.04 % des Messbereichs bestimmt. Dieser Wert beinhaltet auch den Absolutfehler der Stromquelle, der in einem ähnlichen Bereich liegt.....	27
Abbildung 23: Vermessung am Quanteneffizienzmessplatz des Fraunhofer ISE Kalibrierlabors. Zum Zeitpunkt der Aufnahme wird gerade die Quanteneffizienz bei ca. 520 nm Wellenlänge vermessen, was der Wellenlänge von grünem Licht entspricht.	28
Abbildung 24: Quanteneffizienz der Stapelzelle GaInP, GaInAs, Ge.....	28
Abbildung 25: Spektrale Empfindlichkeit von Silizium-basierenden Photozellensensoren mit schmalbandigem Interferenz-Bandpassfilter mit 450 nm nominale Filterwellenlänge, gemessen unter einer Globalstrahlungsoptik.....	29
Abbildung 26: Spektrale Empfindlichkeit von Silizium-basierenden Photozellensensoren mit schmalbandigem Interferenz-Bandpassfilter mit 940 nm nominale Filterwellenlänge, gemessen unter einer Globalstrahlungsoptik.....	30
Abbildung 27: System zur Erfassung von Messdaten aus Außenmessungen. Im mittleren Bereich ist der Datenlogger zu erkennen, der die analogen Signale, die von den Sensoren kommen, aufzeichnet. Im oberen Bereich sind AC-Sicherungen und Netzteile angeordnet.	31
Abbildung 28: Messplattform zur Montage der Sensoren.	31
Abbildung 29: Flanschstecker VC-015-EnMO2 während der Temperaturwechseltests.....	32
Abbildung 30: In den Sensor zu Testzwecken eingebaute Sensorik für Luftfeuchte, Temperatur und Luftdruck. Mit diesen Sensoren kann der genaue Verlauf des Mikroklimas im Sensor überwacht werden. Evtl. auftretende Undichtigkeit in einem Temperaturwechseltest wird sofort an verringerten Druckschwankungen und erhöhten Feuchtwerten erkannt.....	33

Abbildung 31: Ergebnis eines Humidity – Freeze –Tests (Feuchtwechseltest mit Ausfrieren). Aus den Daten der 3 integrierten Sensoren kann der Alterungsvorgang genau verfolgt werden und ein eventuell eintretender Schadensfall in der Dichtigkeit genau verfolgt werden.....	33
Abbildung 32: 2-achsige Nachführeinheit am physikalisch-meteorologischen Observatorium in Davos (PMO). Gut zu erkennen ist das blaue Absolutstrahlungsradiometer vom Typ PMO6-cc in einer Schutzeinhausung aus Plexiglas und Aluminium. Absolutstrahlungsradiometer sind prinzipbedingt offen konstruiert, sodass sie durch ein geeignetes System vor Staub, Regen und Feuchtigkeit geschützt werden müssen. Im Test wurde dies durch eine schnelle Schwenkbewegung der Elevationsachse bei Niederschlag, das kontinuierliche Belüften mit gefilterter Luft sowie das Beheizen der Schutzeinhausung erreicht.	34
Abbildung 33: Messaufbau mit Nachführeinheit am physikalisch-meteorologischen Observatorium in Davos im Januar 2014. Während der winterlichen Bedingungen lief das System kontinuierlich weiter. Der Schneefall zum Zeitpunkt der Aufnahme wurde vom Niederschlagssensor registriert und das System in eine Schutzposition gefahren. Hierbei ist das Pyrheliometer (Silbernes Messgerät mit schwarzem Frontstück) in einer Parkposition, in der das Eintrittsfenster gegen Niederschlag geschützt ist. Dadurch kann das Messgerät gleich bei Ende des Schneefalls wieder in die Messposition zurückfahren und sofort mit der Messreihe fortfahren. Ohne diese im Projekt entwickelten Technologien müsste zunächst gewartet werden, bis der Schnee getaut ist.....	35
Abbildung 34: National Pyrheliometer Intercomparison in Golden, Co, USA	36
Abbildung 35: Der Sensor SE-185 während der “National Pyrheliometer Intercomparison” in Golden, Colorado, USA.	36
Abbildung 36: Messung der Direktnormalstrahlung (DNI) mit einem Breitband Thermischen Pyrheliometer im Vergleich zur DNI, die über den Top-Zellen Sensor SE-185 ermittelt wurde. Die Messungen wurden in Golden, Co, USA durchgeführt, bei stabilen Wetterbedingungen und sehr klarem Himmel. Gut erkennbar ist dennoch der Einfluss des Spektrums auf die ermittelte DNI. Der Top-Zell Sensor misst vor allem im Wellenlängenbereich von 400-700 nm, während der thermische DNI Sensor von 400-3000 nm Wellenlänge misst. Dementsprechend misst der Top-Zell Sensor eine geringere DNI als der thermische Sensor. Dies ist von hoher Bedeutung für Solarzellen, die ebenfalls im Bereich 400-700 nm empfindlich sind, da der Top-Zell Sensor besser die ihnen zur Verfügung stehende Strahlung widerspiegelt.	37
Abbildung 37: Verhältnis zwischen Top-Zell Sensor und thermisch gemessener DNI aus derselben Messung, die auch in Abbildung 36 dargestellt ist. Gut zu sehen ist, wie sich das Verhältnis im Lauf des Tages verändert. Hauptgrund hierfür ist der Weg der Sonnenstrahlen durch die Erdatmosphäre, der sich im Laufe des Tages entsprechend dem Sonnenstand verändert.	37
Abbildung 38: Messungen der Trackinggenauigkeit. Der Tracker zeigt fast ausschließlich Trackinggenauigkeiten von 0.1 Grad und erreicht damit eine hervorragende Genauigkeit.	38
Abbildung 39: Messungen der Temperatur in der Nachführeinheit sowie im ausschließlich passiv gekühlten Schaltschrank. Die Messungen zeigen, dass die maximale Temperaturerhöhung 15 Kelvin beträgt und damit auch bei hohen Temperaturen eine sichere Funktion gewährleistet ist.....	38
Abbildung 40: Installation an einer DNI- und Circumsolarstrahlungsmessstelle im Oman. Im rechten Bildteil ist die Box zur Filterung der Umgebungsluft zu sehen, die anschließend im blauen Schlauch zu den Sensoren geführt wird.	39

2 Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

AERONET:	Aerosol Netzwerk, ein Messnetzwerk mit Datenbank für Aerosoldaten
DLR:	Deutsche Gesellschaft für Luft und Raumfahrt
DNI	Direktstrahlung
CPV	Konzentratorphotovoltaik
CSP	Concentrating Solar Power, bezeichnet normalerweise Thermische Solarkraftwerke
CSR	Circumsolarstrahlung
GHI	Globalhorizontalstrahlung
PV	Photovoltaik
BSRN	Baseline Surface Radiation Network, ein Referenz-Netzwerk zur Solarstrahlungsmessung

3 Zusammenfassung

Im Projekt „Entwicklung von Sensoren zur vereinfachten Erfassung der Spektralverteilung der Solarstrahlung für Photovoltaik-Stapelzellen“ wurden zahlreiche Technologien entwickelt, die eine einfache, genaue und robuste Möglichkeit zur Messung von spektralen Eigenschaften von Solarstrahlung eröffnen.

Hierzu wurden zunächst mittels Simulation typische Spektralverteilungen simuliert. Als Basis hierfür diente die vom NASA Goddard Space Center zur Verfügung gestellte Aerosoldatenbank AERONET und das Simulationspaket SMARTS. Anschließend wurde der Einfluss der spektralen Verteilungen auf die Arbeitsweise und Messergebnisse spektral selektiver Sensoren sowie auf den Jahreswirkungsgrad verschiedener photovoltaischer Kraftwerkstechnologien untersucht.

Für die Erfassung der spektralen Eigenschaften wurde eine neuartige richtungsunabhängige Kollektoroptik entwickelt, die Aufschluss über die Veränderung der Sonneneinstrahlung während des sich über einen Tag verändernden Sonneneinstrahlungswinkels gibt. Zu diesem Zweck wurde ein Messstand aufgebaut, anhand dessen in Außenmessungen die Entwicklungen überprüft werden können.

Zum Schutz der Sensoren wurde ein neuer doppelter Verkapselungsaufbau aus zwei Schutzhüllen entwickelt, wobei die innere Hülle vor Feuchtigkeitseinfluss und die äußere gegen mechanische Beschädigungen schützt. Weiter wurde eine autonom arbeitende, in alle Raumrichtungen frei drehbare, Nachführeinheit für die Direktstrahlungsmessung entwickelt. Für die Verringerung der Verschmutzung der Eintrittsoptik wurde ein Spülluftsystem entwickelt, das auch unter Wüstenbedingungen staubfreie Luft zur Verfügung stellt. Diese Druckluft wird durch ein Düsensystem auf die Eintrittsoptik geleitet und verhindert durch den konstanten Massenstrom das Anlagern von Schmutz auf der optischen Fläche. Mit einigen Entwicklungsmustern der Sensoren wurden nach der Herstellung im Kalibrierlabor des Fraunhofer ISE Messungen durchgeführt, insbesondere der Quanteneffizienz und des 1-Sonnen Kurzschlussstroms.

Durch beschleunigte Alterungstests an den Sensoren während der gesamten Entwicklungsphase wurden die Alltagsbelastungen durch langzeitige Bewitterung simuliert und die Komponenten nach und nach verbessert, bis sie schließlich allen relevanten Tests standhielten.

Nach Evaluierung und Untersuchung der neuen Sensoren wurden im Rahmen des Projektes Sensor-Plattformen aufgebaut und an verschiedenen weltweiten Standorten Testmessungen durchgeführt.

Das Forschungsvorhaben wurde unter dem Aktenzeichen 29371 von der Deutschen Bundesstiftung (DBU) gefördert. Die Förderung dieses Projektes hat die Entwicklung wesentlicher Technologien zur Messung von Solarstrahlung ermöglicht, sodass wir in Zukunft besser zum Ausbau der umweltfreundlichen Solarenergie beitragen können.

4 Einleitung

In den letzten Jahren hat die Bedeutung der regenerativen Energiequellen stark zugenommen. Insbesondere im Bereich der Photovoltaik konnte ein rascher Ausbau verzeichnet werden. Da die Stromkosten des erzeugten Stroms aber immer noch deutlich über den mittleren Stromkosten von konventionellen Kraftwerken liegen, ist die Photovoltaik nach wie vor stark auf Förderprogramme wie z.B. das Einspeisegesetz für erneuerbare Energien (EEG) oder die im internationalen Kontext häufig anzutreffenden Quotenregelungen für Ausbauziele angewiesen. Um dauerhaft einen weit verbreiteten Einsatz der Photovoltaik zu erreichen, sind daher noch starke Kostensenkungen notwendig. Ein großes Potential zur Kostensenkung von solar erzeugtem Strom bietet die Steigerung des Wirkungsgrades von Solaranlagen.

Eine vielversprechende Möglichkeit, den Wirkungsgrad von Solarmodulen deutlich zu steigern, ist der Einsatz von Mehrfachsolarzellen. Bei diesen Zellen sind mehrere Solarzellen übereinander angeordnet, sie werden daher häufig auch als Photovoltaik-Stapelzellen bezeichnet. Die beiden Begriffe „Photovoltaik-Stapelzellen“ und „Mehrfachsolarzellen“ werden im Weiteren synonym verwendet. Die Solarzellen sind dabei auf bestimmte Teile des solaren Spektrums spezialisiert. Durch diese Spezialisierung kann der entsprechende Teil des Spektrums mit höherem Wirkungsgrad umgewandelt werden, als dies bei der Umwandlung in einer einzigen Zelle möglich wäre. Hierfür werden mehrere Halbleiterschichten übereinander angeordnet. In einer Dreifach-Solarzelle wandelt die obere Zelle nur den blauen Spektralanteil des einfallenden Lichtes um und lässt das rote und das infrarote Licht zur Mittelzelle passieren. Die mittlere Zelle wandelt das rote Licht um und lässt das infrarote Licht zur unteren Zelle passieren (Abbildung 1).

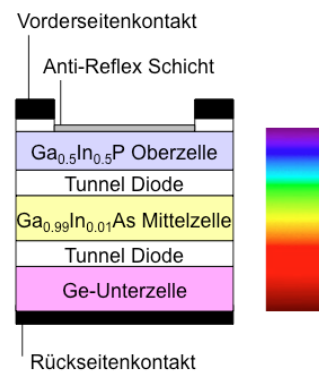


Abbildung 1: Schnittansicht durch eine Dreifach-Solarzelle basierend auf III-V Halbleiterbauelementen. Rechts daneben ein Spektrum, in dem zu erkennen ist, welcher Farbanteil in der jeweiligen Teilzelle umgewandelt wird.

Kurz vor Beginn des Projekts konnte am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme mit einer solchen Mehrfachsolarzelle ein Weltrekord-Wirkungsgrad von 41.1 % unter konzentriertem Sonnenlicht erzielt werden. Hierzu wurde die Materialkombination Ga_{0,35}In_{0,65}P/Ga_{0,83}In_{0,17}As/Ge verwendet. Mittlerweile konnte der Wirkungs-Weltrekord für solche Zellen nochmals gesteigert werden und beträgt nun 44.7 %.

Bei der Entwicklung und dem Betrieb von Mehrfachsolarzellen müssen verschiedene Querbeziehungen abgewogen werden. So sollte der Strom bei einer Mehrfachsolarzelle in allen

Teilzellen genau gleich sein, ansonsten sinkt der Wirkungsgrad entsprechend der Teilzelle mit dem geringsten Strom. Dies ergibt sich aus der Serienschaltung der übereinander abgeschiedenen Teilzellen, wobei immer die Teilzelle mit dem geringsten Strom den Gesamtstrom bestimmt. Die Verteilung des Stroms auf die verschiedenen Teilzellen wird durch das eingestrahlte Lichtspektrum bestimmt.

Zur Labormessung von Mehrfachsolarzellen werden sog. Standard- oder Referenzspektren (z.B. das Direktspektrum AM1.5d nach ASTM-173-3) zu Grunde gelegt. Im realen Betrieb einer Photovoltaik-Anlage kommt es jedoch zu starken Abweichungen des eingestrahnten Sonnenspektrums von diesen Normspektren. So kann im Verlaufe eines sonnigen Tages eine Änderung der spektralen Zusammensetzung beobachtet werden, die unter anderem auch für Phänomene wie Morgen- oder Abendrot verantwortlich ist. Dabei spielt die Streuung des Sonnenlichts an atmosphärischen Bestandteilen wie Wasserdampf, Spurengasen und Partikeln eine wichtige Rolle. Da sich diese sowohl im Tagesverlauf als auch im Verlauf eines Jahres verändert, ist auch das solare Spektrum einer stetigen Änderung unterworfen (Abbildung 2).

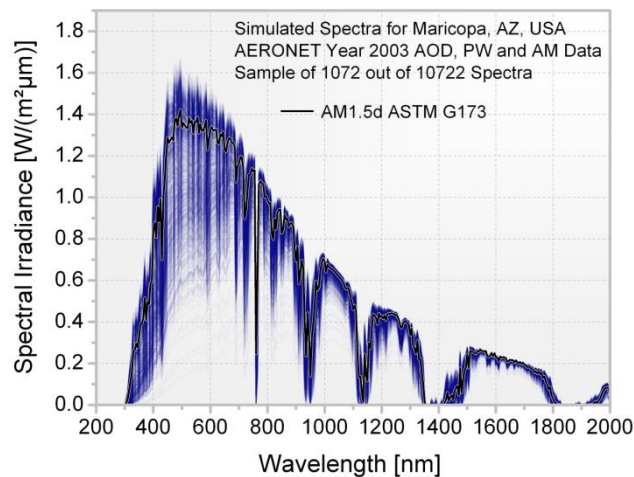


Abbildung 2: Simulationsergebnisse zur Variabilität des solaren Spektrums, basierend auf der von der NASA betriebenen Klimadatenbank „AERONET“ für den Standort Maricopa in Arizona, USA. Abgebildet sind die Variationen innerhalb eines Jahres, ebenfalls eingezeichnet ist das Referenzspektrum AM1.5d ASTM G173, auf das die Solarzellen bisher optimiert werden.

Wie in Abbildung 2 zu erkennen ist, schwankt das solare Spektrum sehr stark im Verlauf eines Jahres. Man erkennt auch, dass die Schwankungen im kurzwelligen Bereich (z.B. 500 nm) deutlich ausgeprägter sind als jene im langwelligen Bereich (z.B. 1000 nm). Dies hat wiederum Auswirkungen auf Mehrfachsolarzellen, da die Teilzellen einer Mehrfachsolarzelle ja in unterschiedlichen spektralen Bereichen aktiv sind (Abbildung 3).

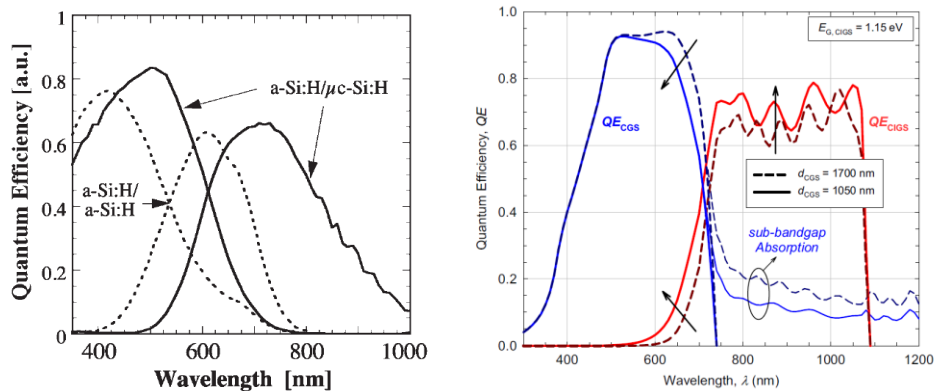


Abbildung 3: Aufteilung des Spektrums zwischen verschiedenen Teilzellen von Dünnschichtmodulen. **Links:** Typische externe Quanteneffizienz einer amorphen (a-Si:H/a-Si:H) und mikromorphen (a-Si:H/ μ c-Si:H) Tandemsolarzelle. **Rechts:** Typische externe Quanteneffizienz einer CGS/CIGS Tandemsolarzelle.

In Abbildung 3 lässt sich erkennen, dass in Mehrfachsolarzellen das Spektrum zwischen den Teilzellen aufgeteilt wird. Diese Teilzellen erzeugen Strom aus den jeweiligen Teilbereichen des solaren Spektrums. Änderungen in einem Teilbereich des Spektrums wirken sich dadurch auch auf Teilzellen aus anderen Bereichen des Spektrums aus. Verknüpft man diese Eigenschaft mit der großen spektralen Variabilität der Solarstrahlung, die in Abbildung 2 gezeigt wird, so wird deutlich: Hier sind besondere Strategien zur Optimierung und zur messtechnischen Erfassung der spektralen Eigenschaften der Solarstrahlung von größtem Interesse. Gleichzeitig ist es wichtig, immer auch einen Referenzwert, die sogenannte thermische (oder auch breitbandige) Einstrahlung zu ermitteln, die die Strahlungsleistung über das gesamte Spektrum beschreibt und meistens mit einem thermischen Sensor gemessen wird.

Beim Betrieb solcher Zellen müssen individuelle Standortfaktoren, wie z.B. die über das Jahr auftretenden Veränderungen im solaren Spektrum, stärker als bei konventionellen Solarzellen berücksichtigt werden. Auch bereits bei der Entwicklung solcher Zellen ist es wichtig, das Zellkonzept auf typische spektrale Verhältnisse abzustimmen und ggf. für verschiedene Standorte optimal angepasste Solarzellen zu entwickeln. Dazu werden gut beherrschbare Messmethoden benötigt, die die spektralen Standortfaktoren erfassen. Diese Messmöglichkeiten zu entwickeln ist der Hauptgegenstand dieses Projektes.

Zur Entwicklung dieser Technologie sollten Sensoren aufgebaut werden, die Rückschlüsse auf das Stromgleichgewicht der Teilzellen in einer Mehrfachsolarzelle ermöglichen. Hierzu wurden speziell dotierte Solarzellen in Sensoren integriert. Das Ziel war es dabei, Sensoren zu entwickeln, die uneingeschränkt auch unter widrigen Klimabedingungen eingesetzt werden können. Hierzu mussten insbesondere neue Verkapselungstechnologien entwickelt werden, sowie eine Messelektronik, die auch bei großen Temperaturschwankungen eine präzise Signalauswertung ermöglicht. Da optische Sensoren im Außenbetrieb durch die Kombination aus Regen, Luftfeuchtigkeit und Staub relativ schnell verschmutzen, sind die Messungen von thermischer oder spektraler Bestrahlungsstärke relativ großen Unsicherheiten unterworfen. Die Entwicklung von Systemkomponenten, die diese Verschmutzung verhindern bzw. verringern, ist daher ein wichtiger Teilaspekt dieses Projektes.

Photovoltaische Systeme können in zwei unterschiedlichen Bautypen realisiert werden: Man unterscheidet konzentrierende von nicht-konzentrierenden Photovoltaiksystemen. Bei den

konzentrierenden Photovoltaiksystemen (häufig abgekürzt mit CPV für engl. „Concentrating Photovoltaics“) wird Solarstrahlung mittels eines optischen Systems auf Solarzellen gelenkt, die in Bezug auf ihre Fläche um ein vielfaches kleiner sind als die konzentrierende Optik. Hierdurch kann teures Halbleitermaterial eingespart werden und durch günstigere optische Materialien wie z.B. Glas und Polymere ersetzt werden. Bei der CPV handelt es sich um eine relativ neue Technologie, die noch nicht im großen Maßstab eingesetzt wird. Insbesondere bei Stapelsolarzellen aus III-V Halbleitern (GaAs, GaInP, Ge...) ist die Konzentratortechnologie mit hohen Konzentrationsfaktoren von 500x und mehr ein Schlüsselement, damit die relativ hohen Halbleiterkosten keine negativen Auswirkungen auf die Gesamtsystemkosten haben. Jedoch wurden in den letzten Jahren zunehmend größere Kraftwerke installiert; eines der größten Projekte, realisiert durch Soitec in Süd Afrika, verfügt über eine Nennleistung von 44 MW. Bedingt durch das optische System muss ein CPV Modul der Sonne nachgeführt werden, da ansonsten der Brennpunkt des optischen Systems nicht mehr auf die Solarzelle trifft. Dementsprechend kann nur das direkte Licht (mit DNI abgekürzt für engl. „Direct Normal Irradiation“) verwendet werden. Alle Messverfahren beziehen sich dementsprechend auf die DNI, und die hierfür verwendeten Messgeräte müssen ebenfalls dem Sonnenlauf nachgeführt werden, z.B. mittels einer Nachführvorrichtung (engl. „Tracker“).

Der Markt für Photovoltaikmodule wird jedoch eindeutig durch nicht-konzentrierende Photovoltaik dominiert. Die in dieser Technologie weltweit in 2013 neu installierte Nennleistung beträgt ca. 39.000 MW (aus *IEA2014*). Konzentrierende Systeme können nicht nur die Direktstrahlung, sondern die gesamte Solarstrahlung verwerten. Die gesamte Solarstrahlung, die auf eine horizontal ausgerichtete Fläche fällt, wird häufig als Globalstrahlung bezeichnet (GHI, engl. „Global Horizontal Irradiation“). Das Konzept der Mehrfachsolare/ Stapelsolare wird aber auch zunehmend im Bereich der nicht konzentrierenden Photovoltaik eingesetzt. Hier existieren diverse Forschungsarbeiten zur Entwicklung von Tandem- und Dreifachsolare, die aufgrund ihres höheren Wirkungsgrades ein großes Marktpotential haben. Dabei kann eine Realisierung beispielsweise als Dreifachsolare aus amorphen Silizium, als Tandemsolare aus mikrokristallinen ($\mu\text{-Si}$) und amorphen (a-Si) Schichten, oder als Tandemstrukturen im aus II-VI-Halbleitern, z.B. Tandemsolare aus den Halbleitermaterialien KupferGalliumSulfid/ KupferGalliumIndiumSulfid (CGS/CIGS) erfolgen.

Nicht-konzentrierende Module werden normalerweise auch nicht dem Sonnenlauf nachgeführt. Dadurch können die Module mechanisch einfacher montiert werden, jedoch trifft das Sonnenlicht häufig in einem schrägen Winkel auf das Modul, wodurch sich eine geringere Bestrahlungsstärke des Moduls ergibt, entsprechend dem Cosinus des Winkels. Ähnlich dem Solarmodul selbst müssen auch Sensoren zur Messung der Globalstrahlung Licht aus allen Raumrichtungen erfassen können. Dies zu erreichen, und dabei Faktoren wie Außenbetriebstauglichkeit und Kosten zu berücksichtigen, ist eine technologische Herausforderung, die für dieses Projekt einen weiteren Schwerpunkt darstellt.

Mit den neu entwickelten Technologien sollten Prototypen aufgebaut werden und an verschiedenen weltweit verteilten Standorten bei Kooperationspartnern evaluiert werden.

5 Hauptteil

Entsprechend dem Antrag ist das Projekt in 3 Arbeitspakete gegliedert:

AP1: Konstruktion und Fertigung doppelt gekapselter spektral selektiver Sensoren

1.1: Simulation & Design von Sensorik für Mehrfachsolarzellen

1.2: Entwicklung einer richtungsunabhängigen Kollektoroptik

1.3: Entwicklung eines doppelten Verkapselungsaufbaus zum Schutz der Sensoren

AP2: Aufbau und Test von Prototypen

2.1 Charakterisierung und Kalibrierung von spektral selektiven Sensoren

2.2 Tests zur beschleunigten Alterung

2.3 Evaluation an weltweiten Kraftwerksstandorten

Die Zielsetzungen und Ergebnisse werden im Folgenden anhand dieser Systematik dargestellt.

5.1 AP1: Konstruktion und Fertigung doppelt gekapselter spektral selektiver Sensoren

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden die notwendigen Simulationen durchgeführt, anschließend darauf aufbauend Sensoren konstruiert und nach optischen, mechanischen und elektrischen Aspekten im Rahmend des 3D-CAD Konstruktionsprozesses immer weiter optimiert.

5.1.1 Arbeitspaket 1.1: Simulation & Design von Sensorik für Mehrfachsolarzellen

Spektrale Simulation

Wie in der Einleitung beschrieben ändert sich das solare Spektrum ständig in Abhängigkeit von lokalen klimatischen Bedingungen sowie dem Sonnenstand. Zur Simulation der spektralen Verteilung des Sonnenlichts sowie des Verhaltens von Mehrfachsolarzellen unter diesen Spektren wurden umfangreiche Simulationen mit dem Simulationspaket SMARTS [Güymard1995, Güymard2001] durchgeführt. Als Input für die Simulation wurden lokale Daten von Aerosol- und Wasserdampfgehalt der Atmosphäre benötigt. Hierfür wurde die vom NASA Goddard Space Center zur Verfügung gestellten Aerosoldatenbank „AERONET“ genutzt (Holben2001). Diese sammelt die Daten von einem Netzwerk von ca. 400 weltweit verteilten Klimastationen. Basierend auf den in AERONET zur Verfügung gestellten Aerosol- und Wasserdampfwerten lassen sich solare Spektren für verschiedene Standorte auf der Welt simulieren. Dadurch lassen sich typische Betriebsszenarien der Sensoren nachvollziehen sowie die Auswirkung von Kalibrierfehlern auf typische Messergebnisse prognostizieren.

Hierzu wurden im Rahmen des Projektes umfangreiche Simulationen durchgeführt und im Rahmen eines Vortrags auf der CPV-8 Konferenz im Spanischen Toledo vorgestellt (Jaus2012).

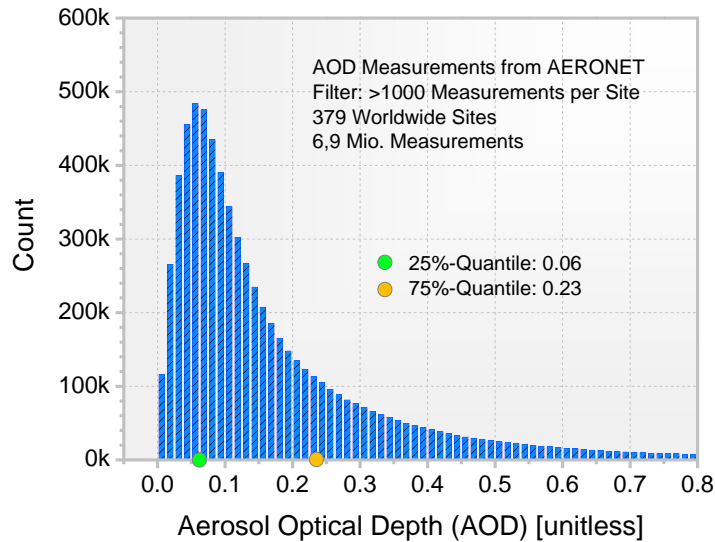


Abbildung 4: Auswertung der weltweiten Verteilung der Aerosolwerte (als "Aerosol Optical Depth") aus der AERONET Datenbank. Hierzu wurden 6,9 Mio Messungen an 379 Stationen ausgewertet. Es ist zu erkennen, dass eine Vielzahl der Messungen vergleichsweise geringe AOD Werte von 0.1 aufweisen, jedoch auch deutlich höhere Aerosolwerte vorkommen.

In Abbildung 4 fällt auf, dass fast alle Aerosolwerte höher liegen als der im Referenzspektrum AM1.5d ASTM G173 verwendete Wert von 0.084. Da höhere Aerosolwerte zu einer Verringerung des kurzwelligen Strahlungsanteils führen, ist im Mittel mit einem rotlastigeren Spektrum zu rechnen als durch das Referenzspektrum AM1.5d ASTM G173 definiert.

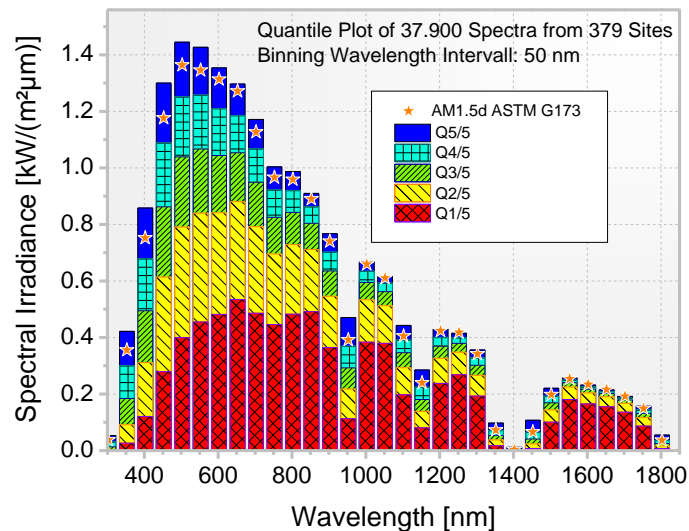


Abbildung 5: Quantil-Plot der Spektralsimulationen mit SMARTS, basierend auf 379 Stationen aus AERONET, wobei von jeder Station 100 Messpunkte zufällig ausgewählt und dazu die Spektren simuliert wurden. Aus der Quantils-Darstellung lässt sich sehr gut die unterschiedliche Variabilität des Spektrums erkennen. Diese ist für den kurzwelligen Bereich deutlich höher als für den langwelligen Bereich.

Aus den Unterschieden der Variabilität des Spektrums in Abbildung 5 folgt, dass in einer 3fach Stapelzelle die Top-Zelle deutlich stärkeren Schwankungen der Bestrahlungsstärke unterworfen ist als die Mittel- oder gar die Bottom-Zelle. Daher hat auch die messtechnische Erfassung der Top- und Mittelzelle Priorität vor der Erfassung der Bottom-Zelle.

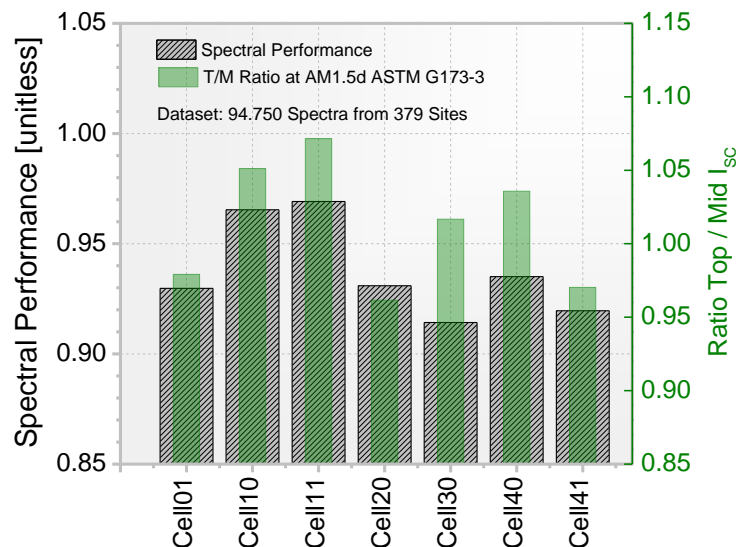


Abbildung 6: Spektrale Performance von 7 Solarzelltypen unterschiedlicher Hersteller. Die Spektrale Performance beschreibt, wie hoch die Leistungsfähigkeit einer Solarzelle unter den simulierten spektralen Bedingungen im Vergleich zur Leistungsfähigkeit unter Referenzbestrahlung liegt. Für die Durchführung der Berechnungen wurden die spektralen Empfindlichkeiten von Solarzellen verschiedener Hersteller und Institute angefragt und in anonymisierter Form für die Veröffentlichung verwendet.

Für die Berechnungen zu Abbildung 6 wurden Spektren von 379 Standorten verwendet, sodass sich eine Simulation unter recht realistischen repräsentativen Bedingungen durchführen lässt. Aus Abbildung 6 wird deutlich, dass je nach Solarzellentyp die Leistungsfähigkeit der Solarzelle unterschiedlich zwischen 2 und 7 % einbüßt. Dies ist etwas geringer als aufgrund der starken Variabilität des Spektrums zunächst vermutet. Es wird deutlich, dass sich auch noch Spielraum für eine weitere Aufsplittung des Spektrums in 4 Teilzellen bietet.

Basierend auf den spektralen Simulationen wurden geeignete Komponentenzellen, die in der Sensorik Verwendung finden sollen, ausgewählt und für die Integration in Sensoren vorbereitet.

Verstärkertechnologie

Gerade bei der Messung in sehr schmalen Bandbereichen des Spektrums verliert der erzeugte Photostrom im Detektor an Stärke. Daher wird hier eine Signalverstärkung benötigt. Marktgängige Verstärkerschaltungen sind aber darauf ausgelegt, unter konstanten Laborbedingungen betrieben zu werden. Aus diesem Grund wurde in diesem Arbeitspaket eine neuartige Schaltung entworfen und realisiert, bei der alle Komponenten speziell darauf ausgelegt sind, im Temperaturbereich von -30 °C bis +60 °C eine möglichst stabile und lineare Verstärkungsleistung zu erzielen. Hierzu wurden im Rahmen dieses Projekts das Schaltungs- und Leiterplattendesign realisiert und entsprechende Musterbaugruppen zur Evaluierung aufgebaut (Abbildung 7).

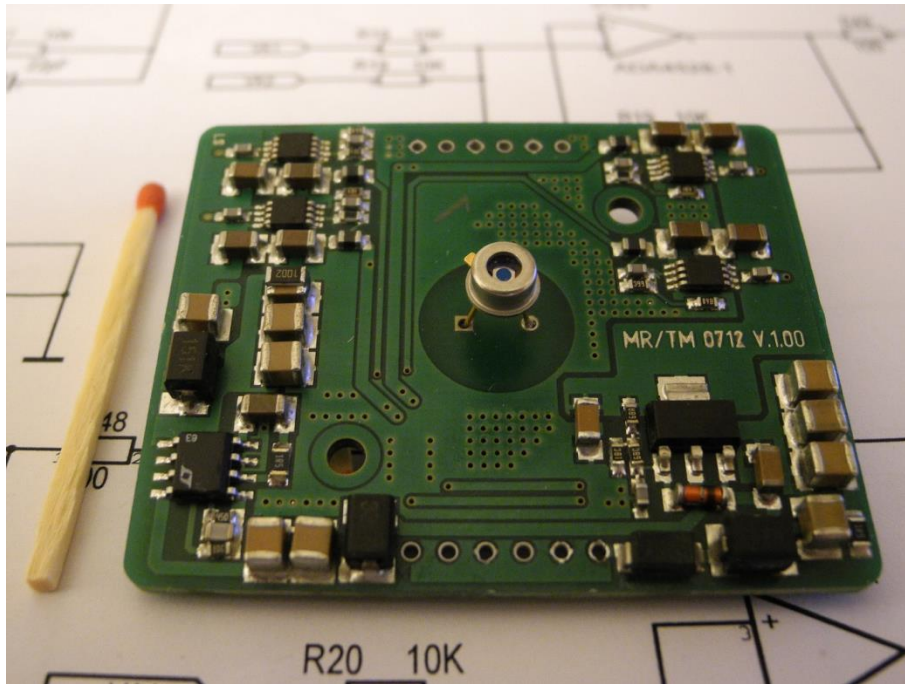


Abbildung 7: Platine mit Verstärkerschaltung für die Messung des Kurzschlussstroms einer Komponentenzelle oder einer Photodiode. Die Schaltung beinhaltet auch die Umwandlung in ein Spannungssignal, wobei Ausgangsverstärker gewährleisten, dass auch lange Kabelwege realisiert werden können.

Die In Abbildung 7 gezeigten Verstärker haben sich als außerordentlich leistungsfähig erwiesen und werden nun sowohl in unsere aktiv verstärkten Sensoren eingebaut, als auch als separat erhältliche Verstärker „AMP1“ angeboten.

5.1.2 Arbeitspaket 1.2: Entwicklung einer richtungsunabhängigen Kollektroptik

Bei Solarkraftwerken ohne Nachführeinheit verändert sich je nach Tageszeit der Einstrahlungswinkel der Sonne auf den Sensor. Dies hat jedoch einen direkten Einfluss auf die Wirkungsweise von vielen Spektralfiltern oder auch Komponentenzellen, da hierdurch die effektive Weglänge durch die Solarzellschichten verändert wird. Um dennoch eine unverfälschte Messung zu erhalten, müssen den Sensoren Diffusoren oder integrierende Ulbrichtkugeln vorgeschaltet werden. Daher ist es Gegenstand des Projektes, eine neuartige richtungsunabhängige Kollektroptik zu entwickeln und diese auf die Anforderungen der dahinter liegenden Sensoren anzupassen.

Um die optischen Eigenschaften der vorhandenen und neu zu entwickelnden Kollektroptiken bestimmen zu können, wurde in der ersten Phase des Projektes eine Messvorrichtung aufgebaut. In dieser Messvorrichtung wird mit einer Halogenlampe ein möglichst homogenes Beleuchtungsfeld mit ca. 50 mm Durchmesser erzeugt. Dieses Lichtfeld kann auch größere Kollektroptiken vollständig und gleichmäßig ausleuchten.

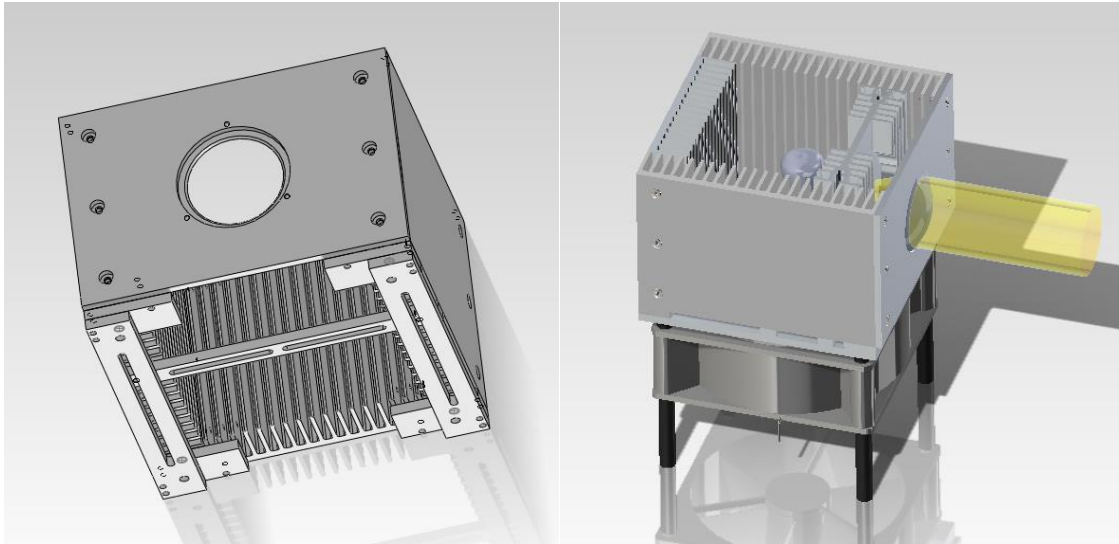


Abbildung 8: Lichtquelle zur Erzeugung eines mit parallelem Licht homogen ausgeleuchteten Lichtkegels.

Zu Beginn der Entwicklungen wies der erzeugte Lichtkegel noch größere Unregelmäßigkeiten in der Bestrahlungsstärke auf. Durch den Einsatz von Homogenisierungsoptiken konnte jedoch das Ergebnis deutlich verbessert werden und das in Abbildung 9 gezeigte Beleuchtungsfeld erzielt werden.

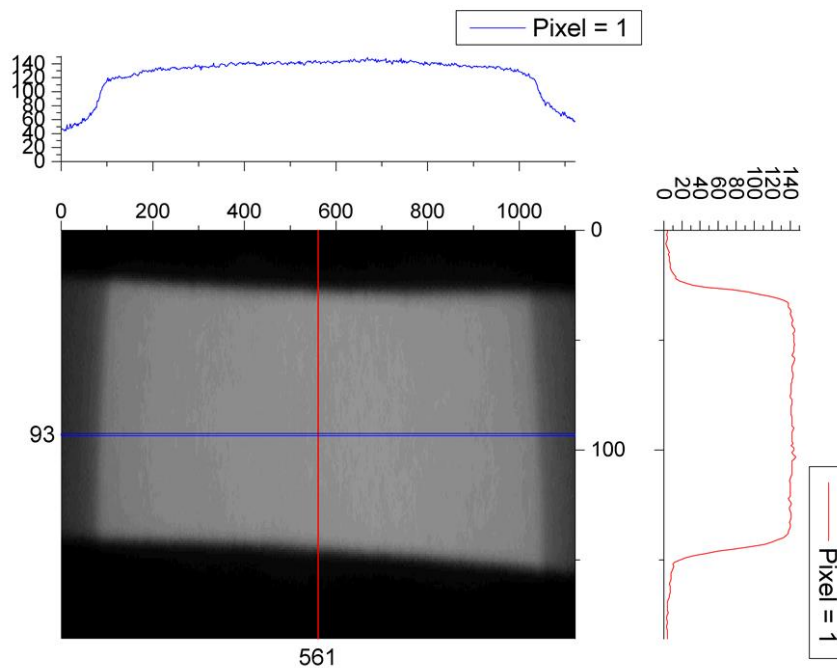


Abbildung 9: Bestrahlungsstärkemessung innerhalb des Lichtkegels zum Nachweis der Beleuchtungshomogenität.

Während der Messung werden die Kollektoroptiken auf einem neu konstruierten Drehtisch montiert. Dieser Drehtisch ist elektrisch angetrieben und verfügt über einen hochauflösenden Drehgeber zur Winkelbestimmung. Abbildung 10 zeigt eine Ansicht von oben auf die Prüffläche des Drehtisches.



Abbildung 10: Ansicht von oben auf die Prüffläche des Drehtischs.

Gesteuert wird das System über ein Python-Programm, das auch die Auslese-Elektronik für den unter der Kollektroptik montierten Sensor ansteuern kann. Dadurch lassen sich komplette Messzyklen schnell und reproduzierbar durchführen.

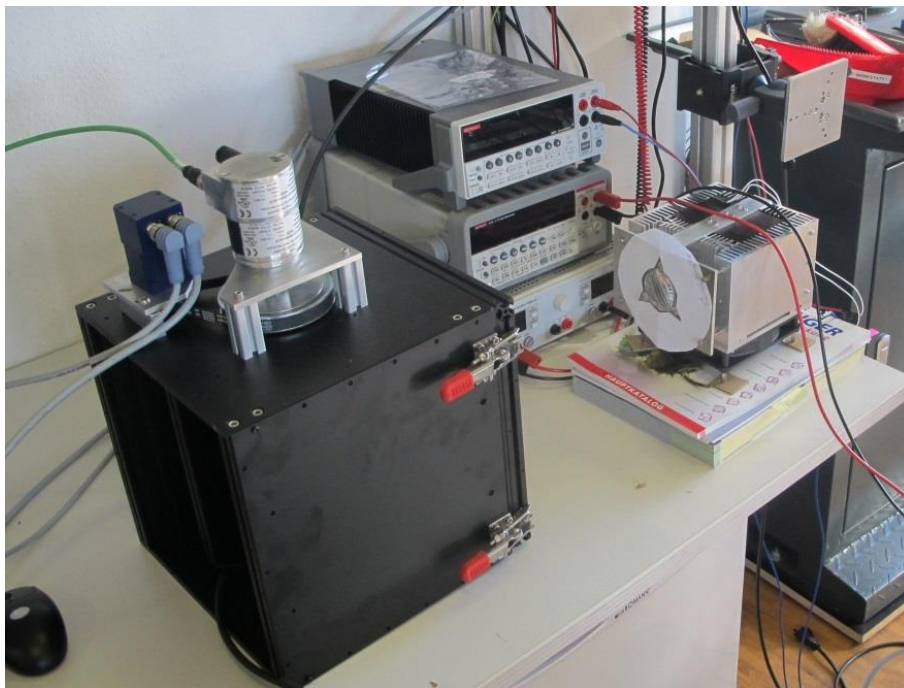


Abbildung 11: Gesamtaufbau zur Messung des richtungsabhängigen Verhaltens von Kollektroptiken.

Zur Entwicklung der richtungsunabhängigen Kollektroptiken selbst wurde zunächst eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt und danach verschiedene Ansätze zur Realisierung ausgewählt.

Abbildung 12 zeigt den idealen Verlauf einer richtungsunabhängigen Empfängeroptik: Sie weist den Verlauf einer Cosinus-Kurve auf, da sich der Ansichtsfaktor einer Detektorfläche mit dem Einstrahlungswinkel entsprechend der Cosinus Funktion verhält.

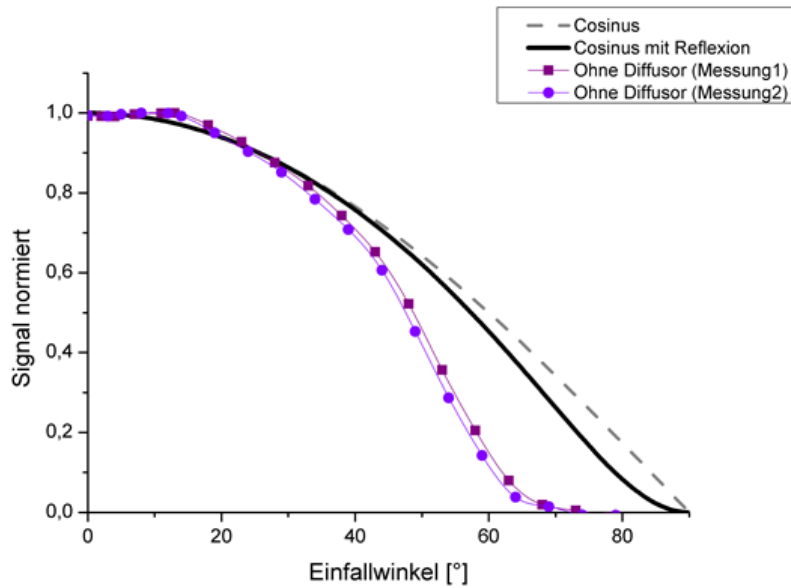


Abbildung 12: Vergleich ideale Cosinus Empfangscharakteristik, Cosinus Empfangscharakteristik mit Berücksichtigung der Reflexion an zwei Grenzflächen, Empfangscharakteristik einer Silizium Photodiode in ihrem primären Verkapselungsgehäuse ohne weiteren Diffusor.

Ein erster Aufbau einer richtungsunabhängigen Optik wurde kurz vor Projektbeginn realisiert. Mittels des neuen Charakterisierungsaufbaus konnte das optische Verhalten dieser Optik vermessen werden (Abbildung 13).

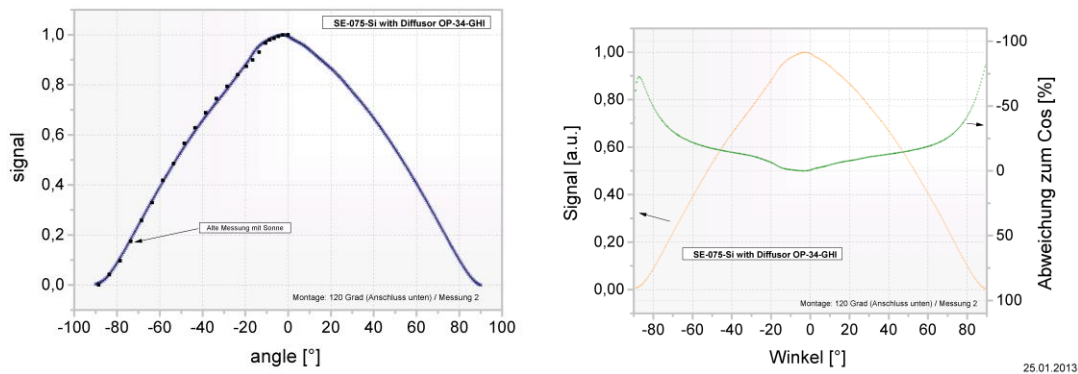


Abbildung 13: Ergebnisse der optischen Vermessung der ersten Prototypengeneration an Globalstrahlungsoptiken (richtungsunabhängige Empfangsoptiken). Die Cosinus-Charakteristik weist starke Unregelmäßigkeiten auf und selbst im Falle senkrechten Lichteinfalls träten deutliche Abweichungen zur idealen Cosinus Funktion auf.

Zur Verbesserung des optischen Verhaltens wurde für die Kollektoroptiken der in Abbildung 14 dargestellte optische Aufbau gewählt.

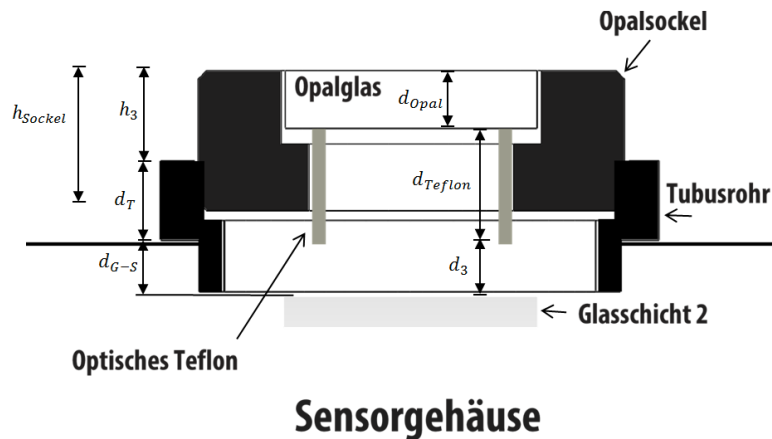
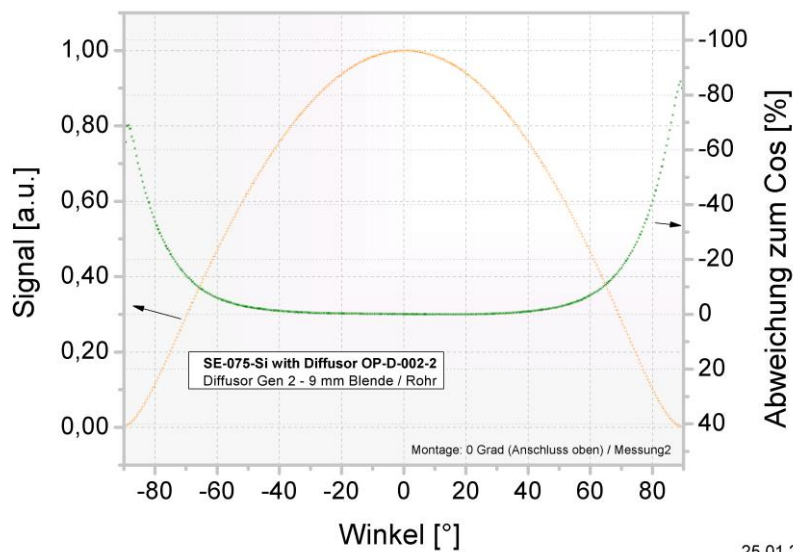


Abbildung 14: Verbesserter optischer Aufbau mit Opalglas und einem Mischzylinder aus optischem Teflon.

In mehreren Schritten wurden die verschiedenen Parameter dieses optischen Konzeptes getestet und schließlich das beste Konzept für eine stark verbesserte Generation an Optiken ausgewählt.

Abbildung 15 zeigt das Ergebnis dieser neuen Generation an Optiken. Das Winkelverhalten ist stark verbessert und annähernd symmetrisch. Die noch starke Abweichung zur idealen Cosinus Funktion für große Winkelbereiche ist auf den Einfluss der Reflektion an der Opalglas Ober- und Unterseite zurückzuführen.



25.01.2013

Abbildung 15: Neuer Diffusoraufsatz OP-D-002-2

Für viele Messaufgaben im Bereich der Solarstrahlungsmessung ist es notwendig, den Sensor auf bestimmte Bereiche des Himmels auszurichten. So kann beispielsweise mittels eines Scans des Himmels die Diffusstrahlung unter verschiedenen Winkeln erfasst werden. Mit dieser Methode lassen sich Rückschlüsse auf die Streueigenschaften der Aerosole und Wasserdampfbestandteile des Himmels ziehen. Für die Direktstrahlungsmessung selbst ist eine genaue Nachführung zum Sonnenlauf notwendig. Für die CPV werden hier häufig größere Genauigkeiten in der Nachführung gefordert als viele handelsübliche Instrumenten-Trackersysteme leisten. Daher wurde im Rahmen

dieses Projektes eine zweiachsige Nachführeinheit realisiert, mit der sich sowohl hochgenaue spektrale und thermische Direktstrahlungsmessungen durchführen lassen, als auch schnell die gewünschten Bereiche des Himmels abzuscannen (Abbildung 16).



Abbildung 16: Links: die neu entwickelte Nachführeinheit, hier bestückt mit einem Top-Komponentenzell-Spektralsensor, einem Pyrheliometer zur thermischen DNI Messung, sowie einem Tracking Sensor zur hochgenauen Positionierung. **Rechts:** Nachführeinheit mit Systemelektronik. Die integrierte Wettersensorik ermöglicht die Erfassung aller relevanten Parameter wie Wind, Temperatur und Luftfeuchte.

Das System weist einige Besonderheiten auf, die die Qualität von spektralen und thermischen DNI Messungen entscheidend verbessern:

- Ein System zur Luftfilterung sowie ein geheiztes Schutzgehäuse erlauben den kontinuierlichen Betrieb eines Absolute Cavity Radiometers (ACR). Dies ist die genaueste Kategorie an Instrumenten zur Messung von solarer Direktstrahlung mit einer Genauigkeit besser als 0.3%.
- Wettersensoren (Windstärke, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag) erlauben die genaue Ermittlung der Betriebsumgebung der Sensoren.
- Das System hat auch eine integrierte Hochdruckpumpe für gefilterte Druckluft. Die Druckluft kann über eine Düse auf das Eintrittsfenster von thermischen Pyrheliometern gerichtet werden. Durch Druckluftimpulse lassen sich Verschmutzungen durch Staub und Pollen entfernen und so eine höhere Messgenauigkeit im unbemannten Betrieb des Systems erreichen.

Das neue System konnte seine Qualitäten ausgiebig während einer Testphase am physikalisch-meteorologischen Observatorium in Davos (PMO) beweisen. Das PMO stellte hierzu auch ein absolute Cavity Radiometer des Typs PMO-6 cc zur Verfügung. Dies stellt für das Projekt ein besonderes Highlight dar, da das Observatorium in Davos die sogenannte Weltstandardgruppe für Direktstrahlung beinhaltet. Die Weltstandardgruppe stellt das „Urmeter“ für Solarstrahlung dar, \ alle 5 Jahre findet hier die „International Pyrheliometer Comparison“ statt, bei der die ACRs weltweit gegen die Weltstandardgruppe referenziert werden. Im Rahmen des Projektes konnten wir auch unsere Messdaten direkt gegen die Weltstandardgruppe vergleichen (Siehe auch Kapitel 5.2.3).

5.1.3 Arbeitspaket 1.3: Entwicklung eines doppelten Verkapselungsaufbaus zum Schutz der Sensoren

Um den hohen Umwelthanforderungen eines Sensors im Außeneinsatz besser gerecht zu werden, wurde im Rahmen des Projektes ein zweistufiger (doppelter) Verkapselungsaufbau realisiert.

Dabei gibt es eine **primäre Verkapselung**, die den Halbleiterchip des Sensors umschließt. Hierbei handelt es sich um ein Stahlgehäuse, das eine Beschichtung mit Nickel aufweist, als Korrosionsschutz und Diffusionsbarriere. Weiter ist in das Stahlgehäuse ein Glasfenster eingeschmolzen bzw. mit Glaslot eingelötet. Das Stahlgehäuse ist in zwei Teile unterteilt, die nach dem Einsetzen des Detektorchips miteinander verschweißt werden. Das Stahlgehäuse wird dabei mit trockenem Stickstoff gefüllt, sodass im Stahlgehäuse fast optimale Umgebungsbedingungen für einen langen Betrieb und geringe Degradation des Detektorchips herrschen.

Die **sekundäre Verkapselung** bildet das Sensorgehäuse aus Aluminium. Dieses hat ein Eintrittsfenster, das mittels einer Dichtmasse gegen das Gehäuse abgedichtet ist. Das Gehäuse hat einen großen Rückseitendeckel, über den im Betrieb ein Zugang für Servicezwecke erfolgen kann. Über die Rückseitenöffnung lassen sich auch die Detektorbaugruppe sowie die Verstärkerelektronik einbauen und im Servicefall ggf. ersetzen. Der Rückseitendeckel ist durch eine Polymerdichtung mit dem Sensorgehäuse verbunden. Die sekundäre Verkapselung bietet einen wirksamen Schutz vor dem Eindringen von Wasser, ist aber im laufenden Betrieb nicht komplett feuchtefrei. Daher stellt es eine ideale Ergänzung zur primären Verkapselung des Sensorchips dar. Die auf der Elektronikplatine verwendeten elektronischen Komponenten weisen ebenfalls eine Primärverkapselung auf, meistens in Form eines Spritzguss-Kunststoffgehäuses. Hierdurch kann das zweistufige Verkapselungskonzept durchgängig umgesetzt werden. Abbildung 17 zeigt den Sensor SE-185, in dem alle neuen Verkapselungs- und Verstärkungstechnologien umgesetzt wurden.



Abbildung 17: Der Sensor SE-185 während der Produktion. **Links:** Die Unterseite des Sensors ist geöffnet, sodass die Verstärkerelektronik sowie die zum neuen Stecker führenden Leitungen zu sehen sind. **Rechts:** Ansicht von oben mit Eintrittsfenster und Gewinden zur Befestigung von Kollimator oder Filteroptiken.

Um Dichtigkeitstests an verschiedenen Entwicklungsmustern des Sensorgehäuses durchzuführen, war die Entwicklung eines neuen Drucksystems von Nöten. Das System sollte einen kontrollierten Druckaufbau im Gehäuse bei gleichzeitiger Druckmessung ermöglichen und eine Stickstoff-Gasflasche als Druckquelle nutzen. Im System soll der Druck in einem Teilsystem erst bis zum erwünschten Endwert aufgebaut werden und im zweiten Teil des Systems - bestehend aus

Messgerät und Gehäuse - anschließend aufrechterhalten und gemessen werden – auch nach der Abkopplung des zweiten Systems vom ersten System (Siehe Abbildung unten). (Ziel war es, nur die Druck-Verluste, die durch undichte Gehäusewände und Dichtungen entstehen, zu bestimmen.) Durch die zwei abkoppelbaren Teilsysteme lässt sich schließlich ein Druck im Gehäuse in Gasflaschen-Nähe aufbauen und nach anschließender Abkoppelung weiterhin messen. Auch können durch die Abkopplungsmöglichkeit in beliebig vielen Gehäusen mit nur einer Gasflasche unterschiedliche, gewünschte Drücke aufgebaut werden. Schematisch sieht man den vorläufigen Aufbau des Gesamt-Systems in Abbildung 18.

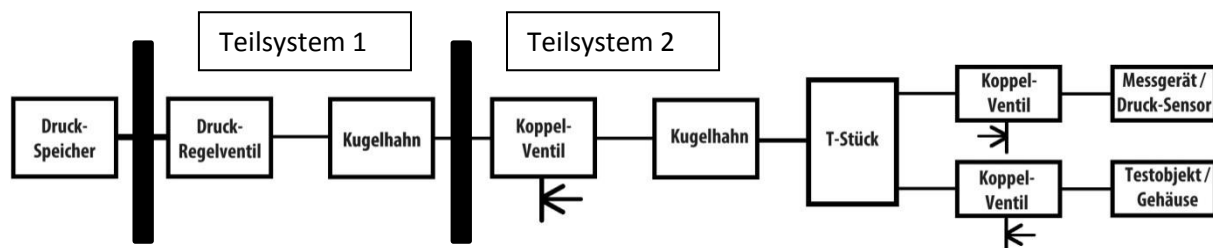


Abbildung 18: Schema des Drucktestsystems

Das erste Teil-System musste an ein bestehendes installiertes Drucksystem (Gasflasche – Druckminderer – Koppel-Ventil) angeschlossen werden und wird in Abbildung 18 als Druckspeicher bezeichnet. Der entwickelte Aufbau ermöglicht ebenfalls eine Abkopplung des Messgeräts und eine Abkopplung des Testobjekts bzw. des Gehäuses unter Aufrechterhaltung des Anfangsdrucks im Gehäuse. In Abbildung 19 ist schließlich die Realisierung des Drucksystems aufgezeigt.

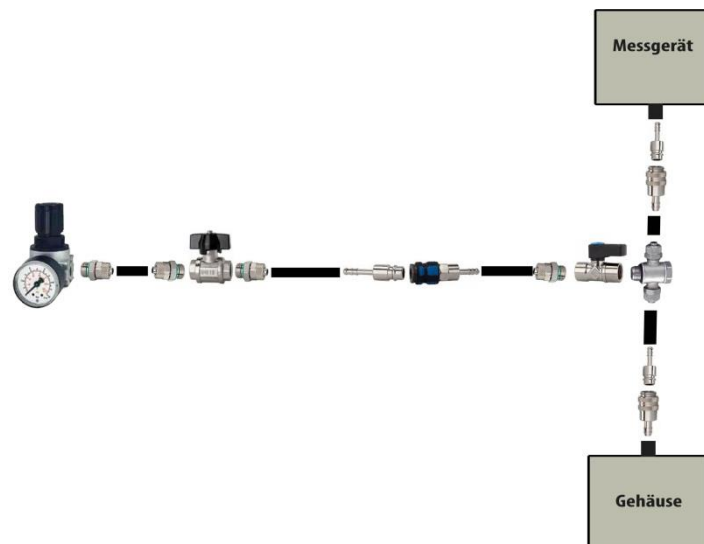


Abbildung 19: Realisierung des Drucksystems

Das Drucksystem wird seit seiner Entwicklung permanent eingesetzt, um an Sensoren einen Dichtigkeitstest der sekundären Verkapselung durchzuführen.

5.2 AP2: Aufbau und Test von Prototypen

5.2.1 Arbeitspaket 2.1: Charakterisierung und Kalibrierung von spektral selektiven Sensoren

Die Prototypen der Verstärkerelektronik, Sensoren und Aufbauten wurden soweit möglich bei uns im Hause charakterisiert, Messungen der Quanteneffizienz (QE-Messungen) wurden am Fraunhofer ISE durchgeführt.

Charakterisierung Verstärkerelektronik

Die im Projekt entwickelte Verstärkerelektronik wurde an einer Präzisionsstromquelle vermessen. Hier waren vor allem der Offset sowie der Absolute Verstärkungsfaktor interessant. Der Offset beschreibt die Ausgangsspannung bei offenem Eingang und beträgt idealerweise 0 V. Der Absolute Verstärkungsfaktor beschreibt die Genauigkeit der Verstärkung. Abbildung 20, Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen die hervorragenden Ergebnisse, die mit der neuen Elektronik erzielt werden konnten.

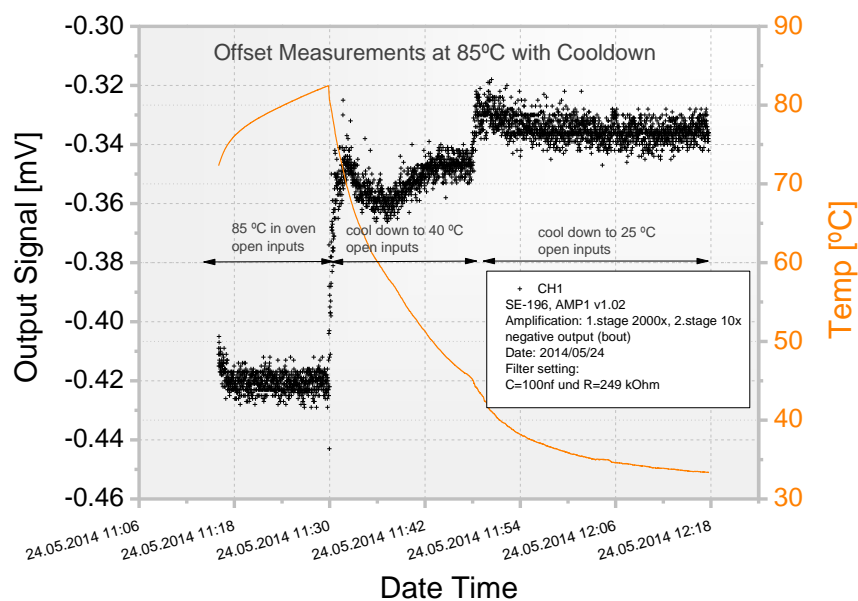


Abbildung 20: Temperaturabhängigkeit des Offsets. Der Offset verändert sich mit der Temperatur, ist aber niemals grösser als 0.5 mV. Dies entspricht 0.005% des Messbereichs.

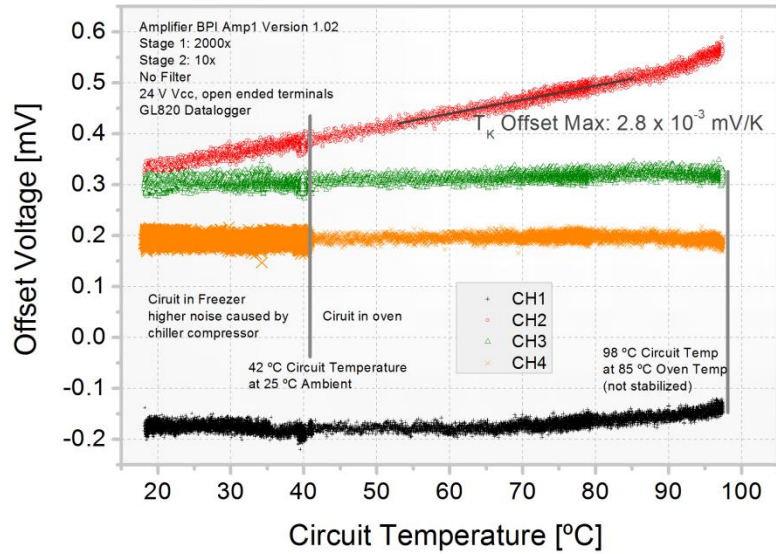


Abbildung 21: Temperaturabhängigkeit des Offsets, Messung an 4 Platinen gleichzeitig. Der maximale Temperaturkoeffizient des Offsets beträgt $2.8 \times 10^{-3} \text{ V/k}$, der maximale Offset über den Temperaturbereich 25 bis 85 °C beträgt 0.5 mV.

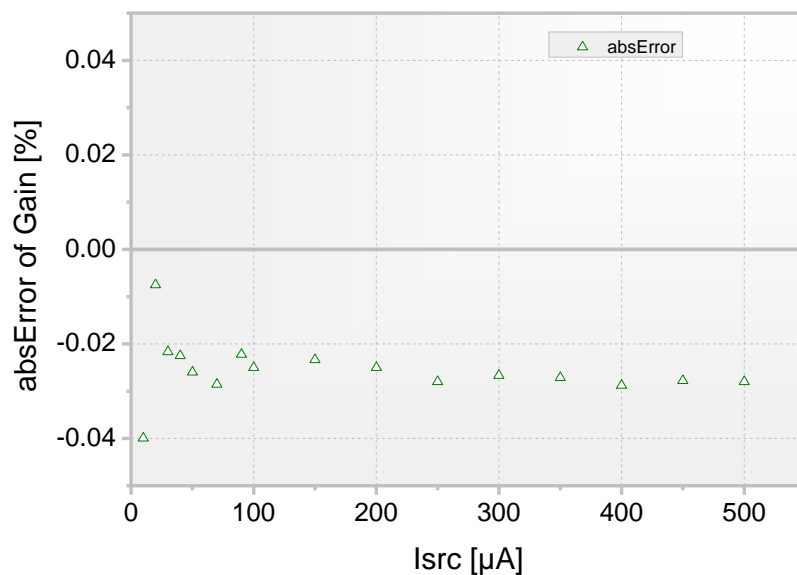


Abbildung 22: Fehler des Absoluten Verstärkungsfaktors bei verschiedenen Stromstärken, gemessen jeweils bei Raumtemperatur (25 °C). Es wurde ein maximaler Absolutfehler von 0.04 % des Messbereichs bestimmt. Dieser Wert beinhaltet auch den Absolutfehler der Stromquelle, der in einem ähnlichen Bereich liegt.

Messungen der Quanteneffizienz

Die Quanteneffizienz ist eine Angabe für Solarzellen oder Lichtsensoren, wie viele der eingestrahnten Photonen in Elektronen umgewandelt werden. Sie wird normalerweise in Abhängigkeit von der Wellenlänge des eingestrahnten Lichts gemessen. Abbildung 23 zeigt einen neu entwickelten Globalstrahlungssensor bei der Vermessung im Quanteneffizienzmessplatz des Fraunhofer ISE Kalibrierlabors.

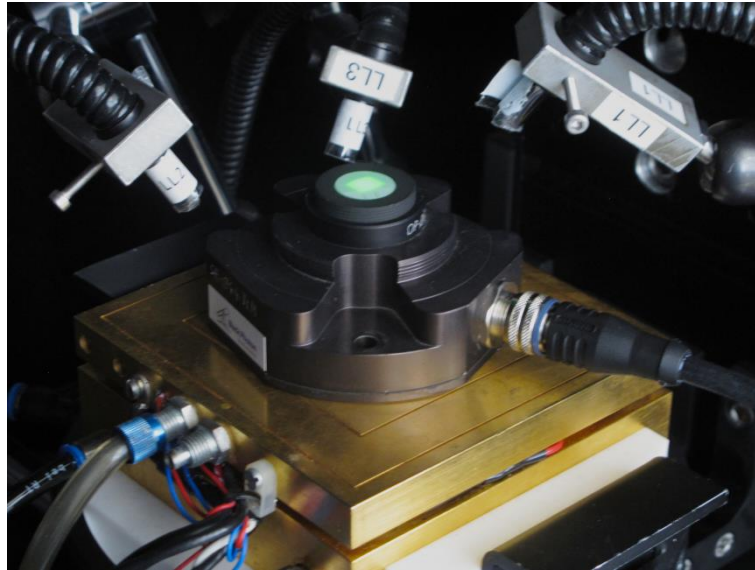


Abbildung 23: Vermessung am Quanteneffizienzmessplatz des Fraunhofer ISE Kalibrierlabors. Zum Zeitpunkt der Aufnahme wird gerade die Quanteneffizienz bei ca. 520 nm Wellenlänge vermessen, was der Wellenlänge von grünem Licht entspricht.

Als Ergebnis der Quanteneffizienzmessungen kann man genau erkennen, in welchem Wellenlängenbereich die jeweiligen Teilzellen der Stapelzellen aktiv sind. Die Zellen wurden hier direkt im doppelten Gehäuse gemessen, d.h. die Effekte aller Verkapselungsmaterialien sind in den Messungen erhalten.

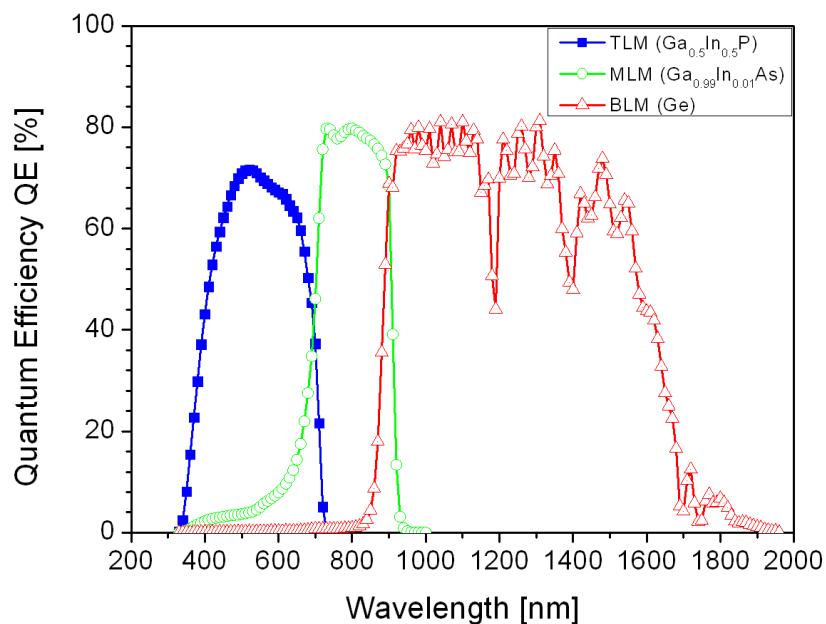


Abbildung 24: Quanteneffizienz der Stapelzelle GaInP, GaInAs, Ge

Neben Stapelsolarzellen werden auch gefilterte Silizium Zellen eingesetzt. Besonders spannend für das Projekt waren Zellen mit einem sehr engen Bandpassfilter bei 450 und 940 nm Wellenlänge. Die Wellenlänge 450 nm eignet sich ideal um den Aerosolgehalt der Luft zu messen, wohingegen bei 940 nm eine starke Absorptionsbande von Wasserdampf liegt und damit zur Bestimmung des

Wasserdampfgehalts in der Atmosphäre gut geeignet ist. Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen die erzielten Quanteneffizienzen (hier als Darstellung der Spektralen Empfindlichkeit) der beiden Testsensoren für die schmalbandige Filterung von Globalstrahlung mit Interferenzfiltern. Die besondere Herausforderung bei der Realisierung von Globalstrahlungssensoren mit Interferenzfiltern liegt darin, dass die Globalstrahlung aus allen Richtungen des Halbraums über den Sensor kommen kann. Ein Interferenzfilter ist jedoch für senkrechte Durchstrahlung ausgelegt. Hier muss also im Zusammenspiel mit der richtungsunabhängigen Empfangsoptik zunächst Diffuslicht erzeugt werden, von dem aus wiederum nur annähernd senkrecht Licht auf den Filter durchgelassen wird.

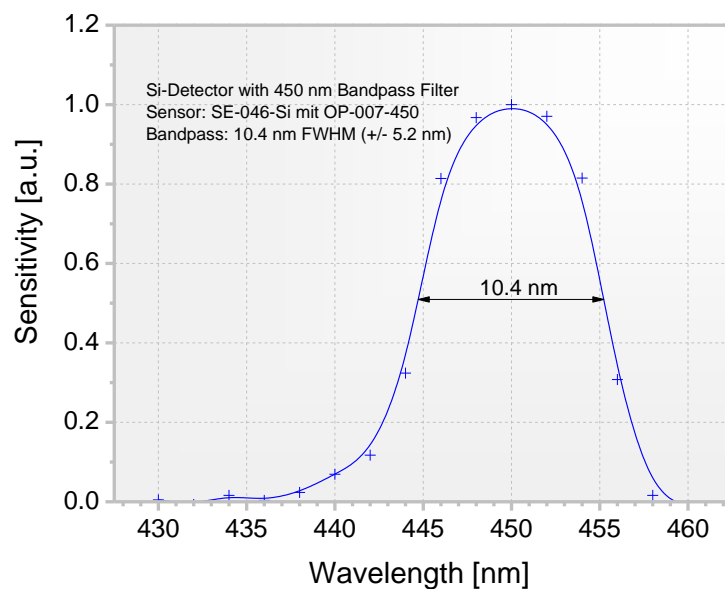


Abbildung 25: Spektrale Empfindlichkeit von Silizium-basierenden Photozellensensoren mit schmalbandigem Interferenz-Bandpassfilter mit 450 nm nominale Filterwellenlänge, gemessen unter einer Globalstrahlungsoptik.

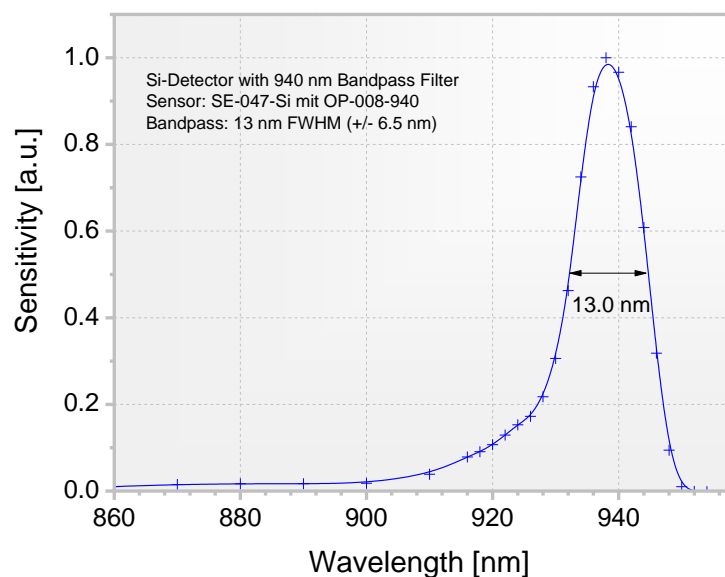


Abbildung 26: Spektrale Empfindlichkeit von Silizium-basierenden Photozellensensoren mit schmalbandigem Interferenz-Bandpassfilter mit 940 nm nominale Filterwellenlänge, gemessen unter einer Globalstrahlungsoptik.

Wie aus Abbildung 25 und Abbildung 26 erkennbar, wird durch die Globalstrahlungsoptik nur eine minimale Verbreiterung und Verschiebung der Filterkennlinie verursacht, die nur unwesentlich über das auch bei perfekt senkrechtem Lichteinfall vorhandene Maß hinausgehen.

System für Außenmessungen an Sensoren

Für die Messung von Sensoren im Außentest wurde im Rahmen des Projektes ein kleiner Datenerfassungsaufbau realisiert, mit dem die Signale der Sensoren aufgezeichnet werden können (Abbildung 27 und Abbildung 28).



Abbildung 27: System zur Erfassung von Messdaten aus Außenmessungen. Im mittleren Bereich ist der Datenlogger zu erkennen, der die analogen Signale, die von den Sensoren kommen, aufzeichnet. Im oberen Bereich sind AC-Sicherungen und Netzteile angeordnet.

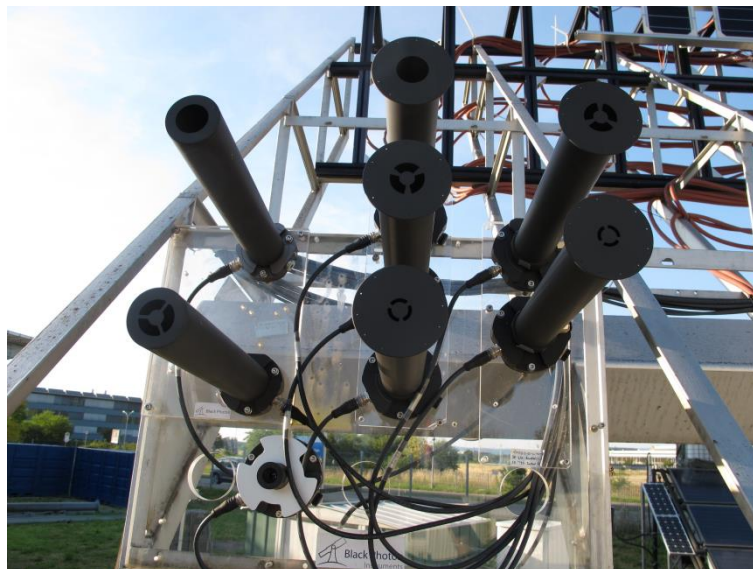


Abbildung 28: Messplattform zur Montage der Sensoren.

5.2.2 Arbeitspaket 2.2: Tests zur beschleunigten Alterung

Die Sensoren sind im realen Einsatz den täglichen Temperaturschwankungen unterworfen, sowie den Einflüssen von Luftfeuchtigkeit und Regen. Diese Faktoren können eine Materialalterung hervorrufen, die wiederum das Eindringen von Feuchtigkeit oder gar Wasser in das Sensorgehäuse bewirken kann. Um die Alterungseigenschaften der Sensoren zu untersuchen, wurden daher beschleunigte Alterungsversuche durchgeführt.

Einer der Schwerpunkte der Alterungsentwicklung lag auf den verwendeten Sensorsteckern (Abbildung 29). Bei diesen Steckern besteht die Schwierigkeit, dass sie auch im nicht gesteckten Zustand dicht sein müssen, da die Sensoren auf Kundenseite teilweise einige Tage ohne Anschlussstecker betrieben werden. Hier stellte sich schon vor Projektbeginn heraus, dass sie häufig den Temperaturwechselbelastungen in der Außenanwendung nicht gewachsen sind und undicht werden.

Als Test zur Temperaturwechselbelastung wurden die Zellen zwischen einem konstant bei 85 °C betriebenen Ofen und einem konstant bei -20 °C betriebenen Gefrierschrank regelmäßig umgelagert.



Abbildung 29: Flanschstecker VC-015-EnMO2 während der Temperaturwechseltests

Um bereits während der Tests Schäden am Sensor zu erkennen und die Feuchtigkeit, Temperatur und Druck im Sensor genau zu kennen, wurden einige Sensoren mit spezieller Sensorik ausgestattet.

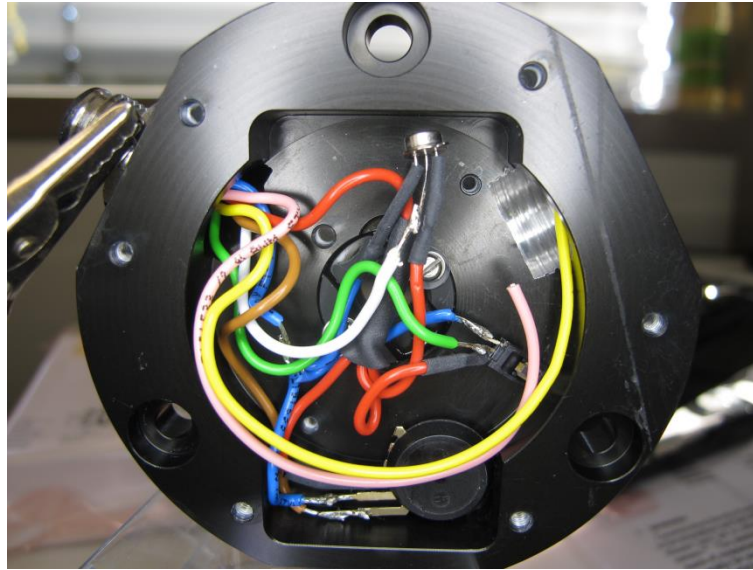


Abbildung 30: In den Sensor zu Testzwecken eingebaute Sensorik für Luftfeuchte, Temperatur und Luftdruck. Mit diesen Sensoren kann der genaue Verlauf des Mikroklimas im Sensor überwacht werden. Evtl. auftretende Undichtigkeit in einem Temperaturwechseltest wird sofort an verringerten Druckschwankungen und erhöhten Feuchtwerten erkannt.

Wird die Messelektronik während der gesamten Testdauer z.B. eines Humidity – Freeze – Tests (Feuchtewechseltest mit Ausfrieren) betrieben, so ergeben sich die in Abbildung 31 dargestellten Ergebnisse.

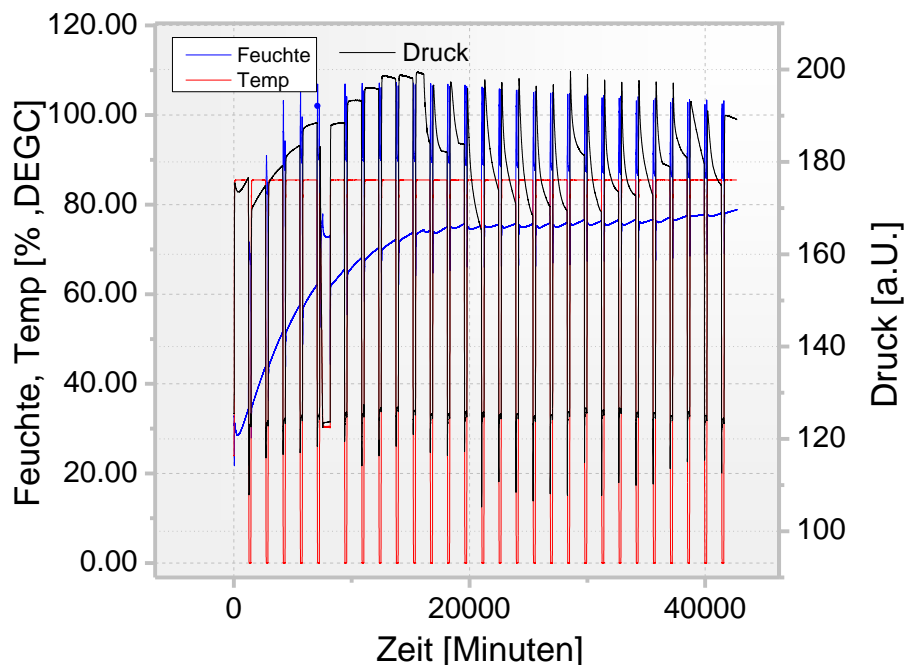


Abbildung 31: Ergebnis eines Humidity – Freeze – Tests (Feuchtewechseltest mit Ausfrieren). Aus den Daten der 3 integrierten Sensoren kann der Alterungsvorgang genau verfolgt werden und ein eventuell eintretender Schadensfall in der Dichtigkeit genau verfolgt werden.

Die Ergebnisse dieser Messungen ermöglichen auch die genaue Festlegung von Spezifikationen, unter welchen mikroklimatischen Bedingungen im Sensor verbaute Komponenten (wie z.B. die Elektronikplatine) betrieben werden.

Insgesamt wurden mit der neu entwickelten Sensorgeneration hervorragende Ergebnisse in der beschleunigten Alterung erzielt: Die Feuchtigkeit kann dauerhaft unterhalb des Kondensationsniveaus gehalten werden, die Kabelflansche sind nach einer Modifikation des Herstellers nun dicht, außerdem wurde eine komplette zweite Kabelflansch-Generation von einem Alternativhersteller erfolgreich getestet. Alle Baugruppen der Sensoren haben den finalen Test über 200x Temperaturwechsel und 10x Humidity-Freeze, beide durchgeführt am Fraunhofer ISE in Anlehnung an IEC 61215:2005, erfolgreich bestanden.

5.2.3 Arbeitspaket 2.3: Evaluation an weltweiten Kraftwerksstandorten

Im Rahmen des Projektes konnten wir an 3 verschiedenen Standorten weltweit unsere Technologien testen: In Davos, Schweiz, in Golden, Colorado, USA und in der Amal, Oman.

Evaluation in Davos / Schweiz

In Davos konnten wir am physikalisch-meteorologischen Observatorium in Davos (PMO) einen Test der im Zuge dieses Projektes aufgebauten 2-achsigen Nachführeinheit, sowie eines Top-Zell Spektralsensors durchführen. Der Test erstreckte sich vom Herbst 2013 bis Sommer 2014.



Abbildung 32: 2-achsige Nachführeinheit am physikalisch-meteorologischen Observatorium in Davos (PMO). Gut zu erkennen ist das blaue Absolutstrahlungsradiometer vom Typ PMO6-cc in einer Schutzeinhausung aus Plexiglas und Aluminium. Absolutstrahlungsradiometer sind prinzipbedingt offen konstruiert, sodass sie durch ein geeignetes System vor Staub, Regen und Feuchtigkeit geschützt werden müssen. Im Test wurde dies durch eine schnelle Schwenkbewegung der Elevationsachse bei Niederschlag, das kontinuierliche Belüften mit gefilterter Luft sowie das Beheizen der Schutzeinhausung erreicht.

Als DNI-Referenzmessungen wurden Messungen mit thermischen Pyrheliometern sowie einem Absolutstrahlungsradiometer (engl. Absolute Cavity Radiometer ACR) des Typs PMO6-cc durchgeführt. Hierzu wurde eine spezielle Schutzeinhausung konstruiert, sodass das ACR während der gesamten Zeit im Außenbereich betrieben werden konnte. Gegenstand der Untersuchungen in

Davos war dabei zum einen der Vergleich gegen weitere Referenzmessgeräte, die am PMO aufgrund der besonderen Stellung als Weltstandardgruppe für Direktstrahlung betrieben werden. Zweiter Hauptuntersuchungsgegenstand war das Verhalten aller beteiligten Komponenten und Systeme unter alpinen Winterbedingungen Abbildung 33.



Abbildung 33: Messaufbau mit Nachführeinheit am physikalisch-meteorologischen Observatorium in Davos im Januar 2014. Während der winterlichen Bedingungen lief das System kontinuierlich weiter. Der Schneefall zum Zeitpunkt der Aufnahme wurde vom Niederschlagssensor registriert und das System in eine Schutzposition gefahren. Hierbei ist das Pyrheliometer (Silbernes Messgerät mit schwarzem Frontstück) in einer Parkposition, in der das Eintrittsfenster gegen Niederschlag geschützt ist. Dadurch kann das Messgerät gleich bei Ende des Schneefalls wieder in die Messposition zurückfahren und sofort mit der Messreihe fortfahren. Ohne diese im Projekt entwickelten Technologien müsste zunächst gewartet werden, bis der Schnee getaut ist.

Die Messkampagne in Davos war sehr erfolgreich und konnte die uneingeschränkte Einsatzfähigkeit aller Komponenten bei Winterbedingungen nachweisen. Die in der 2-achsigen Nachführeinheit verbauten Technologien zur Reduktion von Umwelteinflüssen auf das Pyrheliometer ermöglichte die Durchführung des Messbetriebes selbst in den kurzen Pausen zwischen zwei Niederschlagsperioden.

Evaluation in Golden, CO, USA

Im September 2014 wurden in Golden, USA, im Rahmen der National Pyrheliometer Intercomparison am NREL (National Renewable Energy Lab) Messungen an zwei Systemen mit unterschiedlicher Sensorbestückung durchgeführt



Abbildung 34: National Pyrheliometer Intercomparison in Golden, Co, USA

Im Mittelpunkt standen dabei Messungen zur Nachführgenauigkeit, Messungen mit Absolutradiometern, sowie spektrale Messungen mit Top-Zellsensor SE-185-T. Der Sensor SE-185 ist ein Testsensor, der einen Großteil der im Projekt neu entwickelten Technologien in sich vereint:

- Der neu entwickelte AMP1 Transimpedanzverstärker
- Ein GaInP Komponentenzellsensor
- Eine Membran-basierte Belüftung
- Die neuste Revision des Sensor-Hauptgehäuses
- Der in den Alterungstests neu qualifizierte 8-polige Stecker



Abbildung 35: Der Sensor SE-185 während der “National Pyrheliometer Intercomparison” in Golden, Colorado, USA.

Abbildung 36 und Abbildung 37 zeigen in Golden durchgeführte Messungen der Direktnormalstrahlung (DNI) mit einem Breitband Thermischen Pyrheliometer im Vergleich zur DNI, die über den Top-Zellen Sensor SE-185 ermittelt wurde.

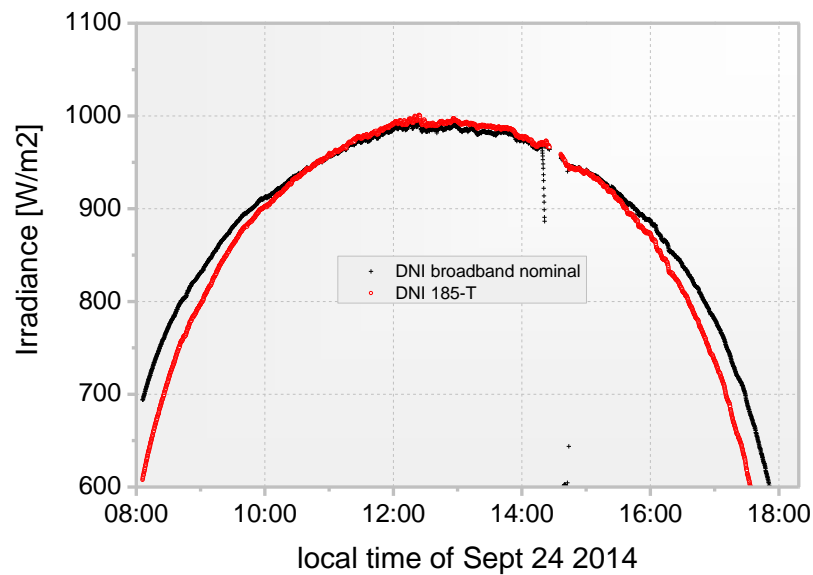


Abbildung 36: Messung der Direktnormalstrahlung (DNI) mit einem Breitband Thermischen Pyrheliometer im Vergleich zur DNI, die über den Top-Zellen Sensor SE-185 ermittelt wurde. Die Messungen wurden in Golden, Co, USA durchgeführt, bei stabilen Wetterbedingungen und sehr klarem Himmel. Gut erkennbar ist dennoch der Einfluss des Spektrums auf die ermittelte DNI. Der Top-Zell Sensor misst vor allem im Wellenlängenbereich von 400-700 nm, während der thermische DNI Sensor von 400-3000 nm Wellenlänge misst. Dementsprechend misst der Top-Zell Sensor eine geringere DNI als der thermische Sensor. Dies ist von hoher Bedeutung für Solarzellen, die ebenfalls im Bereich 400-700 nm empfindlich sind, da der Top-Zell Sensor besser die ihnen zur Verfügung stehende Strahlung widerspiegelt.

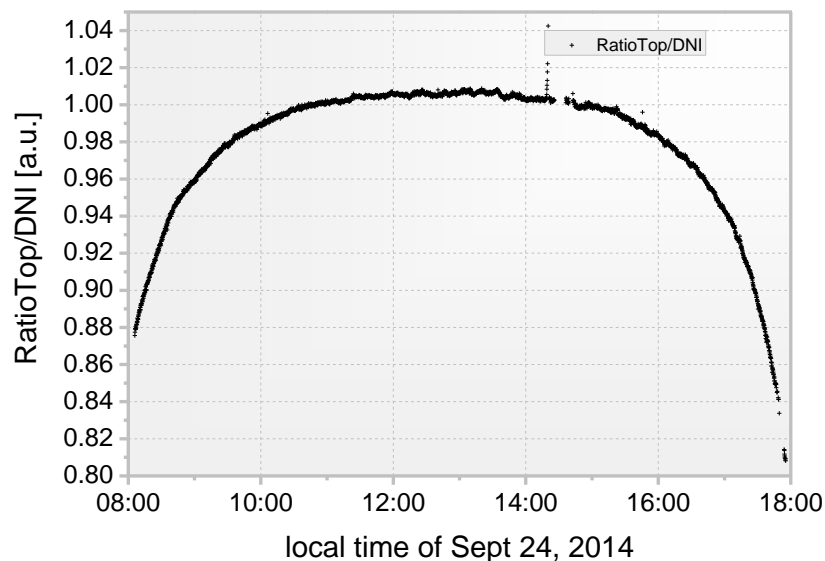


Abbildung 37: Verhältnis zwischen Top-Zell Sensor und thermisch gemessener DNI aus derselben Messung, die auch in Abbildung 36 dargestellt ist. Gut zu sehen ist, wie sich das Verhältnis im Lauf des Tages verändert.

Hauptgrund hierfür ist der Weg der Sonnenstrahlen durch die Erdatmosphäre, der sich im Laufe des Tages entsprechend dem Sonnenstand verändert.

Weiter wurden Messungen der Genauigkeit der 2-achsigen Nachführung durchgeführt (Abbildung 38Abbildung 1).

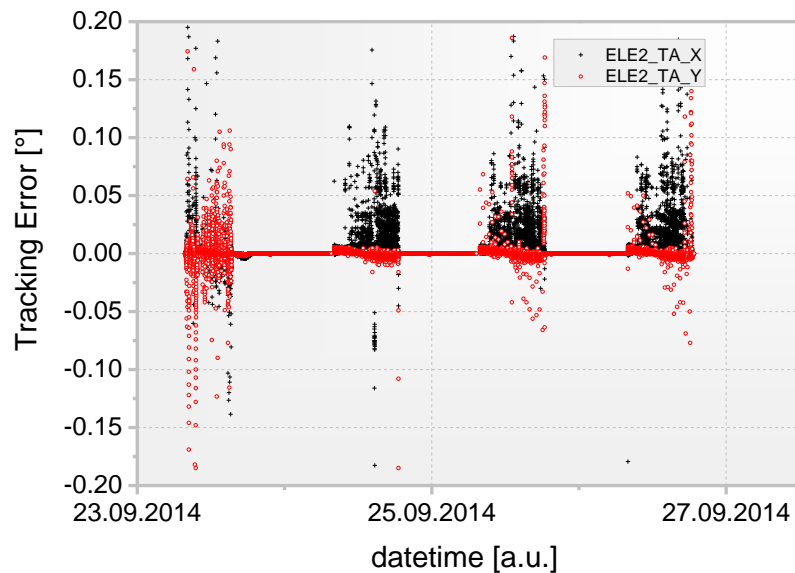


Abbildung 38: Messungen der Trackinggenauigkeit. Der Tracker zeigt fast ausschließlich Trackinggenauigkeiten von 0.1 Grad und erreicht damit eine hervorragende Genauigkeit.

Weiter wurden in Golden Temperaturmessungen durchgeführt, um zu sehen, wie sich das System bei kontinuierlichem Betrieb unter hoher Sonneneinstrahlung verhält (Abbildung 39)

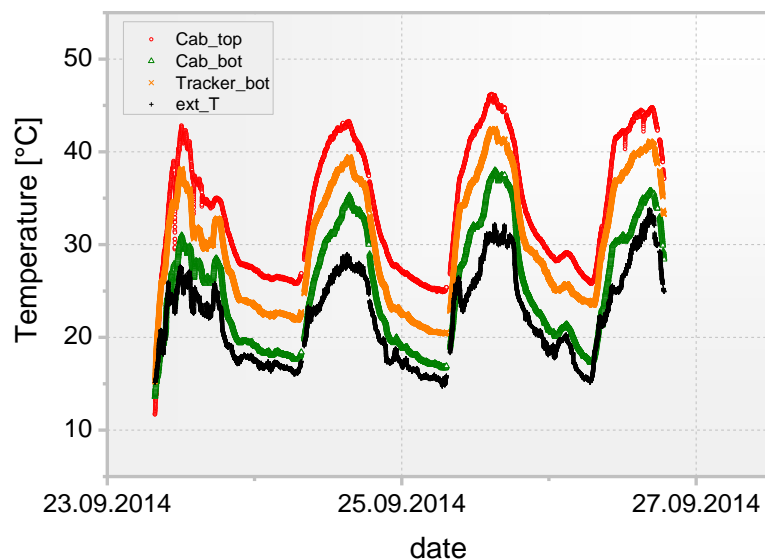


Abbildung 39: Messungen der Temperatur in der Nachführeinheit sowie im ausschließlich passiv gekühlten Schaltschrank. Die Messungen zeigen, dass die maximale Temperaturerhöhung 15 Kelvin beträgt und damit auch bei hohen Temperaturen eine sichere Funktion gewährleistet ist.

Evaluation in Amal, Oman

Während des Projektes wurden Technologien entwickelt, um eine Verschmutzung von Solarstrahlungssensoren so weit wie möglich zu reduzieren. Die Verschmutzungsraten von optischen Sensoren in der Außenanwendung sind gerade bei Sensoren zur Messung von Direktstrahlung relativ hoch, da die Schmutzpartikel sowohl durch Absorption als auch durch Streuung negativ auf das Messergebnis wirken (siehe auch PES Artikel im Anhang). Hierdurch wird die Messgenauigkeit z.B. von Spektralmessungen stark verringert.

Auf einer Kundeninstallation in der Wüste Omans konnte ein idealer Ort für den Nachweis der Funktionsfähigkeit gefunden werden. Hierzu wurde eine Luftaufbereitungseinheit „AirShield“, die kontinuierlich Luft durch Sensoren pumpt, entwickelt und aufgebaut. Die Technik wurde im Oman für Circumsolarstrahlungssensoren eingesetzt, die Ergebnisse lassen sich jedoch direkt auf die fast baugleichen Komponentenzellsensoren übertragen. Zur Installation im Oman wurde auch eine gemeinsame Pressemitteilung (DLR/Glasspoint/Black Photon) erstellt, siehe Anhang.



Abbildung 40: Installation an einer DNI- und Circumsolarstrahlungsmessstelle im Oman. Im rechten Bildteil ist die Box zur Filterung der Umgebungsluft zu sehen, die anschließend im blauen Schlauch zu den Sensoren geführt wird.

Die Luftversorgungseinheit im Oman läuft bisher sehr zuverlässig und ohne Ausfälle, die Sensoren können hierdurch auch unter härtesten Wüstenbedingungen weitgehend staubfrei gehalten werden.

6 Ökonomische Bewertung und Marketingaspekte

6.1 Projektverlauf vs. Projektplanung

Aufgrund der angespannten wirtschaftlichen Situation in der CPV und Dünnschichtindustrie wurden alle Projektmittel nur nach längerer genauer Überlegung ausgegeben und teilweise bereits geplante Ausgaben nicht getätigt. Einige Gegenstände wurden nicht angeschafft und stattdessen günstigere Wege gesucht, um die notwendigen Versuche und Entwicklungsarbeiten dennoch mit geringeren

Kosten durchführen zu können. Dies betraf hauptsächlich zwei größere Anschaffungspositionen, den Erwerb eines Spektrometers sowie einer Klimakammer. Der Erwerb eines Spektrometers wurde durch den Aufbau eines eigenen Spektrometeraufbaus im Rahmen einer Praktikumsarbeit ersetzt. Gleichzeitig wurden statt einer Außenkalibrierung von Sensoren unter Einsatz eines Außenspektrometers zur Bestimmung der spektralen Eigenschaften der momentanen Sonnenstrahlung durch vermehrte Kalibrierungen unter den Indoor-Kalibriergeräten des Fraunhofer ISE ersetzt. Die eigentlich geplante Anschaffung einer Klimakammer wurde nicht umgesetzt, stattdessen wurden verstärkt Experimente in der bereits vorhandenen Ofen/Gefrierschrank Kombination durchgeführt, in der die Bauteile durch Umlagerung zwischen den beiden Geräten Temperaturzyklen ausgesetzt sind (-20 °C / + 85°C). Dieser Test ist durch die große Temperaturänderungsrate direkt nach der Umlagerung höher als bei normalen Klimaprüfungen, jedoch erwiesen sich die besten Muster der Sensorkomponenten auch diesen Bedingungen gut gewachsen, sodass wir die Sensoren mit dem guten Gefühl einer stärkeren Prüfung, als eigentlich üblich, auf den Markt bringen können. Zusätzlich wurden Kapazitäten in den Klimaschränken des Fraunhofer ISEs zeitweise gemietet, um Alterungsexperimente an Komplettsensoren durchzuführen.

Aufgrund zahlreicher Betriebsschließungen im Bereich Dünnschicht-Technologie wurde dieser Bereich im Projekt schwächer gewichtet, stattdessen wurde verstärkt Wert auf eine Anwendbarkeit der Systeme für Wetterdienste und Wetterdienstfirmen, wie z.B. Meteotest, Meteowiss, Deutscher Wetterdienst, usw. gelegt. Diese bieten immer mehr Dienstleistungen im Bereich Solarstrahlungsmessung, Solarstrahlungsprognose und auch Anlagenmonitoring an. Für diese Kundengruppe ist ein autonomer Betrieb der Sensoren entscheidend, Technologien die eine Erhöhung der Messgenauigkeit durch die Verringerung von Verschmutzungsraten erlauben von großem Interesse. Weiter werden immer mehr Messungen direkt in Wüstengegenden durchgeführt, da hier das Solarpotential am größten ist. Aufgrund der hohen Masse an ungebundenem Staub sind jedoch auch hier Technologien von großem Interesse, die das Durchführen von genauen Solarstrahlungsmessungen ohne Verschmutzungseinfluss bei diesen Bedingungen erlauben. Da im Projekt insbesondere industriell und unter rauen Bedingungen einsetzbare Sensoren entwickelt werden sollten, wurde dem autonomen Betrieb von Sensoren mit integrierten Technologien zur Reduktion der Verschmutzung von Sensoren ein besonderer Schwerpunkt eingeräumt.

6.2 Überführung der Technologien in Produkte

Im Rahmen des Projektes wurden mehrere Schlüsseltechnologien für die vereinfachte Spektrale Verteilung von Stapelsolarzellen entwickelt. Auf Basis der entwickelten Technologien konnten mehrere Produkte vom Entwicklungsstadium bis zur Marktreife gebracht werden. Diese sind teilweise vollständig aus den im Projekt entwickelten Technologien entstanden, teilweise wurden Schlüsselkomponenten aus dem Projekt mit anderen Technologien außerhalb des Projekts kombiniert, um zu völlig neuen Produkten zu gelangen.

Folgende Produkte sind im Rahmen dieser Technologieentwicklung zu nennen:

6.2.1 BPI IT1: Stapelzellbasierter Spektrolsensor

Durch die im Projekt neu entwickelten Technologien konnte eines der Hauptprodukte von Black Photon Instruments entscheidend verbessert werden. Es verfügt nun über uneingeschränkte Außentauglichkeit durch den zweiteiligen Verkapselungsaufbau und eine verbesserte

Steckverbindung. Durch eine Veränderung des optischen Systems kann nun auch ein System zur Reduzierung der Verschmutzungsrate des Sensors angeschlossen werden, sodass ein weitgehend autonomer Betrieb des Sensors möglich ist. Ein Datenblatt des Sensors ist im Anhang.

6.2.2 BPI-SYS: Ein System zum Monitoring von PV Kraftwerken

Im Rahmen des Projektes wurde ein System entwickelt, um in der Außenmessung eine Vielzahl an Sensoren zu erfassen (Abbildung 27). Dieses System ist sehr leistungsfähig, robust und kompakt und eignet sich deshalb auch ideal für Kundenmessungen. Aufgrund der positiven Erfahrungen wird es daher als Produkt „BPI-SYS“ angeboten. Das Produktdatenblatt befindet sich im Anhang des Reports.

6.2.3 BPI-AirShield: Ein System zur Verhinderung von Verschmutzung von Solarsensoren

Mit dem erstmals im Oman getesteten System (Abbildung 40) kann eine Verschmutzung von Sensoren insbesondere unter Wüstenbedingungen vermieden werden. Es ist daher insbesondere für Messungen an trockenen Standorten mit hoher Sonneneinstrahlung interessant. Das System wird zurzeit an Bestandskunden und voraussichtlich ab Dezember 2014 unter der Bezeichnung „BPI AirShield“ offiziell angeboten, siehe beigefügter Flyer.

6.2.4 BPI Sunscanner SC-1: Eine zweiachsige Nachführung für den autonomen Betrieb von Solarsensoren

Die im Projekt realisierte 2-achsige Nachführeinheit (Abbildung 32) wurde mit zahlreichen Features ausgestattet, die es ermöglichen, dass Solarsensoren längere Zeit ohne den Eingriff von Bedienern betrieben werden können. Hierzu zählen Möglichkeiten für die automatische Rekalibrierung, für die automatische Reinigung, und für die wetterabhängige Schutz-Positionierung von Sensoren. Das System eignet sich für alle Arten von Direktstrahlungssensoren (thermisch oder Halbleiter-basiert, Spektralmessung, Aerosolmessung, CSR) sowie durch eine optionale Verschattungsplattform auch für Globalstrahlungs- und Diffusstrahlungsmessungen.

Ein Produktdatenblatt befindet sich im Anhang des Reports.

6.2.5 BPI-AMP1: Ein hochgenauer Verstärker für Sensoren

Die im Projekt realisierte Verstärkerelektronik besitzt herausragende Merkmale in Bezug auf Verstärkungsgenauigkeit und Temperaturstabilität. Daher wird das System auch separat als BPI - AMP1 angeboten. Ein Produktdatenblatt befindet sich im Anhang des Reports.

6.3 IP & Veröffentlichungen aus dem Projekt

6.3.1 Patente

Unter AZ 10 2012 022 052.9 wurde am 9.11.2012 beim DPMA eine Anmeldung „Optoelektronischer Sensor und dessen Verwendung“ eingereicht zum Thema spektrale Filterung von Sensoren.

Unter AZ 10 2012 042 110.0 wurde am 10.12.2012 beim DPMA eine Anmeldung „Vorrichtung zur Messung von Solarstrahlung“ eingereicht. Hierin wird beschrieben, wie mittels einer neuartigen Nachführeinheit mehrere Sensoren so gesteuert werden können, dass einer der Sensoren die überwiegende Zeit in einem Schutzzustand gehalten wird und damit zur periodischen Rekalibrierung der anderen Sensoren verwendet werden kann. Das Patent wurde inzwischen erteilt.

6.3.2 Paper zur CPV-8 in Toledo

Zur CPV Konferenz 2012 in Toledo, Spanien, wurde ein Konferenzbeitrag eingereicht zum Thema „Generalized Spectral Performance Evaluation of Multijunction Solar Cells using a Multicore, Parallelized Version of SMARTS“. Der Beitrag wurde als Vortrag ausgewählt.

In der Photovoltaik Zeitschrift PES Artikel wurde ein Artikel „Navigating solar irradiance measurement issues“ veröffentlicht.

Auf dem 13th BSRN Scientific Review and Workshop in Bologna (Italy) September 9-12, 2014 wurde ein Poster zum Thema “High precision solar trackers with integrated sensor cleaning systems” veröffentlicht.

Zur Einführung des Messsystems CSR-460 im Oman wurde eine Pressemitteilung zusammen mit dem Deutschen Institut für Luft und Raumfahrt (DLR) und dem Kunden Glasspoint mit dem Titel „DLR und Black Photon Instruments haben neuen CSR- Sensor für konzentrierende solarthermische Anlagen an Wüstenstandorten“ entwickelt.

Alle Veröffentlichungen finden sich im Anhang zu diesem Report.

7 Fazit

Im Projekt „Entwicklung von Sensoren zur vereinfachten Erfassung der Spektralverteilung der Solarstrahlung für Photovoltaik-Stapelzellen“ wurden zahlreiche Technologien entwickelt, die eine einfache, genaue und robuste Möglichkeit zur Messung von spektralen Eigenschaften von Solarstrahlung eröffnen.

Die entwickelten Technologien ermöglichen es, empfindliche Halbleitersensoren in rauen Außenbedingungen eines typischen Solarkraftwerks einzusetzen. Als Schlüsseltechnologien hierzu wurde eine doppelte Verkapselungstechnologie sowie ein System zur Reduktion des Schmutzeintrags auf die Empfangsoptik entwickelt. Es wurden sowohl Sensoren zur Erfassung der spektralen Eigenschaften der Direktstrahlung sowie der Globalstrahlung entwickelt. Die Eigenschaften der Direktstrahlung spielen eine besondere Rolle bei konzentrierenden Photovoltaik-Systemen, die Eigenschaften der Globalstrahlung sind für die nicht-konzentrierenden Systeme (z.B. Dünnschicht Stapelsolarzellen) relevant.

Basierend auf den entwickelten Technologien konnten 5 Produkte entscheidend verbessert oder neu eingeführt werden. Von diesen wurden bereits erste Stückzahlen verkauft und mit einem sehr positiven Feedback von den Kunden angenommen. Wir rechnen daher damit, dass wir aufgrund der Förderung durch die DBU mit den neuen Produkten unseren Beitrag zum Ausbau der Solarenergie leisten und somit zu einer umweltfreundlichen Energieerzeugung beitragen können.

8 Literaturverzeichnis

- Güymard1995* C. Gueymard, "SMARTS2, a simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithms and performance assessment", Report FSEC-PF-270- 95. Florida Solar Energy Center, 1995.
- Güymard2001* C. Gueymard, "Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance," Solar Energy, vol. 71, no. 5, pp. 325-346, Nov. 2001.
- Holben2001* Holben, B.N., D.Tanre, A.Smirnov, T.F.Eck, I.Slutsker, N.Abuhasan, W.W.Newcomb, J.Schafer, B.Chatenet, F.Lavenü, Y.J.Kaufman, J.Vande Castle, A.Setzer, B.Markham, D.Clark, R.Frouin, R.Halthore, A.Karnieli, N.T.O'Neill, C.Pietras, R.T.Pinker, K.Voss, and G.Zibordi, 2001: "An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol Optical Depth from AERONET", J. Geophys. Res., 106, 12 067-12 097.
- IEA2014* "Trends 2014 in Photovoltaic Applications", International Energy Agency Report IEA-PVPS T1-25:2014, ISBN 978-3-906042-25-1
- Jaus2012* Joachim Jaus & Christian A. Gueymard: "Generalized Spectral Performance Evaluation of Multijunction Solar Cells Using a Multicore, Parallelized Version of SMARTS", Proc. of 8th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-8), April 16-18, 2012, Toledo, Spain

9 Anhänge

Original-Veröffentlichungen:

- Konferenzbeitrag zur CPV Konferenz 2012 in Toledo: „Generalized Spectral Performance Evaluation of Multijunction Solar Cells Using a Multicore, Parallelized Version of SMARTS“.
- PES Photovoltaik Zeitschrift Artikel : „Navigating solar irradiance measurement issues“
- 13th BSRN Scientific Review and Workshop in Bologna (Italy) September 9-12, 2014: Poster zu “High precision solar trackers with integrated sensor cleaning systems”.
- Pressemitteilung zusammen mit dem Deutschen Institut für Luft und Raumfahrt (DLR) und dem Kunden Glasspoint: „DLR und Black Photon Instruments haben neuen CSR- Sensor für konzentrierende solarthermische Anlagen an Wüstenstandorten entwickelt“. Verfügbar auf DLR Website auch in Englisch
- Produkt-Datenblatt zu BPI-IT1
- Produkt-Datenblatt zu BPI-SYS
- Produkt-Datenblatt zu BPI-Airshield
- Produkt-Datenblatt zu BPI-Sunscanner SC1
- Produkt-Datenblatt zu BPI-AMP1