

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben FKZ 0325712

QUARZ-Zert – Entwicklung von CSP-spezifischen Produktprüfverfahren

Projektlaufzeit: 1. Januar 2015 bis 31. Juli 2018

Simon Caron, Timo Effertz, Christoph Happich, Christoph Hilgert, Nicole Janotte,
Eckhard Lüpfer, Siw Meiser, Anke Nietsch, Bijan Nouri, Johannes Pernpeintner, Christoph Prah,
Marc Röger, Wolfgang Reinalter, Sebastian Richter, Björn Schiricke, Jacob Schmiedt,
Simon Schneider, Florian Sutter, Johannes Wette

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für
Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen: 0325712 gefördert.

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

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Solarforschung

Linder Höhe
51147 Köln

Gefördert durch:



Tel. 02203 601 3983
E-Mail: Bjoern.Schiricke@dlr.de

I.1.	Aufgabenstellung.....	3
I.2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	4
I.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
I.4.	Stand der Wissenschaft und Technik.....	5
I.5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
II.1.	Ergebnisse	8
II.1. AP 1	Fortgeschrittene Prüfmethode und Teststände für Parabolrinnen-Receiverrohre (AP1)	8
II.1. AP 1.1	Verbesserung der Messung des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern im Labor	8
II.1. AP 1.2	Prüfstände zur Untersuchung von Alterung und Ausfallwahrscheinlichkeit – Neuaufbau und Weiterentwicklung.....	28
II.1. AP 2	Fortgeschrittene Prüf- und Berechnungsmethoden für Konzentratorspiegel	38
II.1. AP 2.1	Prüf- und Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Spiegelformgenauigkeit im Kollektor basierend auf Labormessungen	38
II.1. AP 2.2	Erweiterung von Industriestandards zur Glasspiegelalterung	54
II.1. AP 3	Prüfmethode- und Modellvergleich am Testkollektor (KONTAS).....	68
II.1. AP 3.1	„Ringschluss“ KONTAS, QUARZ-Teststände in Köln und Simulationstools....	68
II.1. AP 3.2	Studie zur Änderung der spezifischen Wärmekapazität des Thermoöls (cp-Messung) über die Zeit	75
II.1. AP 4	Definition umfassender Produktprüfverfahren für die Schlüsselkomponenten	77
II.1. AP 5	Dokumentation der Forschungsergebnisse.....	89
II.2.	Zahlenmäßiger Nachweis.....	90
II.3.	Nutzen, Verwertbarkeit, Erfahrungen.....	91
II.4.	Fortschritt anderer Stellen.....	92
II.5.	Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	93

I. Kurzdarstellung

Ziel des Projektes QUARZ-Zert ist die (weitere) Absicherung der Leistungsfähigkeit der Schlüsselkomponenten von solarthermischen Kraftwerken im Betrieb und die Entwicklung, Anwendung und Verbreitung aussagefähiger Prüfmethode.

Auf der Basis bestehender Prüfstände und Methoden im QUARZ-Zentrum® des DLR und mit den breiten Erfahrungen aus den letzten Jahren mit Solarkraftwerksbau und -betrieb wurden geeignete und wirtschaftliche Prüfmethode entwickelt und erweitert, um die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von Schlüsselkomponenten solarthermischer Kraftwerke (CSP: concentrated solar power) unter labor- und realitätsnahen Einsatzbedingungen aussagekräftiger zu bewerten.

Die quantitative Bewertung der Qualität und Langlebigkeit sowohl bewährter Schlüsselkomponenten der CSP-Technologie als auch neuer Entwicklungen in diesem Technologiefeld anhand etablierter Kriterien und Benchmarks stellt einen wesentlichen Beitrag zur Senkung von Risiken und Kosten der Stromerzeugung aus Solarenergie dar.

I.1. Aufgabenstellung

Mit dem Vorhaben wurden folgende wissenschaftliche und technische Ziele angestrebt:

- Entwicklung fortgeschrittener Prüfmethode und Teststände für Parabolrinnen-Receiverrohre
 - Entwicklung eines Prüfstandes für optische Wirkungsgradmessungen mit verbesserter Bestrahlungsgeometrie und hoher spektraler Qualität
 - Aufbau einer Heiz-Kühl-Einheit für die Prüfstände zur Messung des optischen Wirkungsgrades
 - Erweiterung der Alterungsprüfstände zur Messung von Salz- und Direktverdampfungsreceivern
 - Wissenschaftliche Untersuchungen der Übertragbarkeit der Arrhenius-Methode auf die beschleunigte Alterung
- Entwicklung fortgeschrittener Prüf- und Berechnungsmethode für Spiegel für Solarkraftwerke, für den eingebauten Zustand, unter Betriebsbedingungen
 - Entwicklung von Finite-Elemente-Modellen für einen Konzentrator der EuroTrough-Geometrie und Abgleich der berechneten Formgenauigkeitsdaten mit Kollektormessdaten
 - Systematische Untersuchung beobachteter Belastungsfälle im Labor
 - Bewertung des Einflusses verschiedener Betriebsbedingungen auf den Kollektorsertrag mittels Raytracing
 - Prüfung und Spezifizierung gängiger Alterungstests auf die Anwendbarkeit für Solarspiegel
- Systematischer Prüfmethode- und Modell-Vergleich am Testkollektor
- Aussage zur Veränderung der spezifischen Wärmekapazität des Wärmeträgermediums über die Benutzungszeit unter typischen Betriebsbedingungen
- Definition umfassender Produktprüfverfahren
- Einbringen der Ergebnisse in Normungs- und Standardisierungsaktivitäten, Benchmarking, Gremienarbeit
- Veröffentlichung der Ergebnisse im Rahmen von Konferenzen und Fachzeitschriften

I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Durch seine langjährige intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeit im Bereich Qualifizierung zählt das DLR Institut für Solarforschung heute weltweit zu den Wegbereitern für einheitliche Qualitätsstandards bei Komponenten und Systemen in solarthermischen Kraftwerken. In der Abteilung Qualifizierung am DLR Institut für Solarforschung wurde in zahlreichen Forschungsprojekten und Industriekooperationen ein Portfolio an Prüfständen, Messmethoden und Simulationswerkzeugen zur Quantifizierung und Bewertung der Leistungsfähigkeit von Parabolrinnensystemen und deren Komponenten entwickelt. Die entwickelten Verfahren und Methoden werden regelmäßig von Industriepartnern (Komponentenherstellern und Kraftwerksbetreibern) zur unabhängigen Bewertung ihrer Produkte und zur Unterstützung in der Entwicklung nachgefragt.

In das Projekt QUARZ-Zert fließen Arbeitsergebnisse aus den Projekten QUARZ-CSP und Kontas-Pro, sowie aus dem Projekt StaMeP ein.

Im Projekt QUARZ-CSP (Förderkennung 03UM0095) wurde am Standort Köln das QUARZ-Zentrum®, ein Test- und Qualifizierungszentrum für konzentrierende Solartechnik, aufgebaut. Unter anderem werden dort heute die Schlüsselkomponenten Parabolrinnenreceiver und Konzentratorspiegel unter reproduzierbaren Laborbedingungen in speziell konzipierten Testständen hinsichtlich ihrer optischen, geometrischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften untersucht.

Der 2010 auf der Plataforma Solar de Almería (PSA) errichtete drehbare Außenprüfstand für Parabolrinnen („Kontas“) ist ebenfalls Teil des QUARZ-Zentrums®. Er ermöglicht die präzise Vermessung und Bewertung von Gesamtsystemen von Parabolrinnenmodulen unter realen Testbedingungen. Im Rahmen des Projekts „Kontas-Pro“ (Förderkennzeichen 0325214) wurde der Anlagenbetrieb des Prüfstands optimiert und detaillierte Untersuchungen zur Erhöhung der Messgenauigkeit durchgeführt. Der Prüfstand Kontas wurde in diesem Projekt genutzt.

Im Projekt StaMeP (Förderkennzeichen 0325472A) wurden ebenfalls Abnahmetests zur Bestimmung von technischen Parametern des Solarfeldes entwickelt, sowie Messmethoden und -Richtlinien für Komponenten erarbeitet bzw. erweitert und in Normungsvorschläge überführt. Diese Arbeiten dienen teilweise als Ausgangspunkt der Arbeiten im Projekt QUARZ-Zert.

Im Rahmen eines Round Robin Tests auf europäischer Ebene (Projekt STAGE-STE) haben sich zum Teil unerwartet große Abweichungen der Prüfstände der Institute DLR, CENER (Spanien), CIEMAT-PSA (Spanien), und ENEA (Italien) zur Wärmeverlustmessung bzw. zur Messung des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern ergeben. Da dieser Round Robin Basis für die Standardisierungsaktivitäten im Rahmen von IEC, TC 117 sein sollte, ergab sich deutlicher internationaler Abstimmungsbedarf kurz und mittelfristig. Mögliche Ursachen an den Prüfständen im DLR wurden daher aufgrund der großen Bedeutung für die Standardisierung im Rahmen dieses Projektes gezielt näher untersucht und international diskutiert.

I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die ursprünglich geplante Projektlaufzeit vom 01.01.2015 – 30.06.2017 wurde aufgrund von Verzögerungen in AP1 kostenneutral bis zum 31.07.2018 verlängert.

Die Projektleitung lag zu Beginn des Projektes bei Siw Meiser. Ab April 2015 wurde das Projekt durch Christoph Happich geleitet.

Der Aufwand bei der Bearbeitung einiger Projektziele in AP 1 waren größer als bei der Projektplanung ursprünglich angenommen. Im Herbst 2017 zeichnete sich ab, dass die Meilensteine M1.1.2b „Optischer Prüfstand in Betrieb genommen“ und M1.1.2c „Optischer Prüfstand spektral klassifiziert“ sowie der Meilenstein M1.2.1 „Überhitzungstests und Wärmeverlusttests für Salz-/ Direktverdampfungsreceiver möglich“ mit den noch verbleibenden Personalmitteln nicht mehr erreichbar sein würden. In Abstimmung mit dem Zuwendungsgeber wurde als geeignete Maßnahme für den weiteren Projektfortschritt anhand einer Priorisierung der Projektziele abgeleitet, dass durch eine entsprechende Umwidmung von Mitteln der deutlich höher priorisierte Meilenstein M1.1.2b zu Lasten der Meilensteine M1.1.2c und M1.2.1 erreicht werden sollte.

Während der Projektlaufzeit sind die zum vollständigen Aufbau des „Prüfstandes der 3. Generation zur kalorimetrischen Messung des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern“ notwendigen Komponenten geliefert worden. Aufgrund weiterer Verzögerungen konnte der Prüfstand jedoch nicht mehr in der Projektlaufzeit aufgebaut werden. Aufbau und Inbetriebnahme sind nun für 2019 geplant.

I.4. Stand der Wissenschaft und Technik

Im Zuge der Markteinführung von Parabolrinnenkraftwerken und der Diversifikation der Anbieter von Komponenten und Systemlösungen beschäftigen sich deutsche und internationale CSP-Forschungseinrichtungen (DLR, Fraunhofer ISE, Ciemat, NREL, ENEA) mit der Qualifizierung der Komponenten und Systeme. Es besteht eine Anzahl von Prüfständen zur Untersuchung und Quantifizierung bestimmter relevanter Einzeleffekte unter Laborbedingungen (z.B. Formtreue von Spiegeln, thermische Verluste und optischer Wirkungsgrad von Parabolrinnenreceivern). Einige dieser Prüfstände nahmen im Rahmen von IEA SolarPACES Aktivitäten und dem vom BMWi geförderten Verbundprojekt StaMeP (Förderkennzeichen 0325472A) an Ringversuchen teil. Mit ihrer Hilfe wurde die Vergleichbarkeit der Testergebnisse untersucht und die Standardisierung von Prüfmethoden beschleunigt.

Über die Untersuchung von charakteristischen Einzeleffekten unter Laborbedingungen hinaus ist es notwendig die Produkteigenschaften unter realitätsnahen Einsatzbedingungen zu bestimmen und zu bewerten und Prüfungen zur Alterung und Ausfallwahrscheinlichkeit in ganzheitliche Prüfverfahren aufzunehmen. Des Weiteren ist es für die Aussagekraft von Einzelprüfungen und Berechnungen wichtig, dass Ergebnisse auch untereinander (im Vergleich mit alternativen Verfahren zur Bestimmung derselben Größe) und im Rahmen der Betrachtung des gesamten Systems Parabolrinne ein schlüssiges Bild ergeben.

Die bis zum Zeitpunkt des Projektstarts erarbeiteten Prüfmethoden untersuchten die Eigenschaften der Komponenten solarthermischer Kraftwerke unter Laborbedingungen, die sich von den realen Einsatzbedingungen unterscheiden. So war beispielsweise nur eine relative Messung des optischen Receiverwirkungsgrades möglich, da die Bestrahlung im Solarfeld durch das bestehende Messsystem nur unzureichend genau abgebildet wird. Die Messverfahren zur Bestimmung der Konzentradorformgenauigkeit konnten die Spiegel nur unter

Laborbedingungen beziehungsweise für eine Betriebssituation bewerten. Aufgrund der verschiedenen Randbedingungen (zum Beispiel der unterschiedlichen Haltestrukturen oder der verschiedenen Orientierung der Spiegel während der Messung) konnten die Laborergebnisse jedoch nicht direkt auf den Kollektor übertragen werden und zeigten signifikante Unterschiede.

Des Weiteren wurde der Umfang und die Reihenfolge der Prüfungen, denen die CSP-Komponenten unterzogen werden, oft lediglich an Herstellerkriterien oder praktischen Gesichtspunkten des Prüflaborbetriebs orientiert.

Die charakteristischen Kenngrößen von Parabolrinnenkomponenten und -systemen wurden mittels verschiedener entwickelter Verfahren, Teststände oder Simulationswerkzeuge experimentell bestimmt beziehungsweise berechnet. Ein systematischer Prüfmethode- und Modellvergleich stand bis dahin aus.

Auf diesen Gebieten sind den Antragstellern keine vergleichbaren systematischen Arbeiten bekannt: Es sind keine Schutzrechte oder Schutzrechtsanmeldungen bekannt, die einer späteren Ergebnisverwertung entgegenstehen könnten.

Zum aktuellen Stand der Normierung:

Das spanische Standardisierungskomitee UNE (Subkomitee AEN / CTN206 / SC117) hat im März 2018 einen Standard zur Qualifizierung von Spiegelpanels veröffentlicht (UNE 206016:2018), an dessen inhaltlicher Ausarbeitung das DLR maßgeblich beteiligt war. Es handelt sich um den ersten Standard, der speziell für Spiegel von solarthermischen Kraftwerken entwickelt wurde. Obgleich er derzeit nur in spanischer Sprache erhältlich ist, stellt er einen wichtigen ersten Schritt in Richtung Vergleichbarkeit der am Markt erhältlichen Spiegel dar. In der Vergangenheit wurden Spiegel mit Hilfe von Standards qualifiziert, die für andere Industriezweige (z.B. Glas-, PV- oder Automobilindustrie) entwickelt wurden. In seiner jetzigen Form beinhaltet die Norm jedoch keine Akzeptanzkriterien für die definierten Alterungstests, weshalb die Aussagekraft der Testergebnisse nur gering ist. Diese Norm soll daher in den nächsten zwei Jahren noch verbessert werden, bevor sie bei der IEC als Entwurf einer internationalen Norm vorgeschlagen werden soll.

Für Parabolrinnenreceiver wird derzeit ein IEC Normentwurf für thermische und optische Tests vorbereitet. In den Jahren 2015 und 2016 fand eine internationale Vergleichskampagne (Round Robin Test) ähnlicher Receiver-Prüfstände im Rahmen des EU-Projektes STAGE-STE statt. Dabei zeigte ein Vergleich der Ergebnisse systematische Abweichungen¹, die die angegebenen Messunsicherheiten teilweise deutlich übersteigen und deren Ursachen bislang noch nicht geklärt werden konnten. Es besteht daher weiterhin der Bedarf an technisch/wissenschaftlichen Untersuchungen, um fundierte Grundlagen für normative Messvorschriften zu erzielen, so dass die Norm genaue Messungen gewährleistet.

¹ J. Pernpeintner, B. Schiricke, F. Sallaberry, A. García de Jalón, R. López-Martín, L. Valenzuela, A. de Luca, A. Georg, „Parabolic Trough Receiver Heat Loss and Optical Efficiency Round Robin 2015/2016“, SolarPACES 2016, AIP Conference Proceedings 1850, 020012 (2017); doi: 10.1063/1.4984337

I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Wissenschaftler des DLR haben an Telefonkonferenzen und Veranstaltungen von folgenden Arbeitsgruppen bzw. Gremien zum Thema Standards für CSP teilgenommen:

- IEC TC 117 Solarthermische Kraftwerke, E. Lüpfert als Leiter der deutschen Delegation
- IEC TC 117, Part 3.3 Systems and Components, J. Pernpeintner als Experte für Receiver-Tests
- SolarPaces Task III, Arbeitsgruppen für Spiegel-Reflektivität, -Form, -Lebensdauer, Receiverrohr-Tests, Abnahmetests für Solarfelder
- DIN DKE K374 Solarthermische Kraftwerke (Spiegelkomitee zu TC117), E. Lüpfert als gewählter Sprecher/Obmann
- AENOR Arbeitsgruppe GT1 (System) und Arbeitsgruppe GT2 (Komponenten), (Spiegelkomitees zu TC117), E. Lüpfert, F. Sutter, J. Pernpeintner als Experten

II. Eingehende Darstellung

II.1. Ergebnisse

II.1. AP 1 Fortgeschrittene Prüfmethode und Teststände für Parabolrinnen-Receiverrohre (AP1)

II.1. AP 1.1 Verbesserung der Messung des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern im Labor

Die wichtigste Eigenschaft eines Parabolrinnenreceivers ist dessen optischer Wirkungsgrad. Aufgrund der großen Bedeutung für den Gesamtwirkungsgrad des Kraftwerks und der typischen Unterschiede zwischen den Herstellern wird hier eine sehr niedrige Messunsicherheit von deutlich unter 1% angestrebt.

Im Projekt QUARZ-CSP (Förderkennung 03UM0095) in den Jahren 2008 bis 2011 wurde daher ein Sonnensimulatorprüfstand mit linearem Fokus der 1. Generation ElliRec aufgebaut und seitdem wesentlich weiterentwickelt. Dabei wird die Receiverumgebung im Kollektor simuliert. Der Receiver wird hierzu mit Sonnensimulatorstrahlung von hoher Intensität bestrahlt und der Energiegewinn des den Receiver durchfließenden Wassers gemessen. Das Messprinzip hat sich dabei bewährt, was insbesondere durch die hohe erreichte Reproduzierbarkeit von ca. 0.2% ($k=1$) zum Ausdruck kommt. Ende 2013 wurde mit dem OptiRec zudem der Nachfolgeprüfstand (2. Generation) in Köln aufgebaut, der auf dem gleichen Messprinzip basiert. Die wesentlichen umgesetzten Verbesserungen sind eine Verkürzung der Messzeit, eine bessere Zugänglichkeit zum Linearfokus für Untersuchungen und eine erhöhte Dauerstabilität des Aufbaus durch Verwendung von Glasspiegeln.

II.1. AP 1.1.1 Verbesserungen des vorhandenen Messsystems

Übergeordnetes Ziel dieses Arbeitspakets war die Messung des absoluten Receiverwirkungsgrades im OptiRec. Dazu wurden zum einen das bestehende Messsystem deutlich verbessert, indem Messabläufe vereinfacht und die Wiederholgenauigkeit erhöht wurden, insbesondere durch den Aufbau eines Wasserkreislaufes und einer zweiten Messposition. Zum anderen wurde ein Kavitätenreceiver zur Bestimmung der Strahlungsleistung der Lampen in der Fokallinie entwickelt, gebaut und in Betrieb genommen. Die dazu durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse werden im Folgenden genauer beschrieben:

Wasserkreislauf

Ziel dieses Arbeitspaketes ist es u.a. einen Wasserkreislauf in den bestehenden Prüfstand zur Messung des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern der zweiten Generation (OptiRec) zu integrieren.

Im Sonnensimulator Prüfstand OptiRec mit linearem Fokus wird Wasser als Wärmeträgermedium genutzt, um die vom zu prüfenden Parabolrinnenreceiver absorbierte Strahlungsleistung abzuführen und bilanzieren zu können. Bisher wurde beim Betrieb des Prüfstandes Leitungswasser ohne weitere Erwärmung durch den Receiver gepumpt und erwärmt als Abwasser in die Kanalisation geleitet. Auftretende Temperaturschwankungen des Leitungswassers konnten nicht ausgeglichen werden, was häufig dazu führte, dass die aus der

DIN 12975 abgeleiteten Anforderungen an die Temperaturkonstanz von $\pm 0,1\text{K}$ um den Mittelwert der Eintrittstemperatur über den Messzeitraum nicht eingehalten wurden und Messungen wiederholt werden mussten. Um die Wassereintrittstemperatur in den Receiver in Zukunft genau einstellen zu können, auf diese Weise homogene Messbedingungen zu erreichen und darüber hinaus den Wasserverbrauch deutlich zu reduzieren, wurde ein geschlossener Wasserkreislauf aufgebaut. Dort wird das aus dem Receiver austretende, erwärmte Wasser gekühlt und wieder zurückgeführt, siehe Abbildung 1. Zentrales Element des Wasserkreislaufs ist ein Kaltwassersatz, der den Inhalt eines integrierten Pufferspeichers auf eine einstellbare Temperatur kühlt und über eine Pumpe dem Leitungssystem des Prüfstandes zuführt. Die Einstellung des Massenstroms durch den Receiver, der basierend auf bisherigen Untersuchungen $850\text{ m}^3/\text{h}$ betragen soll, erfolgt mit einer Bypass Leitung und einem elektrisch angesteuerten Mischventil.

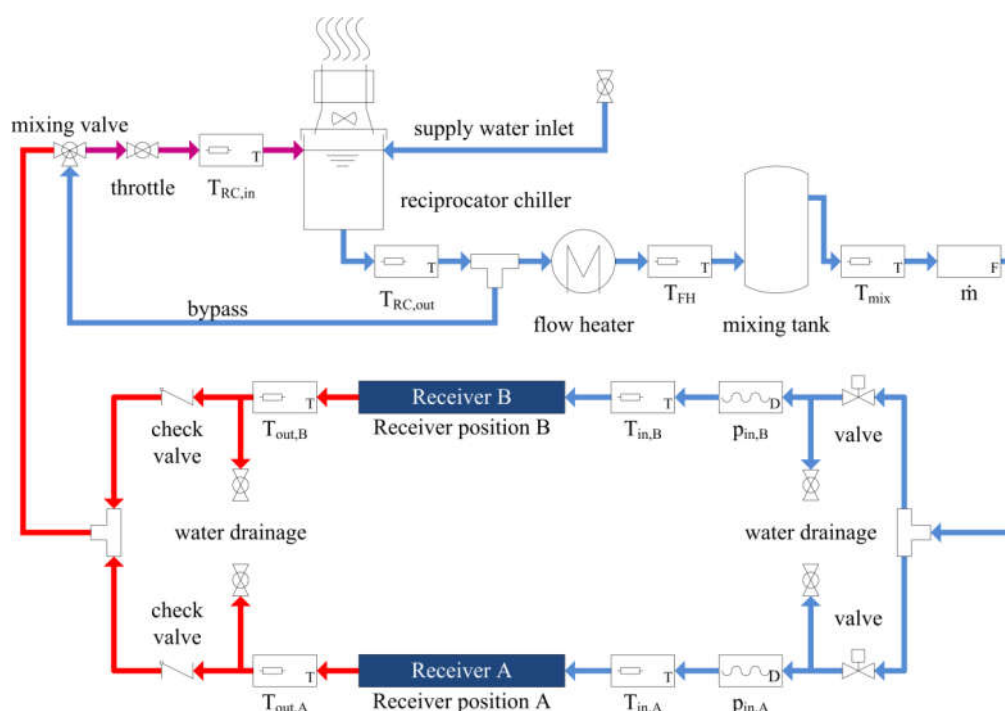


Abbildung 1: Schema des Leitungssystems im aufgebauten Wasserkreislauf im OptiRec Prüfstand (hier bereits mit im Projekt aufgebauter zweiter Messposition)

Die Temperaturkonstanz des verwendeten, vorhandenen Kaltwassersatzes ist mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5\text{ °C}$ nicht ausreichend, um die gestellten Anforderungen zu erfüllen. Nach DIN 12975 darf die Temperatur des Wassers bei Eintritt in den Receiver im Messzeitraum nicht mehr als $\pm 0,1\text{ °C}$ von ihrem Mittelwert abweichen. Mit Hilfe eines Druckbehälters sowie einem elektrisch angesteuerten Durchlauferhitzer konnte die periodisch fluktuierende Temperatur des Wassers nach dem Kaltwassersatz deutlich homogenisiert werden. Der Durchlauferhitzer ermöglicht zudem eine Feineinstellung der Eintrittstemperatur des Wassers in den Receiver im Bereich von bis zu $+2\text{ °C}$. Abbildung 2 zeigt eine Beispielmessung mit der Wassertemperatur am Austritt des Kaltwassersatzes, am Austritt des Druckbehälters und am Eintritt in den Receiver.

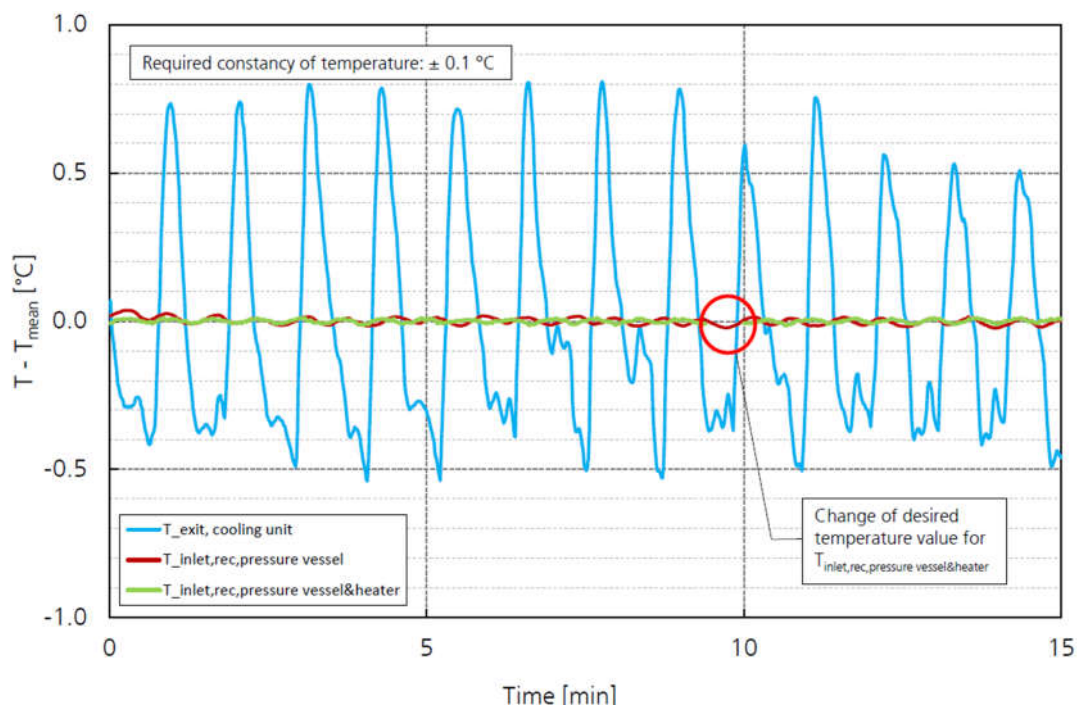


Abbildung 2: Schwankungen der Wassertemperatur am Austritt des Kaltwassersatzes, am Austritt des Druckbehälters und am Receivereintritt (im Nachlauf des Durchlauferhitzers)

Im Diagramm ist ersichtlich, dass die Schwankung nach dem Kaltwassersatz größer als die vom Hersteller angegebene $\pm 0,5$ °C sind. Nach dem Druckbehälter sind die Schwankungen der Wassertemperatur bereits ausreichend homogenisiert und deutlich kleiner als die angestrebten $\pm 0,1$ °C. Der Durchlauferhitzer verbessert die Temperaturkonstanz dann nochmal leicht. Abbildung 3 zeigt den Verlauf der Receivereintrittstemperatur sowie deren maximale Schwingungsamplitude von etwa $\pm 0,015$ °C, die damit etwa eine Größenordnung genauer als der geforderte Wert von $\pm 0,1$ °C.

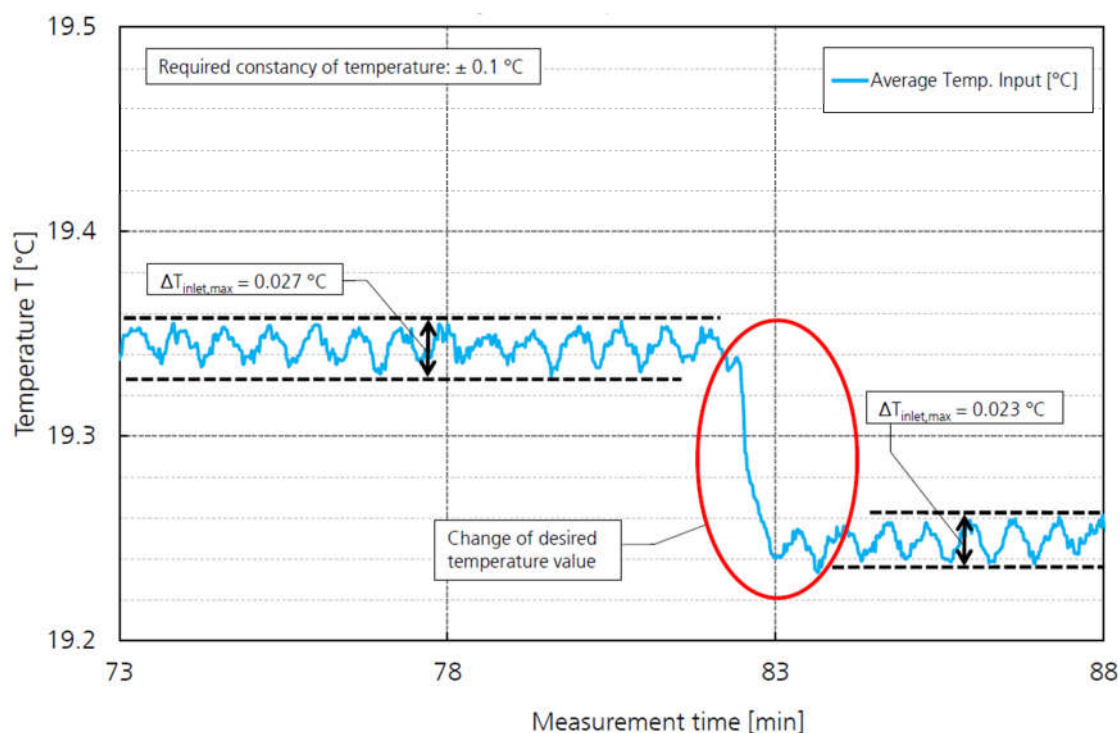


Abbildung 3: Homogenisierte Temperaturschwankungen am Receiverintritt

Die Steuerung des Durchlauferhitzers basiert derzeit auf einem einfachen physikalischen Modell des Systems und ermöglicht bisher keine weitere, signifikante Reduktion der Temperaturschwankungen im Nachlauf des Druckbehälters. Vermutlich kann durch Optimierung der Steuerung oder Ergänzung eines Reglers die Konstanz der Eintrittstemperatur in den Receiver weiter verbessert werden. Dies würde Vorteile im Hinblick auf die Untersuchung der Einflüsse auf das Messergebnis im Prüfstand bieten. Da das entwickelte Wasserkreislaufsystem die gestellten Anforderungen allerdings bereits erfüllt, werden die Arbeiten zu diesem Thema im Arbeitspaket 1.1.1 als abgeschlossen betrachtet.

Zweite Messposition

Im Rahmen der Verbesserung des vorhandenen Messsystems zur Bestimmung des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern wurde im Projekt QUARZ-Zert eine zweite gleichwertige Messposition für Receiver aufgebaut². Die beiden Prüfpositionen sind in Abbildung 4 erkennbar. Mittels einer Receiverlinearführung (auf Rollen gelagerter Schiebemechanismus), Positionsschaltern, elektrisch gesteuerten Ventilen im Wasserkreislauf und entsprechenden konstruktiven Arbeitsschutzmaßnahmen ist es dadurch möglich, eine Messung an einem Receiver durchzuführen während ein zweiter ein- oder ausgebaut und zur Messung vorbereitet wird. Dies erhöht die Test-/Messfrequenz deutlich und ermöglicht eine Kontrolle der Lampen- und Prüfstandsstabilität, wenn in Position B ein Arbeitsstandard eingebaut ist. Optional können beide Messpositionen aufeinander kalibriert werden, und Prüfling und Referenz/Master unmittelbar nacheinander gemessen werden.

² Lütge, J. (2016): *Implementierung einer neuen Messmethodik am Sonnensimulatorprüfstand mit linearem Fokus der zweiten Generation*; Bachelorarbeit, Universität Duisburg Essen



Abbildung 4: OptiRec Prüfstand mit zwei in Testpositionen eingebauten Receivern (links Position A, rechts Position B) die mittels Schiebemechanismus alternierend in der Fokallinie positioniert werden können

Verbesserte Störkörper aus Edelstahl

Weiterhin konnte die Dauer einer Messung durch den Bau eines verbesserten Störkörpers aus Edelstahl deutlich reduziert werden. Zweck des Störkörpers ist es, die Strömungseigenschaften zugunsten einer höheren Strömungsgeschwindigkeit, homogeneren Temperaturverteilung in Umfangsrichtung und den Abtransport von Luftblasen zu optimieren^{3,4}. Abbildung 5 zeigt das neu entwickelte Störkörperdesign für den OptiRec: Zur besseren Handhabung wird der Störkörper zweigeteilt. Die Teile bestehen aus dünnwandigen Edelstahlrohren mit aufgeschweißten, abgerundeten Endstücken und spiralförmig umlaufender Drahtwicklung. Die neuen Störkörper ersetzen die bisher verwendeten Störkörper aus Polyethylen-Vollmaterial, die durch ihre geringere Wärmeleitfähigkeit und höhere Wärmekapazität lange Aufheizphasen bis zum Erreichen des thermischen Gleichgewichts aufwiesen. Die Dauer einer Messung verkürzt sich durch den neuen Störkörper etwa um den Faktor 4 von etwa 20 bis 30 Minuten auf 5 bis 10 Minuten.

³ Pernpeintner, J. (2019): *Optical Efficiency Measurement in Solar Simulators of Receivers for Parabolic Trough Solar Thermal Power Plants*; Dissertation, RWTH Aachen, im Druck

⁴ Lütge, J. (2016): *Implementierung einer neuen Messmethodik am Sonnensimulatorprüfstand mit linearem Fokus der zweiten Generation*; Bachelorarbeit, Universität Duisburg Essen

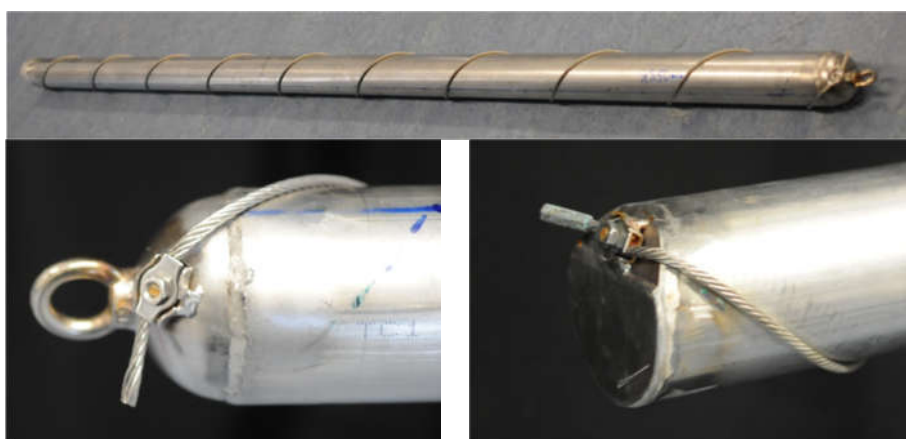


Abbildung 5: Weiterentwickelter Störkörper aus Edelstahl; eine Hälfte der zweiteiligen Komponente (oben), Stromlinienform am Ende (unten links), Kontaktfläche der Störkörperhälfte (u rechts)

Sonstige Maßnahmen und Optimierung der Messprozedur für wiederholgenaue Messbedingungen

Im Rahmen der kontinuierlichen Verbesserung des Prüfstandes OptiRec konnte die Reproduzierbarkeit von Messungen durch Entwicklung und Einbau neuer **Strahlenschutzschilde** an den Receiverhalterungen deutlich erhöht werden. Die Strahlenschutzschilde werden prinzipiell benötigt, um den thermisch sensiblen Übergang vom Glashüllrohr zum Faltenbalg eines Receivers zu schützen und den Energieeintrag in den Bilanzierungsraum im Bereich der Receiverhalterung zu minimieren. Bisher waren die Strahlenschutzschilde aus spiegelnden Aluminiumblechen gefertigt, welche einen Teil der Strahlung zurück in den Konzentrator und damit den Receiver reflektiert haben. Allerdings war die nach jedem Receiverwechsel notwendige Positionierung der Schilde nicht hinreichend reproduzierbar, wodurch der Anteil von auf den Receiver reflektierter Strahlung zwischen verschiedenen Messungen schwankte. Dies konnte in Reproduzierbarkeitsmessungen nachgewiesen werden. Durch zwei Maßnahmen wurde die Reproduzierbarkeit erhöht: Einerseits ist der Großteil des Schildes fest am Receiver montiert und muss so beim Receiverwechsel nicht gelöst werden. Andererseits sind die neuen Strahlenschutzschilde mit matter, weißer Farbe lackiert, sodass nur noch ein kleiner Teil der am Schild reflektierten Strahlung auf den Receiver trifft und die optischen Eigenschaften weniger von der exakten Positionierung der Schilde abhängt. Abbildung 6 zeigt ein das neue Strahlenschutzschild der Receivermessposition A auf der Seite des Wassereintritts.

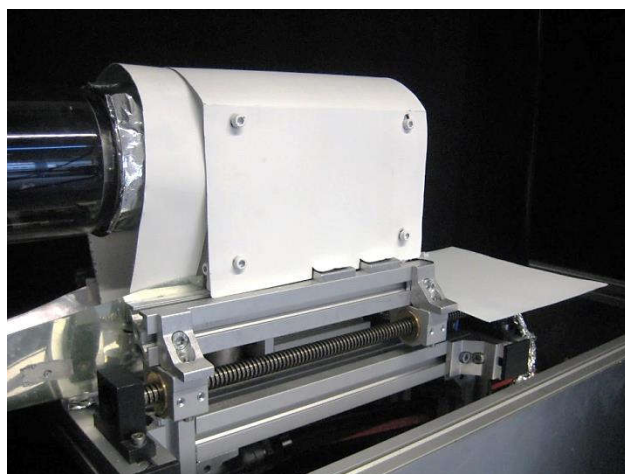


Abbildung 6: Neues Strahlenschutzschild an der Eintrittshalterung des Receivers im OptiRec Prüfstand

Messungen haben gezeigt, dass beim neuen Schild die Positionierung der beim Receiverwechsel bewegten Teile keinen signifikanten Einfluss mehr auf die Reproduzierbarkeit von Messungen hat. Das endgültige Receiverschilddesign ist in Abbildung 7 (links) dargestellt

Eine weitere Verbesserung des Prüfstands wurde durch Programmierung eines **Optimierungsmoduls** erreicht, das nach dem Downhill-Simplex-Verfahren arbeitet. Dieses Modul wird angewendet um die zwei Steuerungsparameter des Durchlauferhitzers im Hinblick auf eine möglichst konstante Eintrittstemperatur in den Receiver zu erreichen. Das Modul wählt einen Satz von Parametern, und misst eine tatsächlich im Prüfstand erreichte Zielgröße, hier die Standardabweichung der Wassertemperatur nach dem Durchlauferhitzer. Abhängig von der gemessenen Zielgröße wird dann ein neuer Parametersatz erzeugt und eine erneute Messung gestartet. Die Optimierung wird nach Erreichen eines Qualitätskriteriums abgebrochen. Das erstellte Modul ist flexibel einsetzbar und kann auf andere Parameter des Prüfstandes angewendet werden, wie z.B. die Regelung der Wassertemperatur. Auch für die in Arbeitspaket 1.1.2 entwickelte Erweiterung des Wasserkreislaufs im OptiRec Prüfstand für den Sonnensimulator Prüfstand der dritten Generation kann dieser Optimierungsalgorithmus zur Minimierung der Wassertemperaturschwankungen genutzt werden.

Ebenfalls optimiert wurde die softwareseitige **Prüfstandssteuerung und Datenerfassung**. Diese erfolgt in LabVIEW und bietet bereits während der Versuchsdurchführung umfangreiche Möglichkeiten der Überwachung der Versuchsbedingungen und Zwischenergebnisse, so dass Abweichungen in Einzelmessungen unmittelbar identifiziert und diese ohne großen Aufwand und Zeitverlust direkt wiederholt werden können. Die **Datenauswertung und Erstellung von Prüfprotokollen** für einzelne Prüflinge wurde in EXCEL weitestgehend automatisiert implementiert und erleichtert dem geschulten Prüfer die Bewertung und Interpretation der Messergebnisse.

Abschließende Messkampagne

Zur **Bestimmung der Reproduzierbarkeit und Charakterisierung** des vorhandenen **Messsystems OptiRec** wurde eine umfassende Messkampagne durchgeführt. Dabei konnte eine Reihe von Versuchsbedingungen identifiziert werden, die einen Einfluss auf die

Reproduzierbarkeit hatten und geeignete Maßnahmen ergriffen werden, um diese zu unterdrücken. So wurden beispielsweise **Gummischürzen** angefertigt, die beim Umbau von Receivern das Eindringen von Wasser in den Faltenbalgbereich des Receivers wie auch in das Dämmmaterial der Halterung verhindern. Dadurch werden Einflüsse durch veränderte Wärmeleitfähigkeit bzw. Wärmekapazität auf das Messergebnis unterbunden. Zugunsten einer einfachen und vor allem positioniergenauen Montage wurden die neuen **Strahlenschutzschilde für den Faltenbalgbereich** von Receivern nochmals weiterentwickelt (Abbildung 7, l). Sie sind nun in allen Teilen aus matt weiß lackiertem Blech bzw. Alufolie gefertigt, verfügen über Anschläge und können mithilfe einer Rohrschelle fixiert werden. Durch den Einbau von **passgenau modifizierten Rohrbögen an den Austrittshalterungen** (Abbildung 7, r) konnte die Ansammlung von Luft im Receiver, vor allem nach dem Receiverwechsel, deutlich verringert werden. Die Entlüftung des Receivers ist durch diese Maßnahme sehr viel schneller und effizienter möglich. Eine Messreihe hatte gezeigt, dass durch verbleibende Luft im Receiver ein deutlicher Einfluss auf die Reproduzierbarkeit der Messung besteht, welcher nun erfolgreich unterdrückt werden kann.

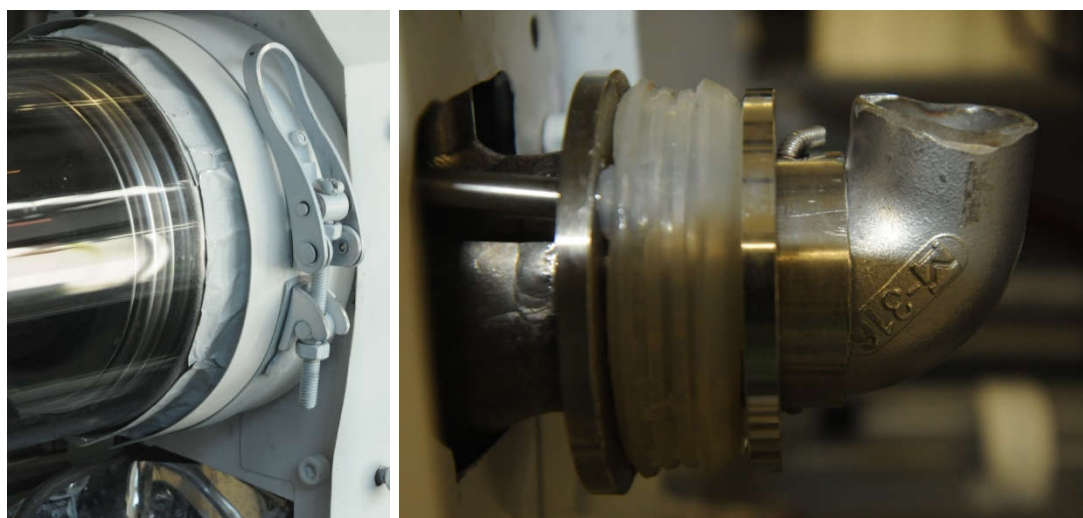


Abbildung 7: Finaler Strahlenschutzschild für den Faltenbalgbereich eines Receivers (l); Modifizierter Rohrbogen an der Austrittshalterung (r)

Eine weitere Maßnahme war der Einbau einer **Fixierung für die Receiverlinearführung**, die das ungewollte Unterbrechen der Messung in der Referenzmessposition durch den gleichzeitigen Wechsel eines Receivers in der anderen Messposition verhindert. Da vereinzelt Instabilität der Lampenleistungen detektiert wurde, welche im Messergebnis erkennbar war, wurden alle **Lampen im Prüfstand ausgetauscht**, neu justiert und eine Analyse der **Fokussiergenauigkeit** (siehe Abbildung 8) durchgeführt.



Abbildung 8: Fokusanalyse im OptiRec Prüfstand; radialer Strahlengang an einer Position (l); Längshomogenität entlang der Fokallinie (r)

Die anschließende in Abbildung 9 dargestellte Messreihe hat gezeigt, dass die Reproduzierbarkeit des Prüfstandes OptiRec nach Durchführung der genannten Maßnahmen im Bereich von 0,15% (1σ), und damit unterhalb der Reproduzierbarkeit des Vorgängerprüfstandes ElliRec mit 0,2% (1σ) liegt.

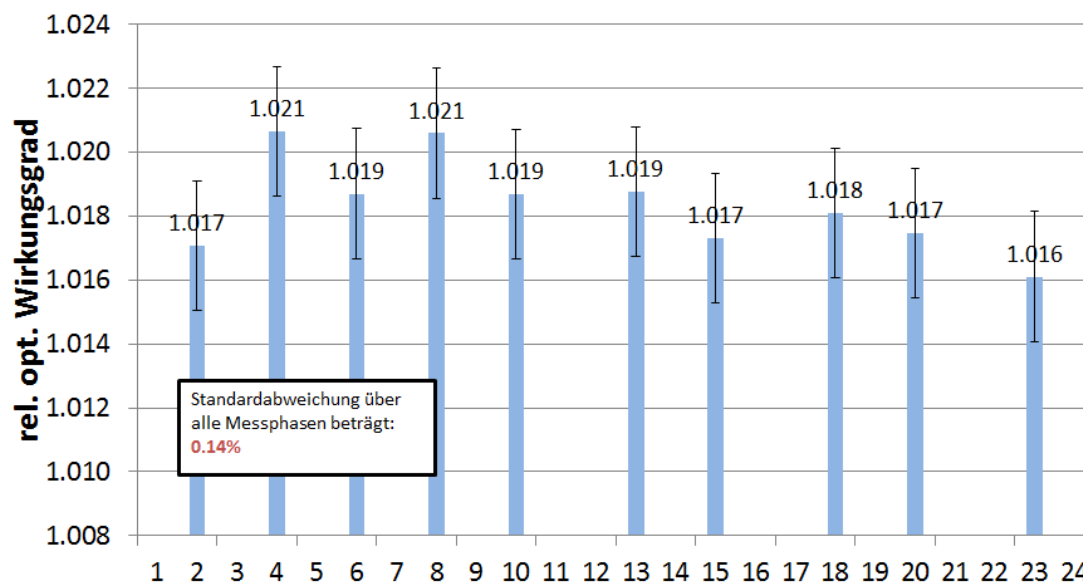


Abbildung 9: Ergebnisse der Versuche zur Reproduzierbarkeit für den relativen optischen Wirkungsgrad des DLR70-1 Standardreceivers als Prüfling (Lücken in den Messwerten entstehen durch relative Auswertung und entsprechen Messungen des Referenzreceivers)

Die im Folgenden beschriebenen zusammenfassenden Ergebnisse zum OptiRec Prüfstand sind in einem Paper⁵ und Vortrag im Rahmen der SolarPACES Konferenz 2017 veröffentlicht worden.

Einfluss der Receiver Schilde

Receiverschilde werden sowohl im Kraftwerk als auch im Prüfstand dafür genutzt, thermisch sensible Bereiche des Receivers vor konzentrierter Strahlung zu schützen. Im bestehenden Prüfstand ElliRec wurden Schilde immer als Teil des Receivers betrachtet und in Messungen einbezogen. Im Rahmen der durchgeführten Messreihen im OptiRec hat sich allerdings gezeigt, dass Receiverschilde Effekte hervorrufen können, welche das Messergebnis im Sonnensimulator beeinflussen, allerdings nicht auf das Feld übertragbar sind. Dies kann einerseits Verschattung aufgrund unterschiedlicher Einstrahlungswinkel im Prüfstand und im Feld sein, oder andererseits die Rückreflexion von Strahlung an den Schilden auf den Receiver aufgrund der optischen Eigenschaften der Ellipsenrinne. Zu diesem Zweck wurden spezielle OptiRec Schilde entwickelt, mit dem Ziel den Einfluss der genannten Effekte zu minimieren.

Für drei Receiver zwei verschiedener Hersteller wurde der optische Wirkungsgrad jeweils mit abnehmbaren Schilden des Herstellers und den entwickelten OptiRec Schilden wiederholt gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Normierter optischer Wirkungsgrad im OptiRec mit abnehmbaren Receiverschilden vom Hersteller (manufacturer shields MS) $\eta_{opt,rec,MS}$ und mit OptiRec Receiverschilden (OS) $\eta_{opt,rec,OS}$, beide bezogen auf den Mittelwert $\eta_{opt,rec,mean}$ des jeweiligen Receivers i, ii, iii

Receiver	Hersteller	Herstellerschilde		OptiRec-Schilde		Abweichung
		$\eta_{opt,rec,MS}$	Stdv	$\eta_{opt,rec,OS}$	Stdv	$\eta_{opt,rec,OS} - \eta_{opt,rec,MS}$
		$\eta_{opt,rec,mean}$		$\eta_{opt,rec,mean}$		$\eta_{opt,rec,mean}$
i	a	0.996	0.007	1.003	0.002	0.007
ii	a	0.992	0.002	1.008	0.001	0.015
iii	b	0.999	0.004	1.001	0.000	0.001

Die Standardabweichungen der Ergebnisse mit Herstellerschilden sind größer als die der Messungen mit OptiRec-Schilden. Weiterhin verringern die verwendeten Herstellerschilde den optischen Wirkungsgrad. Deswegen werden in zukünftigen Messkampagnen die entwickelten OptiRec-Schilde standardmäßig verwendet, um stets vergleichbare Randbedingungen zu gewährleisten. Der Einfluss der spezifischen Herstellerschilde auf die Performance im Feld muss künftig allerdings gesondert analysiert werden. Da die OptiRec-Schilde das Messergebnis nur geringfügig beeinflussen, können Korrekturen für die Herstellerschilde direkt auf das Messergebnis angewendet werden.

⁵ Happich, C.; Janotte, N.; Pernpeintner, J.; Schiricke, B.; Lüpfert, E. (2018): *Second generation linear focus sun simulator to test optical performance of parabolic trough receivers – OptiRec*; AIP Conference Proceedings 2033, 030007 (2018); doi: 10.1063/1.5067023

Bestimmung der Wiederholgenauigkeit des OptiRec Prüfstandes

Um die Wiederholgenauigkeit des OptiRec Prüfstands zu bestimmen, wurde zunächst die Methodik für künftige Standardmessungen definiert. In Anlehnung an die Messvorschrift im Vorgänger Prüfstand ElliRec wird zur Bestimmung des relativen optischen Wirkungsgrades $\eta_{\text{opt,rec}}$ eines Sample Receivers die im OptiRec gemessene absorbierte Leistung des Sample Receivers auf den Mittelwert zweier Referenzmessungen am gleichen Tag bezogen. Zur Bestimmung von $\eta_{\text{opt,rec}}$ sind demnach drei Einzelmessungen im OptiRec notwendig. Anhand von statistischen Gesetzmäßigkeiten ergibt sich daraus, dass die Wiederholgenauigkeit von $\eta_{\text{opt,rec}}$ dem 1,22-fachen der Wiederholgenauigkeit einer Einzelmessung entspricht. Diese kann durch eine Messreihe aus dem Berichtszeitraum 06-12/2016 mit 0,13% (1σ) angegeben werden, siehe Abbildung 10 a), und liegt damit deutlich unter der Wiederholgenauigkeit des Vorgängerprüfstands ElliRec mit 0,2%. Die Wiederholgenauigkeit einer Einzelmessung ohne Receiverwechsel beträgt 0,10%, siehe Abbildung 10 b). Der Unterschied zwischen den Wiederholgenauigkeiten einer Einzelmessung mit und ohne Umbau ist gering, sodass eine weitere Verbesserung des Umbauprozesses nicht notwendig erscheint.

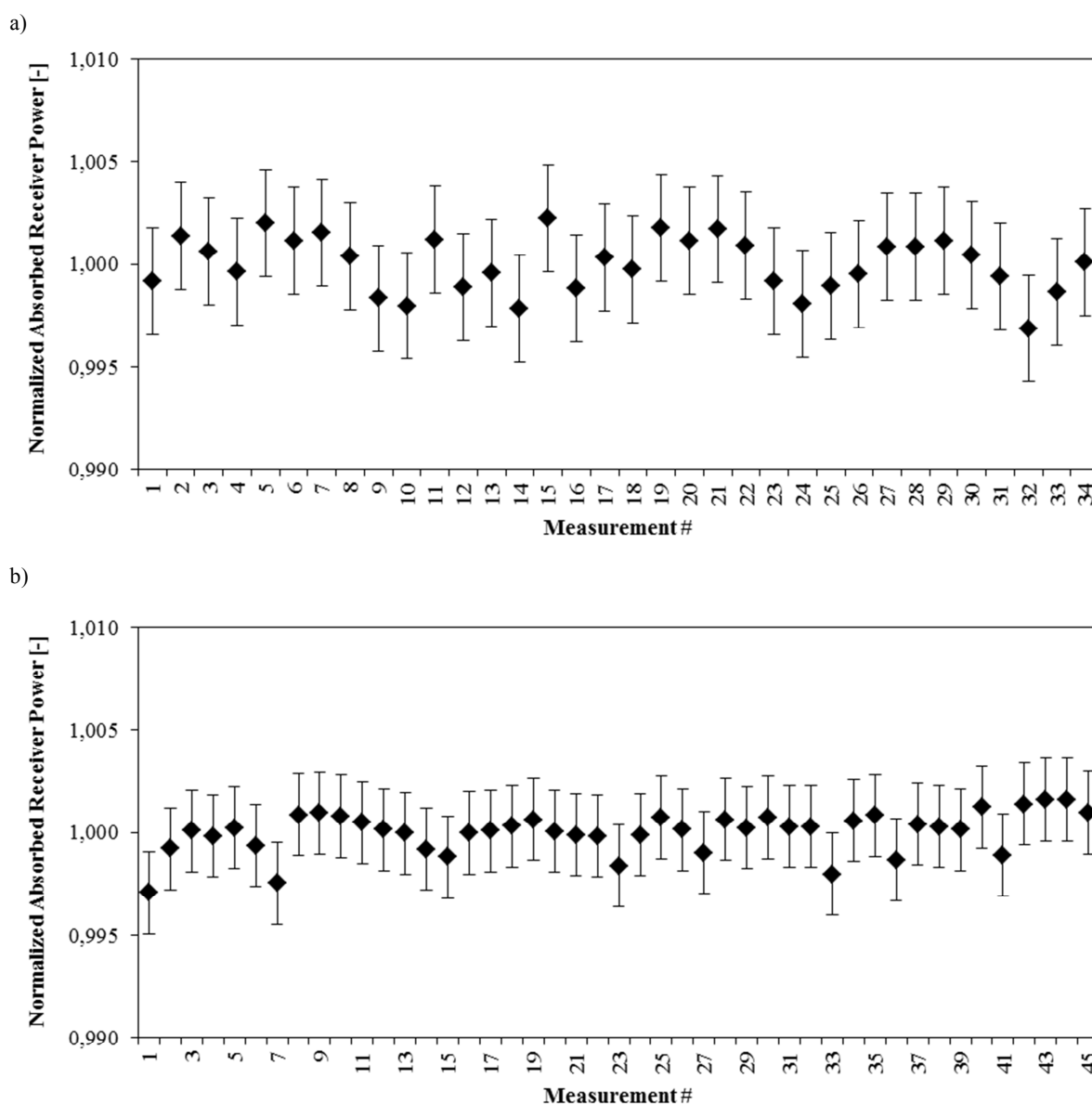


Abbildung 10: Wiederholgenauigkeitsuntersuchung des OptiRec Prüfstandes a) inkl. Receiverwechsel, Standardabweichung: 0,13%, b) ohne Receiverwechsel, Standardabweichung: 0,10%, Fehlerbalken: 2σ Wiederholgenauigkeit

Abgleich mit dem ElliRec Prüfstand

Die beiden Sonnensimulator Prüfstände ElliRec und OptiRec unterscheiden sich im Wesentlichen in Bezug auf Reflektormaterial und Ellipsegeometrie. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Spektren und Einfallwinkelverteilungen, so dass die Ergebnisse aus beiden Prüfständen nicht direkt vergleichbar sind. Eine Messreihe durchgeführt mit sieben verschiedenen Receivern von vier Herstellern dargestellt in Abbildung 11 erlaubt den Vergleich beider Systeme.

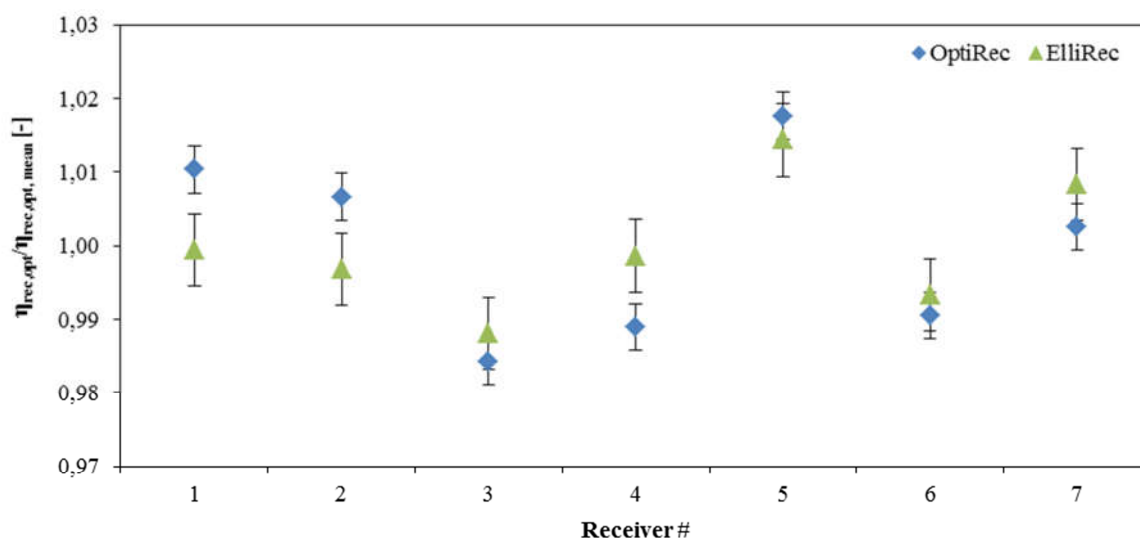


Abbildung 11: Vergleich der normierten optischen Wirkungsgrade verschiedener Sample Receiver in den Sonnensimulator Prüfständen ElliRec und OptiRec, bezogen auf den Mittelwert aller Wirkungsgrade (Referenz: DLR70-1, Fehlerbalken: 2 σ Wiederholgenauigkeit)

Die in beiden Systemen gemessenen optischen Wirkungsgrade stimmen mit einer Abweichung von maximal 1,1% überein. Für vier der sieben Receiver überschneiden sich die Fehlerbalken (2 σ). Eine systematische Abweichung zwischen beiden Prüfständen ist erwartungsgemäß nicht feststellbar, sodass eine Umrechnung der Ergebnisse ineinander nicht möglich ist. Auffällig ist allerdings, dass die Ergebnisse aus dem OptiRec breiter verteilt sind als im ElliRec. Dies weist auf eine möglicherweise höhere Sensitivität und somit feinere Auflösung von Unterschieden zwischen den Receivern hin.

Mit den durchgeführten Untersuchungen ist die Validierung des OptiRec Prüfstands abgeschlossen, sodass dieser künftig standardmäßig zur Bestimmung des relativen optischen Wirkungsgrads von Parabolrinnenreceivern im DLR eingesetzt wird. Insgesamt sind deutliche Verbesserungen der Wiederholgenauigkeit, Messgeschwindigkeit und Handhabung erzielt worden. Diese vereinfachen die Tests und erhöhen die Aussagekraft ihrer Ergebnisse für die Bewertung einer Schlüsselkomponente solarthermischer Kraftwerke. Weiterhin bilden sie die Grundlage für die Weiterentwicklung und Optimierung optischer Receiver-Performance-Tests.

Der Vorgängerprüfstand ElliRec bleibt vorerst nutzbar und bestehen, wird aber mittelfristig nach der vollständigen Etablierung des OptiRec absehbar obsolet und abgebaut werden.

Kavitätenreceiver

Ziel dieses Arbeitspaketes ist zudem der Bau eines Kavitätenreceivers zur Messung der absoluten Bestrahlungsstärke, die dann die Messung des absoluten optischen Wirkungsgrads von Parabolrinnenreceivern ermöglicht. Aufgrund dieser Anwendung ist es notwendig, dass eine sehr hohe Messgenauigkeit erreicht wird. In der Konzeptionierungsphase des Kavitätenreceivers hat sich gezeigt, dass eine hohe Messgenauigkeit deutlich einfacher für den Sonnensimulator der dritten Generation aus Arbeitspaket 1.1.2 erreicht werden kann als für das bestehende System. Dies liegt an dem deutlich kürzeren Fokus, aber vor allem am kleineren

Öffnungswinkeln von $\pm 35^\circ$ gegen über der $\pm 55^\circ$, die im den Sonnensimulator der dritten Generation verwendet werden, wodurch beispielweise die Unterdrückung von Konvektion und Strahlungsverlusten erheblich einfacher werden. Daher wird der geplante Kavitätenreceiver für den Sonnensimulator der dritten Generation entwickelt und gebaut. Mit der Entwicklung des Kavitätenreceivers wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit begonnen. Als Auslegungsgrundlage wurde ein Normbetrieb mit einer maximalen Fokusbreite von 4 cm, eine maximale Fokusslänge von 40 cm, ein Einstrahlwinkel von $\pm 35^\circ$, eine optische Leistung von max. 500 W und ein Volumenstrom von 85 l/h angenommen. Die Bestrahlung soll von unten in die Kavität erfolgen. Wird die Temperatur der Oberfläche der Kavität über der Lufttemperatur der Umgebung gehalten, so sollte sich der Wärmeaustausch mit der Umgebung durch Konvektion effektiv unterdrücken lassen.

Nach einer umfassenden Unsicherheitsbetrachtung wurde das Messkonzept bestätigt. Die Messung der optischen Leistung im Fokus wurde wie geplant über einen Kavitätenreceiver umgesetzt. Dieser absorbiert die Strahlungsleistung und ist mit Wasser gekühlt. Über die Messung von Massenstrom und Eintritts- und Austrittstemperatur kann die über das Wasser abgeführte Leistung kalorimetrisch bestimmt werden. Um eine möglichst niedrige Messunsicherheit zu erreichen, wird für den Kavitätenreceiver nicht die Sensorik des Prüfstandes der 3. Generation verwendet, sondern eigene Temperatursensoren, eigene Heizwendeln zur Stabilisierung der Eingangstemperatur, und eine eigene In-Situ Leistungskalibration über eine zweite Heizwendel realisiert.

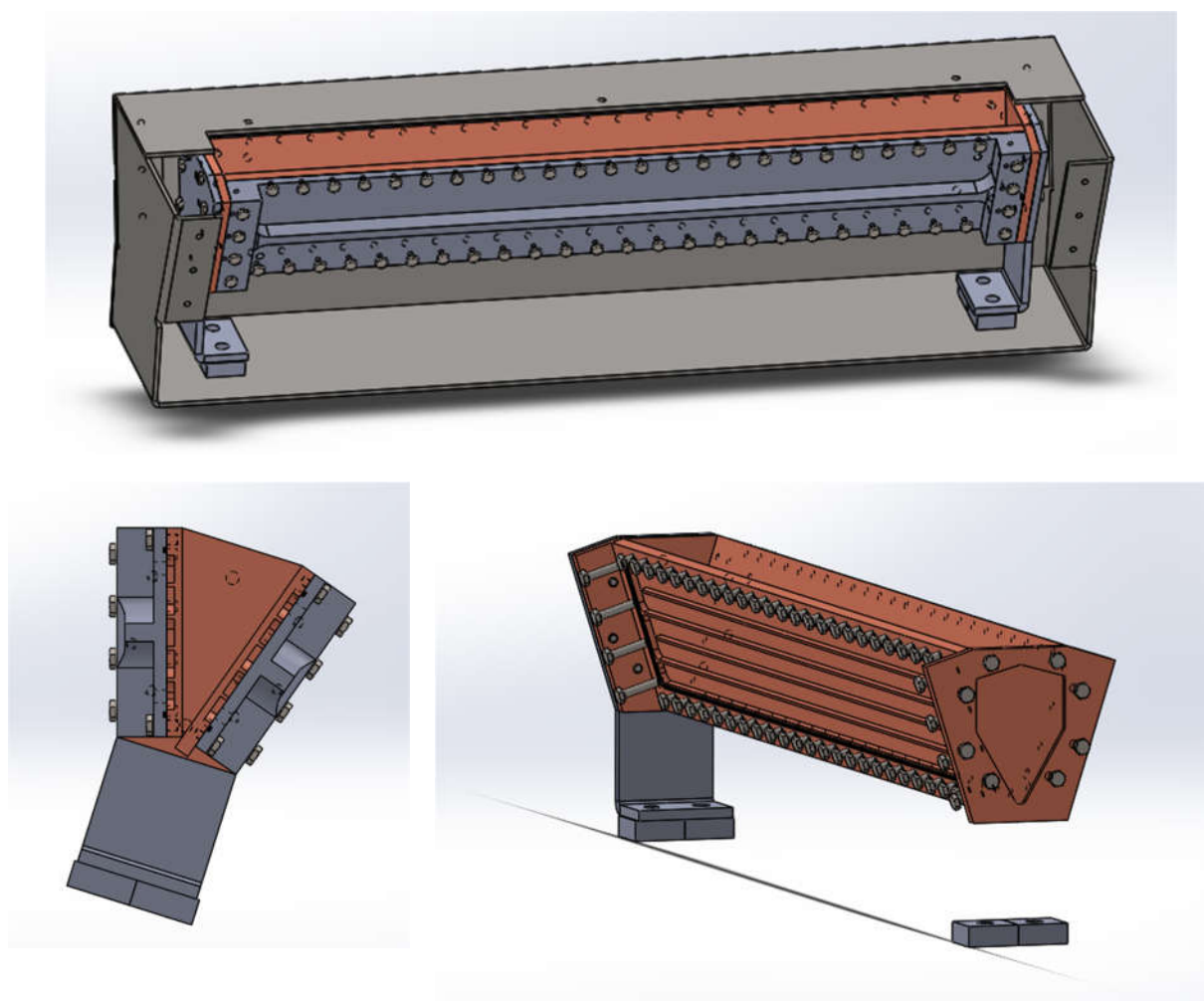


Abbildung 12: CAD Darstellung Kavitätenreceiver: Gesamtansicht mit teilweise entfernter Verkleidung (oben), Schnitt (unten links), Details der Plattenabsorber (unten rechts)

Ausgewählte Details der Konstruktion sind in Abbildung 12 dargestellt. Kernstück des Receivers sind vier wasserdurchflossene Plattenabsorber. Die der Strahlung zugewandten Seiten besteht aus einer Kupferplatten, in die Kühlkanäle eingefräst sind. Die Rückseiten der Plattenabsorber bestehen aus Edelstahlplatten, die über Dichtungen mit dem Kupfer wasserdicht abschließen. Die Kupferplatten sind auf der bestrahlten Seite hochabsorbierend beschichtet, wobei Pyromark zum Einsatz kommt. Die vier Platten sind über Winkel mechanisch verbunden. Sie sind V-förmig angeordnet und bilden den Hauptteil der Kavität. Rückseitig sind die Platten zunächst von einer thermischen Isolationsschicht, dann von einer festen, abschließenden Hülle umgeben. Die Öffnung des V bildet die Strahlungsöffnung. Eine zusätzliche Vorrichtung ermöglicht die Ausrichtung der Öffnung der Kavität zur einfallenden Strahlung.

Die Einfallsapertur der Kavität wird horizontal nach unten geöffnet ausgerichtet. So können, durch eine gegenüber der Umgebung leicht erhöhte Temperatur in der Kavität, Konvektionsverluste effektiv unterdrückt werden. Strahlungsverluste werden durch die nur leichte Temperaturüberhöhung niedrig gehalten.

Die im Vorfeld durchgeführte Unsicherheitsbetrachtung hat ergeben, dass vermutlich die Hauptquellen für die Messunsicherheit die Messung der Temperatur des Wassers, sowie die

Messung des effektiven Absorptionsgrads der Kavität sein werden. Um den Einfluss der Temperaturmessung niedrig zu halten, wurde die In-Situ-Kalibration dem System hinzugefügt. Der effektive Absorptionsgrad muss ggf. experimentell bestimmt werden, da für eine theoretische Vorhersage starke Vereinfachungen verwendet werden müssen.

Abbildung 13 zeigt den fertigen Kavitätenreceiver.

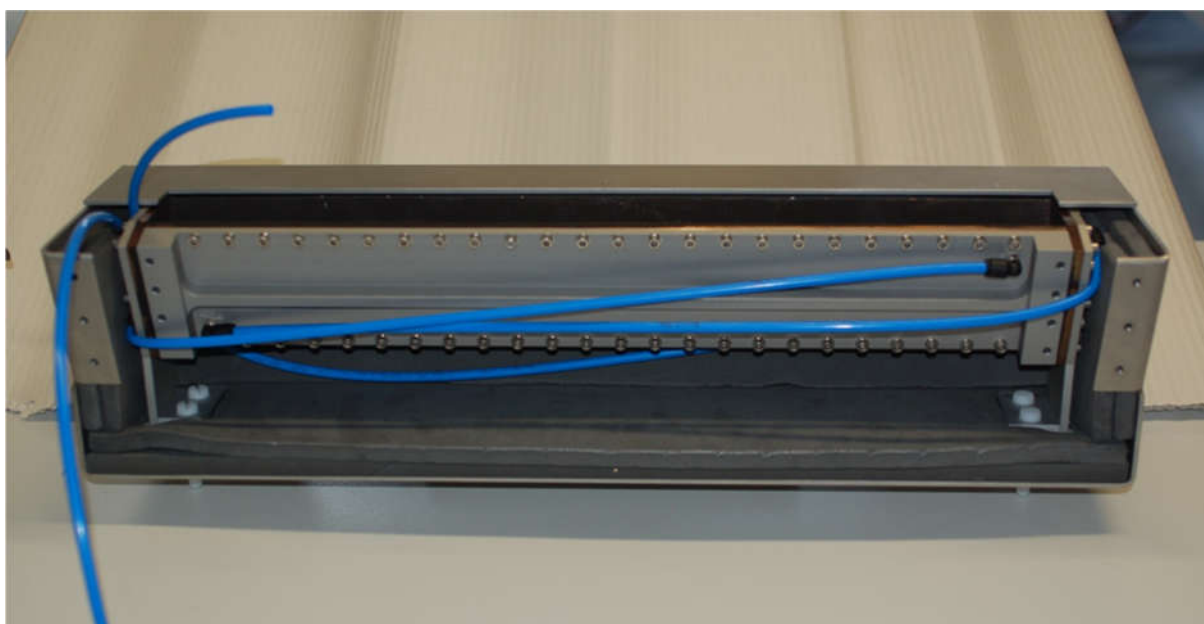


Abbildung 13: Kavitätenreceiver geöffnet

Abbildung 14 zeigt die wesentlichen Komponenten des Wasserkreislaufs.

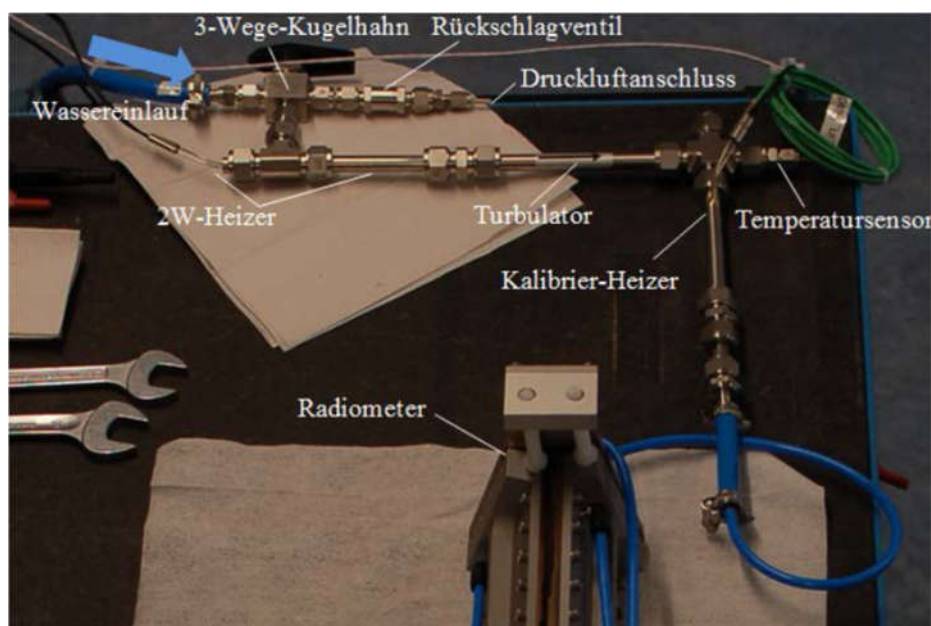


Abbildung 14: Kavitätenreceiver, Elemente des Wasserkreislaufs

Ein Druckluftanschluss ermöglicht das vollständige Entfernen von Wasser mit Druckluft um Korrosionsschäden zu vermeiden. Ein 2W-Heizer wird verwendet um die Wassertemperatur am

Eintritt zu stabilisieren. Turbulatoren vor den Temperatursensoren werden benötigt, da aufgrund der niedrigen Masseströme und Rohrdurchmesser laminare Strömungsbedingungen in den Absorberplatten und in den Verbindungsrohren vorliegen. Voruntersuchungen zur erwarteten Messunsicherheiten hatten ergeben, dass bei Verwendung der derzeit üblicherweise verwendeten PT100 Sensoren, Messunsicherheiten von ca. $\pm 2\%$ erreicht werden. Daher wurde ein Kalibrier-Heizer im Wasserkreislauf eingefügt, der eine In-Situ-Kalibration der Leistungsmessung ermöglicht. So kann die Kalibrationsunsicherheit der PT100 Sensoren vernachlässigt werden. Die Voruntersuchungen haben gezeigt, dass die Unsicherheit so potentiell auf deutlich unter 1% gesenkt werden kann.

Nach Konstruktion und Aufbau wurde der Kavitätenreceiver in Betrieb genommen. Da hierfür der Prüfstand der 3. Generation noch nicht zur Verfügung stand, wurde die Inbetriebnahme im Linear-Fokus Sonnensimulator 2. Generation (OptiRec) durchgeführt. Abbildung 15 zeigt den im Prüfstand eingebauten Kavitätenreceiver.

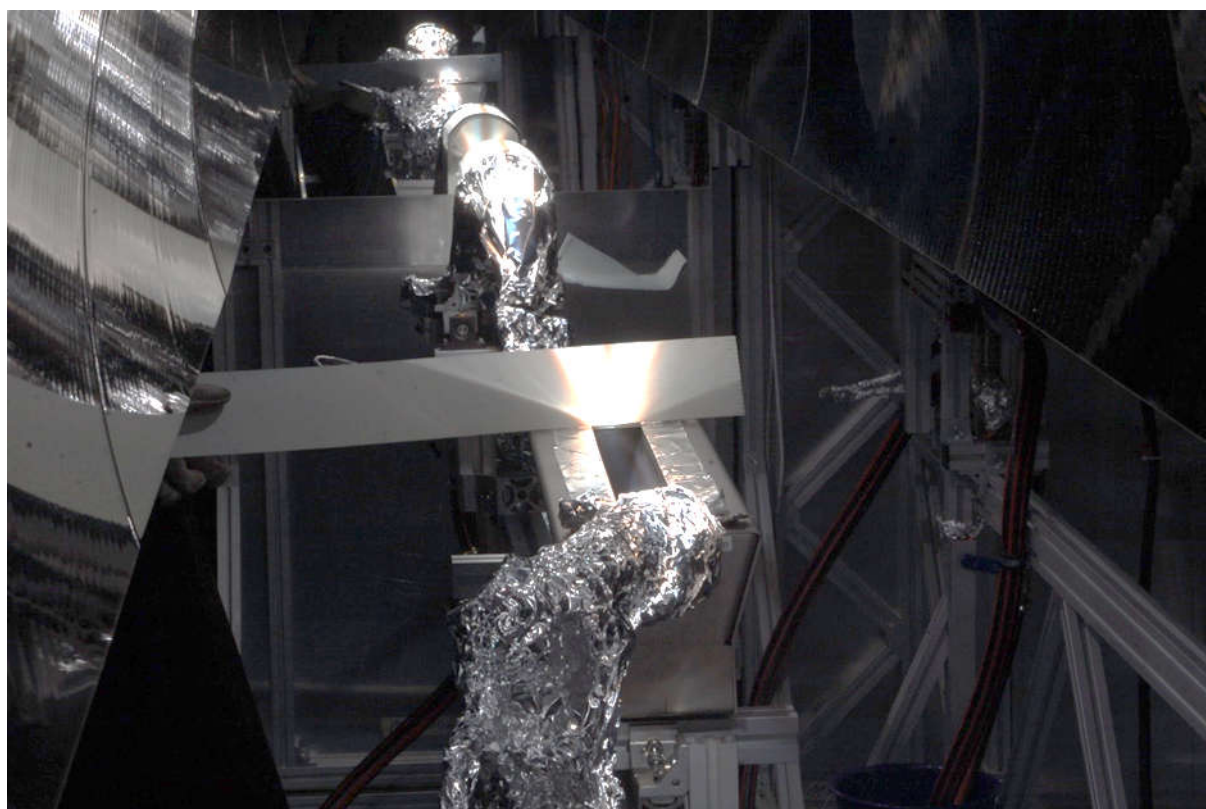


Abbildung 15: Inbetriebnahme des Kavitätenreceivers im linear-Fokus Sonnensimulator 2. Generation; eine Projektionsfläche visualisiert die einfallende Strahlung

In diesem Prüfstand erfolgt die Bestrahlung von oben, sodass die Kavität mit der Öffnung nach oben eingebaut wurde. Die vorgesehene Einbaurichtung im Prüfstand der 3. Generation ist mit der Öffnung nach unten, so dass natürliche Konvektion unterbunden wird. Die Messung ergab einen Fluss in die Kavität von 736 W, was sehr gut mit den erwarteten Werten übereinstimmt. Für die Inbetriebnahme wurde die In-situ Kalibration mittels Heizer getestet und deren Funktion nachgewiesen. Aufgrund der höheren Leistungsdichte im Prüfstand 2. Generation, als die Auslegung für den Prüfstand 3. Generation vorsah, konnte die Kalibration jedoch nicht auf die

Messung angewendet werden. In einer echten Messung der Leistung des Prüfstandes, über eine Inbetriebnahme der Kavität hinausgehend, hätte dieser Punkt durch die Verwendung eines anderen Netzgerätes leicht kompensiert werden können. Zudem wurde ein maximaler Volumenstrom von 50 l/h gemessen. Die angestrebten 85 l/h wurden also aufgrund der relativ hohen Strömungsverluste in der Kavität nicht erreicht. Dies wird auch nicht als kritisch angesehen, da die Messung auch bei 50 l/h durchgeführt werden kann.

II.1. AP 1.1.2 Entwicklung und Aufbau eines Prüfstandes zur kalorimetrischen Messung des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern der 3. Generation

Für den Prüfstand der 3. Generation zur kalorimetrischen Messung des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern ist vorgesehen deutlich von der Konzeption der Prüfstände 1. und 2. Generation abzuweichen. In letzteren wird eine Optik basierend auf einer Ellipsenrinne mit fixierten Lampenpositionen verwendet. Dadurch kann Licht von vier bis sechs Sonnensimulatorlampen mit je einer Reflexion auf eine Fokalline abgebildet werden. Während sich dieses Grundkonzept im Wesentlichen bewährt hat, weist es doch Nachteile in der Übertragbarkeit auf die Eigenschaften des Receivers im Feld auf: Das Spektrum der Lampen lässt sich nur sehr eingeschränkt beeinflussen, da das Licht mit einer Reflexion auf den Receiver geleitet wird und so verfügbare optische Filter zu klein für den Einsatz sind. Zudem ist der Einstrahlwinkel auf den Receiver durch die Geometrie vorgegeben, die in der Regel nicht verändert wird. Während dies für große Teile des Receivers kein großes Problem darstellt, führt es doch im Bereich der Faltenbalge zu systematischen Abweichungen zur Bestrahlungssituation im Feld. Diese zwei Punkte werden im Prüfstand 3. Generation adressiert. Unverändert zu den Vorgängerprüfständen bleibt die Messung des optischen Wirkungsgrads über die absorbierte Leistung im Receiver, wozu der Receiver während der Bestrahlung mit Wasser durchflossen wird.

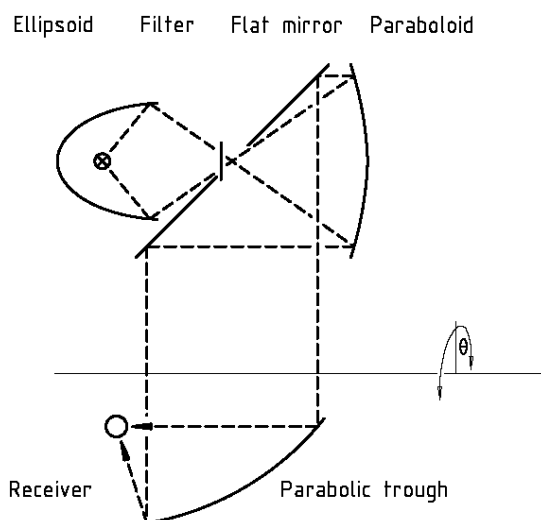


Abbildung 16: Strahlengang des Sonnensimulators 3. Generation

Um Spektrum und Einstellwinkel der Strahlung beeinflussen zu können wird ein Strahlengang verwendet, wie er in Abbildung 16 dargestellt ist. Licht geht von einer Lampe aus und wird zunächst auf einen optischen Filter fokussiert durch den das Spektrum verändert werden kann. Anschließend wird das Licht kollimiert (parallelisiert) durch Reflexion an einem Paraboloid oder, wie schlussendlich hier umgesetzt, durch Transmission einer Fresnellinse. Das kollimierte Licht fällt auf eine Parabolrinne, die in einer Dimension, also auf eine Linie, fokussiert. In der Fokallinie befindet sich der Receiver. Durch die Veränderung der Einfallsrichtung des kollimierten Lichts in die Parabolrinne kann der Bestrahlungswinkel des Receivers festgelegt werden. Flache Spiegel können genutzt werden, um das Licht ggf. umzulenken.

Um Probleme durch Erwärmung des Prüfstandes und die generellen Kosten des Systems klein zu halten, wurde eine Gesamtleistung der Lichtquelle von wenigen Kilowatt angestrebt. Dies ist um den Faktor 5 bis 10 niedriger als die Leistung der Lampen in den Prüfständen 1. und 2. Generation. Zudem wird nicht mehr die gesamte Länge des Receivers von typischerweise 4 m gleichzeitig bestrahlt. Stattdessen wird ein relativ kleiner Beleuchtungsfleck von ca. 50 cm Länge mittels einer Linearführung entlang des Receivers bewegt.

Um Kosten niedrig zu halten wird der Sonnensimulatorprüfstand der 3. Generation in Bezug auf das Wassersystem in den Prüfstand 2. Generation (OptiRec) integriert. Die entsprechende Anpassung des OptiRec wurde im Rahmen der Abschlussarbeit zum Kavitätenreceiver größtenteils fertiggestellt. Zunächst wurde dafür eine Messunsicherheitsbetrachtung aufgestellt und wesentliche Beiträge identifiziert. Anhand dessen konnten optimale Betriebsparameter festgelegt sowie geeignete, maßgeschneiderte Komponenten ausgewählt, bestellt und integriert werden. Es ist geplant die optische Leistung im Prüfstand der dritten Generation von derzeit 5 kW auf ca. 250 W bis 500 W zu reduzieren, also auf ein 1/10 bis 1/20 des derzeitigen Wertes. Daher wurden die Komponenten auf einen Massenstrom von 85 kg/h, statt bislang 850 kg/h, und einen Temperaturhub von 2 K, statt bislang 4 K ausgelegt. Aufgrund des niedrigeren Temperaturhubes ist dabei eine hohe Konstanz der Strömungsparameter, vorrangig von der Wassereintrittstemperatur in den Receiver, von entscheidender Bedeutung für eine niedrige Messunsicherheit des Prüfstandes. Erste Messungen zeigen, dass dieses Ziel mit dem entwickelten System zufriedenstellend erreicht wird. Die Schwankungen der Wassereintrittstemperatur liegt in einem Bereich unterhalb von 10 mK.

Die derzeit größte Quelle für Messunsicherheiten ist die Unsicherheit der Temperaturmessung an Receiverin- und -austritt. Daher wurde eine in-situ Kalibration der Temperaturmessstrecke in die Receiverhalterung integriert. Durch einen elektrischen Heizleiter im Bilanzierungsraum und ein hochgenaues Messgerät für elektrische Leistungen kann eine Kalibrationskurve aufgenommen werden, mit der die gemessene Temperaturdifferenz des Wassers zwischen Ein- und Austritt des Receivers direkt einer Leistung zugeordnet werden kann. Es wird erwartet, dass diese Art der Leistungsmessung wesentlich genauer ist, als die Messung der Leistung über die Messung absoluter Temperaturen.

Beleuchtungseinheit

Kern der Beleuchtungseinheit ist die Lichtquelle, eine Sonnensimulatoreinheit, die kollimiertes Licht liefert. Sie beinhaltet eine Xenon-Kurzbogenlampe mit 2,5 kW elektrischer

Anschlussleistung, eine Spannungsversorgung, optische Filter zur spektralen Korrektur zur Erreichung einer hohen spektralen Übereinstimmung mit Sonnenlicht und eine Optik zur Erzeugung des kollimierten Lichts. Damit integriert sie funktionell die Elemente Lampe, Ellipsoid, Filter, und Paraboloid (Fresnellinse) aus Abbildung 16.

Das kollimierte Licht wird dann von einem flachen Spiegel reflektiert und trifft auf eine Parabolrinne, die das kollimierte Licht in einer Dimension fokussiert und so die beleuchtete Fläche von 4 cm Breite und 30 cm bis 50 cm Länge erzeugt. Der flache Spiegel kann über einen Drehtisch und ein Goniometer in zwei Dimensionen verstellt werden, wodurch der axiale Einfallswinkel gewählt werden kann. Die Parabolrinne ist über Spanten realisiert, über die ein Aluminiumspiegelblech gespannt wird. Der Strahlengang wurde analysiert und optimiert im Hinblick auf eine möglichst kleine Breite des Fokus (< 4 cm). Hierbei hat sich ergeben, dass eine orthogonale Anordnung, die konstruktiv deutlich einfacher umzusetzen wäre, mit deutlichen Nachteilen verbunden ist. Daher werden sowohl der Sonnensimulator 30° zur Achse des Receivers um die vertikale Achse, als auch die Parabolrinne um 30° um die Achse des Receivers gedreht angeordnet.

Linearführung, Servomotor und Schleppkette

Da der Schwerpunkt der Beleuchtungseinheit variabel ist und weit von möglichen Einbauorten der Linearachse entfernt liegt, wird eine Linearführung realisiert, die große Drehmomente aufnehmen kann. Axiale Drehmomente können aufgenommen werden durch die parallele Anordnung zweier Linearachsen in ca. 1 m Abstand. Pro Linearachse werden zudem zwei Schlitten verwendet, sodass auch Drehmomente senkrecht zur Linearachse aufgenommen werden können. Aus der Länge der Receiver, der in axialer Richtung neben dem Receiver angeordneten Kavität, der beleuchteten Fläche, der Wanderung der Fläche bei Änderung des Einfallswinkels und der Haltekonstruktion wird ein benötigter Hub von 7,5 m angesetzt. Werden die zwei Schlitten einer Linearachse im Abstand von 1,5 m angeordnet, so ergibt sich eine Gesamtlänge der Linearachsen von ca. 9 m. Da die beleuchtete Fläche reproduzierbar positionierbar sein muss, wird eine Umlaufrollenführung bevorzugt. Der Antrieb der Linearachsen wird über einen Servomotor mit Steuereinheit realisiert. Eine Schleppkette ergänzt die Linearführung, da über diese elektrische Steuer- und Versorgungsleitungen zur Beleuchtungseinheit sicher geführt werden.

Haltestruktur

Die Haltestruktur muss alle wesentlichen Teile miteinander verbinden. Eine Basisstruktur muss die Montage und Justage der Linearachse bodennah ermöglichen. Da das Spiel von Linearachsen in der Größenordnung von 0,1 mm liegt, muss die Basisstruktur steif genug und entsprechend genau justierbar sein, um ein Verklemmen oder vorzeitigen Verschleiß zu vermeiden. Der Bereich zwischen den Linearachsen wird über Gitterroste und eine kleine Treppe begehbar gemacht. Dies ermöglicht die sichere Arbeit am Prüfstand, ist aber vor allem für die Montage der Receiver für eine Standardmessung notwendig. Zudem müssen Haltevorrichtungen für Receiver, Kavitätenreceiver und Projektionsschirm in ausreichender Steifigkeit konstruiert werden.

Abbildung 17 zeigt eine Stirnansicht des Prüfstands mit Basisstruktur, Haltestruktur und Beleuchtungseinheit, die verfahren wird. Die Beleuchtungseinheit besteht im Wesentlichen aus dem Sonnensimulator, dem verstellbaren flachen Umlenkspiegel (in der Grafik ausgeblendet) und der Parabolrinne. Der Receiver, im Bild nur im Umriss als Kreis dargestellt, wird durch eine seitliche Haltestruktur (auch in der Grafik teilweise ausgeblendet) gehalten.

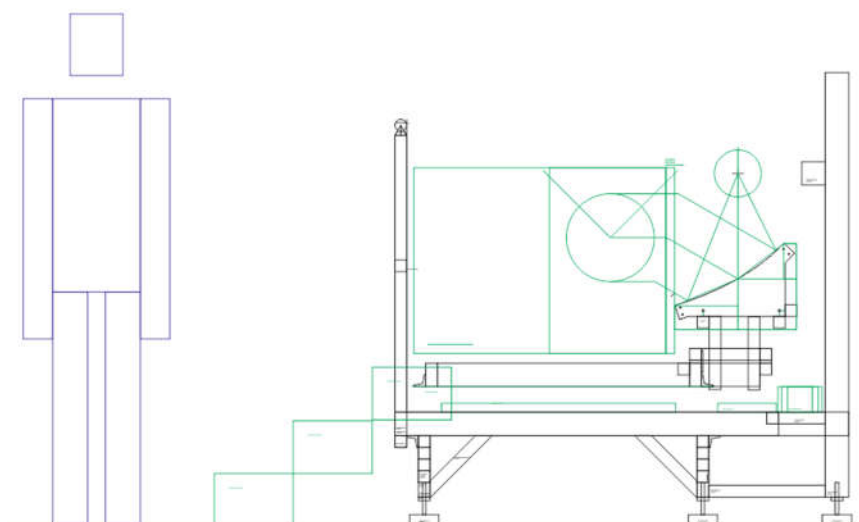


Abbildung 17: Stirnansicht der Unterstruktur des Sonnensimulators 3. Generation

Während der Projektlaufzeit sind die zum vollständigen Aufbau notwendigen Komponenten geliefert worden. Aufgrund weiterer Verzögerungen konnte der Prüfstand nicht mehr in der Projektlaufzeit aufgebaut werden. Aufbau und Inbetriebnahme sind nun für 2019 geplant.

II.1. AP 1.2 Prüfstände zur Untersuchung von Alterung und Ausfallwahrscheinlichkeit –Neuaufbau und Weiterentwicklung

II.1. AP 1.2.1 Modifikation des Überhitzungsprüfstandes und des Faltenbalgprüfstandes⁶ für höhere Temperaturen

Um künftig auch an Salz- und Direktverdampfungsreceiver Prüfungen zur beschleunigten Alterung durchführen zu können sollen in diesem Arbeitspaket der Überhitzungsprüfstand und der Faltenbalgprüfstand entsprechend umgerüstet werden. Dies wurde für den Faltenbalgprüfstand erreicht. Die Mittel für die Umrüstung des Überhitzungsprüfstandes wurden aufgrund von Kostensteigerungen in anderen Arbeitspaketen umgewidmet.

In der Vorgängerkonstruktion des Faltenbalgprüfstandes war das Glashüllrohr fest am Prüfstand fixiert und der Absorber wurde zyklisch hin und her bewegt. Um die Bewegung zu ermöglichen

⁶ In der Vorhabenbeschreibung wird in der Bezeichnung des Arbeitspakets 1.2.1 ein „Wärmeverlustprüfstand“ genannt. Gemeint war jedoch der Faltenbalgprüfstand, was auch eindeutig aus der Arbeitspaketbeschreibung hervor geht.

wurde der Absorber auf ca. 200 °C erwärmt, was etwa der Hälfte der maximalen Erwärmung relativ zur Umgebungstemperatur entspricht. Der Absorber unter dem Faltenbalg wurde auf maximale Einsatztemperatur von 400 °C erwärmt, weil für diese Temperatur die stärkste Alterung erwartet wird. Die Gewichtskraft von Absorber und Heizer wurde in der alten Konstruktion über den Faltenbalg ins Glashüllrohr geleitet, wo sie auf den Prüfstand abgeleitet wurde. Diese Art der Lagerung unterscheidet sich jedoch von der Einbausituation im Kollektor, wo die Parabolrinnenreceiver im Bereich der Schweißverbindung am stählernen Absorberrohr gehalten werden und die Faltenbalge ausschließlich die Masse des Glashüllrohres tragen. Für Ölreceiver wurde dies aufgrund ähnlicher Massen von Absorberrohr und Glasrohr als unkritisch angesehen.

Aufgrund der größeren Wandstärken der Absorber von Salz- und Direktverdampfungsreceiver sind hier die Absorberrohre jedoch deutlich schwerer als die jeweiligen Glashüllrohre. Mit der herkömmlichen Konstruktion würde der Faltenbalg an Salz und Direktverdampfungsreceiver ca. 3-fach überlastet. Deshalb wurde die Haltekonstruktion deutlich modifiziert. Zudem waren die Heizelemente für Absorber und Faltenbalg zwar für Ölreceiver ausreichend dimensioniert, nicht aber für Salz- und Direktverdampfungsreceiver, die bis 550 °C, statt bis 400 °C, betrieben werden. Daher wurden die Endheizungen der Vorgängerkonstruktion ebenfalls aufgerüstet.

Abbildung 18 zeigt das neue Haltekonzept. Das Absorberrohr wird in Absorberhalterungen (absorber clamp) eingespannt. Diese leiten die Gewichtskraft von Absorber und Heizer direkt ab, wodurch die Überlastung der Faltenbalge entfällt. Zudem verhindern die Absorberhalterungen insbesondere eine horizontale Verschiebung des Absorbers. Ein Motor erzeugt über einen Exzenter eine zyklische Bewegung zweier Schubstangen (push-pull shaft), die sich beiderseitig des Receivers befinden. Die Schubstangen sind über ein Linearlager (linear bearing) und ein Drehlager mit der Glashüllrohrhalterung (envelope clamp) verbunden. Die Lager ermöglichen dem Glasrohr eine freie Bewegung in vertikaler Richtung und eine freie Nickbewegung. Ein Gegengewicht mit Umlenkrolle gleicht die Gewichtskraft der Glashüllrohrhalterung aus, sodass die Faltenbalge nur die Gewichtskraft des Glashüllrohres als Scherspannung auf den Absorber übertragen. Dies entspricht der Belastung der Faltenbalge im Anwendungsfall im Feld.

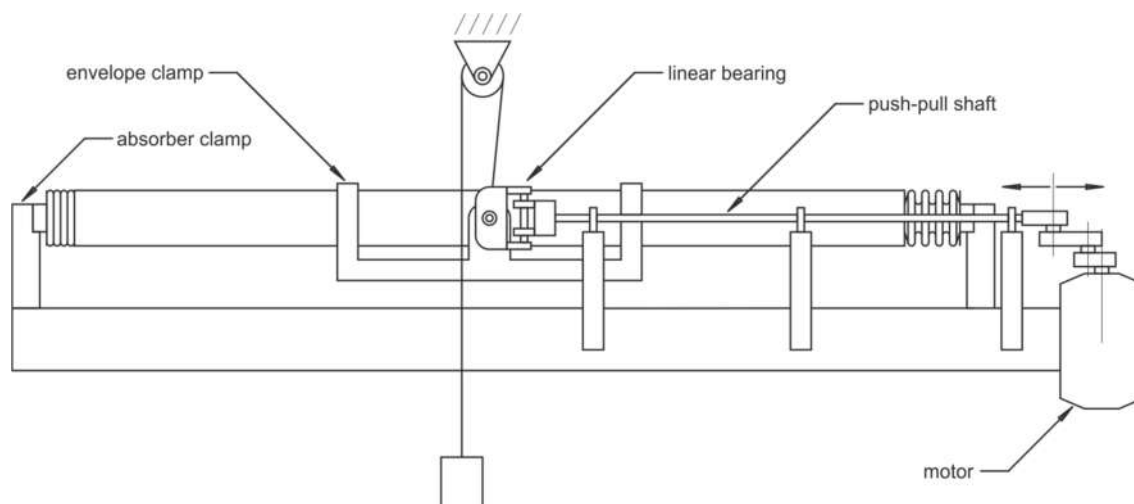


Abbildung 18 Schema des Prüfstands zur Faltenbalgalterung

Abbildung 19 zeigt den fertig umgebauten Prüfstand in der Übersicht.

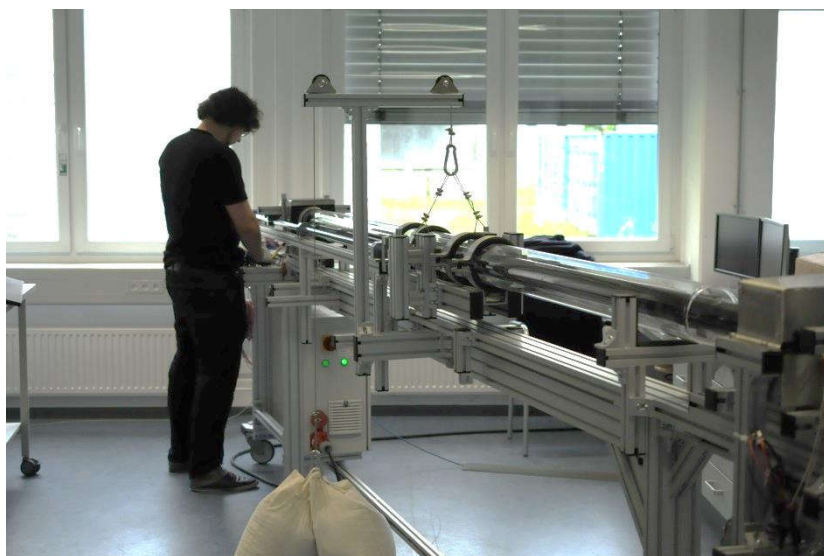


Abbildung 19 Faltenbalgprüfstand, fertig aufgerüstet für Salz- und Direktverdampfungsreceiver

Abbildung 20 zeigt die neue Absorberhalterung mit Endheizungen, Zuleitung und geöffneter Endisolation. Der Receiver ist gegen eine horizontale Verschiebung, also in Richtung der zyklischen Bewegung, fixiert.

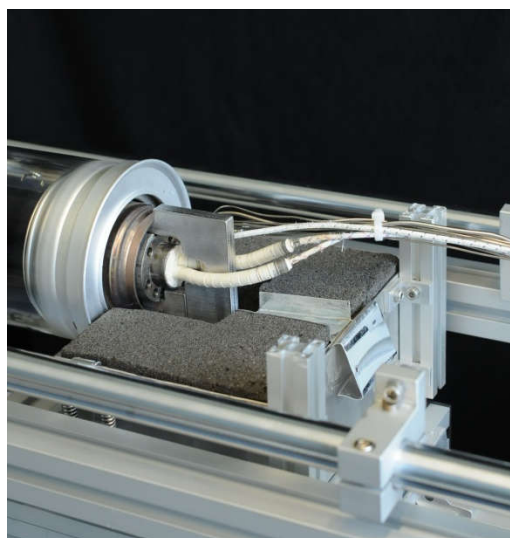


Abbildung 20 Absorbierende, Absorberhalterung, Zuleitungen für Thermoelemente und Heizungen und Endisolation

In der Vorgängerversion war ein Temperaturunterschied von ca. 50 K zwischen der oberen und der unteren Temperaturmessung am Absorber unter dem Faltenbalg beobachtet worden. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der Aufrüstung der Endheizung nicht nur die Leistung erhöht, sondern auch eine unabhängige Regelung der oberen und unteren Heizpatronen vorgesehen.

Im Vorgängerprüfstand kamen je Ende zwei Heizpatronen mit je 75 W zum Einsatz, die zusammen eine maximale Heizleistung von 150 W ermöglichten. Abbildung 21 zeigt den neuen Endheizungsblock mit den Bohrungen für die sechs Heizpatronen mit je 75 W, die zusammen nun eine Heizleistung von 450 W ermöglichen. Da an der Unterseite eine deutlich höhere Leistung benötigt wird, werden die unteren vier Heizpatronen (ZH) und die oberen zwei Heizpatronen (EH) jeweils gemeinsam geregelt. In den Ausschnitten oben und unten sind die Thermoelemente angebracht, mit denen die Temperatur gemessen wird. Für diese Stellen wird auch eine Zieltemperatur von 400 °C bzw. 550 °C vorgegeben und die Heizpatronen entsprechend angesteuert.

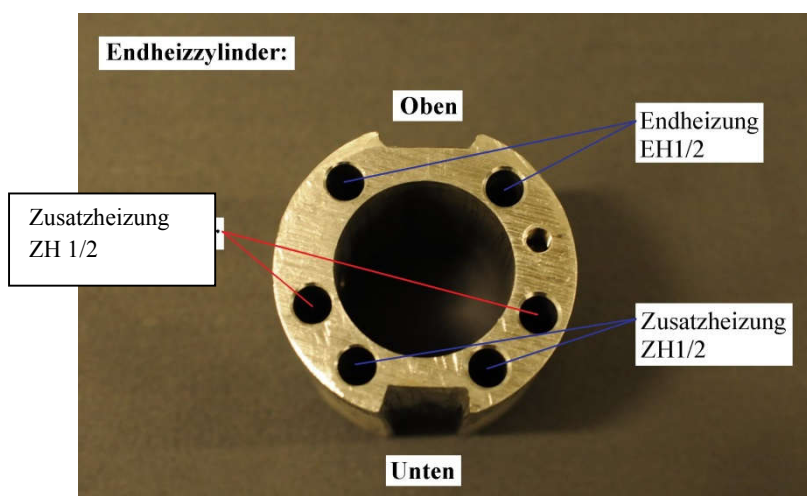


Abbildung 21 Endheizungsblock mit Bohrungen für die Heizpatronen. Mittelbohrung: Hauptheizung, Ausschnitt oben und unten für Thermoelemente und Bohrungen für Endheizpatronen

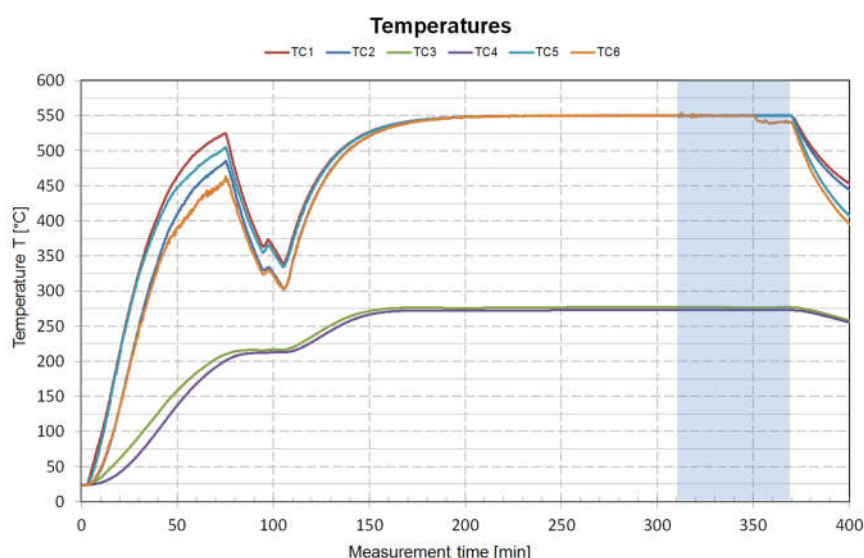


Abbildung 22 Erreichung der Zieltemperatur von 550 °C bei einer Messung; Temperaturmessstellen an den Endheizungen: TC1, TC2, TC5, TC6; Temperaturmessstellen in der Mitte des Receivers: TC3, TC4; Im blau unterlegten Bereich war die Faltenbalgbewegung aktiviert

Abbildung 22 zeigt Daten einer Messung zur Überprüfung der erreichbaren Temperaturen. Ziel war die Regelung der Enden TC1, TC2, TC5, TC6 auf 550 °C die Mitte auf TC3, TC4 auf 275 °C. Man erkennt, dass diese Ziele im Versuch erreicht wurden. Somit ist der Umbau abgeschlossen und Salz und Direktverdampfungsreceiver können im Prüfstand gemessen werden.

Für die Aufrüstung des Überhitzungsprüfstandes wurde lediglich eine Auslegung durchgeführt. Zunächst wurde die benötigte Heizleistung anhand von Wärmeverlustmessungen extrapoliert. Abbildung 23 zeigt die gemessenen Wärmeverluste eines Receivers bei Temperaturen bis 550°C und die extrapolierten Wärmeverluste für Temperaturen bis 800°C. Es wurden ähnliche Abschätzungen auch mit anderen Messdaten durchgeführt, die Abbildung 23 zeigt das Diagramm des Receivers mit den höchsten Wärmeverlusten dieser Abschätzung. Zieltemperatur für die Überhitzung von Salzreivern ist 750°C, mit einem Sicherheitszuschlag wurde daher eine benötigte Heizleistung von 15 kW angenommen.

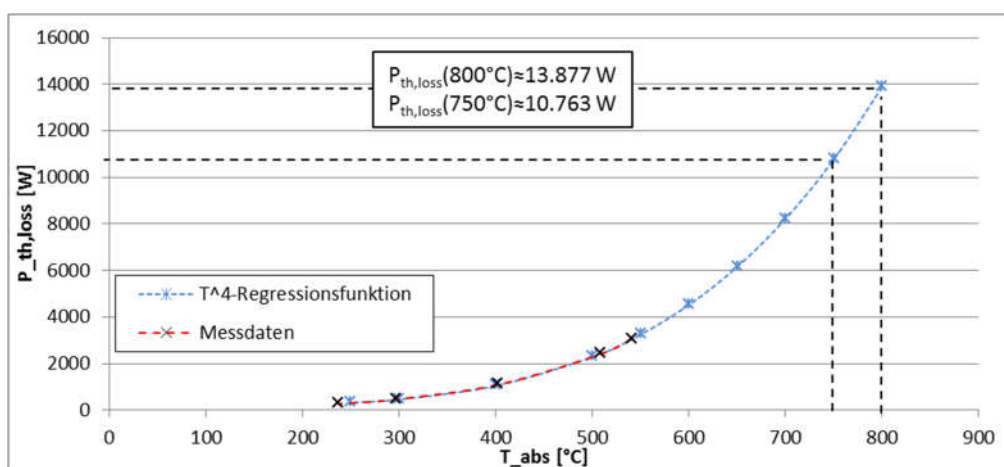


Abbildung 23: Abschätzung der Wärmeverlustleistung eines Receivers anhand Extrapolation von Messdaten

Entgegen der ursprünglichen Planung für die Aufrüstung des Überhitzungsprüfstandes wurde das Konzept zur direkten elektrischen Heizung des Receivers, bei der der Strom direkt durch den Absorber fließt und den elektrischen Widerstand des Stahls des Absorbers genutzt wird, aus verschiedenen Gründen bevorzugt. Bisher wurde eine Heizlanze über die gesamte Länge in den Receiver eingeschoben und dieser somit von innen beheizt. Eine direkte elektrische Heizung hat den Vorteil dass unterschiedliche Receiverlängen keine separaten Heizlanzen erfordern. Die Anpassung auf verschiedene Receiverdurchmesser ist auch recht einfach über unterschiedlich große Adapter zur Einleitung des Stroms möglich. Zudem ist für diese Art der Heizung keine Temperaturkorrektur nötig, da das Stahlrohr des Receivers direkt geheizt wird. Im Fall der Heizung über Heizlanzen hingegen ist die von innen gemessene Temperatur des Stahlrohres größer als die Temperatur an der Oberfläche des Receivers, weshalb hier eine Temperaturkorrektur anhand von aufwändigen Kalibrationsmessungen erforderlich ist.

Der Meilenstein M 1.2.1 „Überhitzungstests und Faltenbalgtests⁷ für Salz-/ Direktverdampfungsreceiver möglich“ wird nur in Bezug auf Faltenbalgtests erreicht. Die Durchführung von Überhitzungstests an Salz- und Direktverdampfungsreceiver wird aufgrund einer Verschiebung von Projektmitteln zugunsten höher priorisierter Projektziele im Rahmen des QUARZ-Zert Projekts nicht mehr erreicht.

II.1. AP 1.2.2 Wissenschaftliche Untersuchungen von Überhitzungstest und Faltenbalgbelastungstest

Untersuchungen zur statistischen Aussagekraft der Messungen am Faltenbalgprüfstand

Das Versagen mindestens eines der Faltenbalge an einem Parabolrinnenreceiver während einer festgelegten Testprozedur stellt ein klar definiertes Kriterium dafür dar, dass ein getesteter Receiver den Test nicht bestanden hat. Es wurde nun untersucht, wie die Aussagekraft über die Qualität einer Produktionsreihe von der Stichprobengröße und weiteren Testparametern abhängt. Die Anzahl der produzierten Receiver wurde dabei als sehr viel größer als alle betrachteten Stichproben angenommen. Es wurden zwei Szenarien betrachtet.

Legt man fest, dass ein Receiver nur dann annehmbar ist, wenn er einen bestimmten Test besteht, so lässt sich errechnen⁸, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass der Anteil nicht annehmbarer Receiver in der Produktionsreihe einen bestimmten Wert nicht überschreitet. Diese Wahrscheinlichkeit hängt von der Stichprobengröße und der Anzahl als annehmbar gefundener Receiver in der Stichprobe ab. Tabelle 2 zeigt beispielhaft einige Ergebnisse dieser Rechnung.

⁷ In der Vorhabenbeschreibung ist als Meilenstein M 1.2.1 u.a. die Durchführung von „Wärmeverlusttest“ beschrieben. Gemeint war jedoch die Durchführung von Faltenbalgtests, was auch eindeutig aus der Arbeitspaketbeschreibung hervor geht.

⁸ Blobel und Lohrmann, Statistische und numerische Methoden der Datenanalyse, Hamburg 2012

Tabelle 2: Wahrscheinlichkeit, dass der Anteil annehmbarer Receiver in der Produktionsreihe 90 % unterschreitet für eine Stichprobengröße n und Anzahl als nicht annehmbar gemessene Receiver r

	r=0	r=1	r=2	r=3	r=4	r=5	r=6	r=7	r=8	r=9	r=10
n=1	0.81	0.99									
n=2	0.73	0.97	0.99								
n=3	0.66	0.95	1	1							
n=4	0.59	0.92	0.99	1	1						
n=5	0.53	0.89	0.98	1	1	1					
n=6	0.48	0.85	0.97	1	1	1	1				
n=7	0.43	0.81	0.96	0.99	1	1	1	1			
n=8	0.39	0.77	0.95	0.99	1	1	1	1	1		
n=9	0.35	0.74	0.93	0.99	1	1	1	1	1	1	
n=10	0.31	0.68	0.91	0.98	1	1	1	1	1	1	1

Diese Überlegung ist unabhängig vom konkreten Versuchsaufbau. Es zeigt sich, dass z.B. bei einer Stichprobengröße von drei auch dann noch eine Wahrscheinlichkeit von über 60 % besteht, dass in der Produktionsreihe weniger als 90 % der Receiver das Annahmekriterium erfüllen, wenn alle gemessenen Receiver annehmbar sind. Allerdings erhöht sich diese Wahrscheinlichkeit auf fast 95 %, wenn nur ein gemessener Receiver nicht annehmbar ist.

Dieser Ansatz hat allerdings eine entscheidende Schwäche: Es wird vereinfachend angenommen, dass unter allen existierenden Produktionsreihen alle Anteile annehmbarer Receiver mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreten. D.h., dass das Entstehen einer Produktionsreihe mit 99 % annehmbarer Receiver genauso wahrscheinlich ist wie das einer Produktionsreihe mit nur 5 % annehmbarer Receiver. Es ist aber davon auszugehen, dass solche kleinen Anteile annehmbarer Receiver durch die Qualitätssicherungsmaßnahmen der Hersteller ausgeschlossen werden.

Betrachtet man nun speziell den Fall des Faltenbalgprüfstands so kann man annehmen, dass der Zeitpunkt des Versagens der Faltenbalge der Weibull-Wahrscheinlichkeitsdichte gehorcht. Die zugehörige Dichtefunktion hat zwei Parameter, die z.B. durch einen Fit an die Messergebnisse bestimmt werden können. Umgekehrt lässt sich mithilfe der Weibull-Verteilung berechnen, wie wahrscheinlich ein bestimmtes Messergebnis bei gegebenen Weibull-Parametern ist. Nun legt man als Qualitätsanforderung fest, dass nach N_1 Zyklen maximal ein Anteil von R_1 der Produktionsreihe versagen darf und misst nach N_2 Zyklen, wie viele Receiver einer Stichprobe versagt haben. Für dieses Szenario lässt sich bestimmen, welche Weibull-Parameter die maximale Wahrscheinlichkeit für das Messergebnis liefern und zugleich die Bedingung, dass nach N_1 Zyklen maximal R_1 Receiver der Produktionsreihe versagt haben dürfen. Einige solcher maximaler Wahrscheinlichkeiten sind beispielhaft in Tabelle 3 und Tabelle 4 angegeben. Diese Wahrscheinlichkeiten können im Prinzip genutzt werden, um ein Annahmekriterium für eine Produktionsreihe festzulegen und dafür, die Parameter für die Tests wie Stichprobengröße und Zyklenzahl im Test so zu optimieren, dass die Aussagekraft der Tests möglichst groß wird.

Tabelle 3: Maximale Wahrscheinlichkeiten, bei einer Stichprobengröße n als Messergebnis r Receivern zu finden, die den Test nicht bestanden haben, wenn $N1 = 10\ 000$ Zyklen, $N2 = 20\ 000$ Zyklen und $R1 = 0.1\ %$ sind.

	r=0	r=1	r=2	r=3	r=4	r=5	r=6	r=7	r=8	r=9	r=10
n = 3	1	0.44	0.44	1							
n = 4	1	0.42	0.38	0.42	1						
n = 5	1	0.41	0.35	0.35	0.41	1					
n = 6	1	0.4	0.33	0.31	0.33	0.4	0				
n = 7	1	0.4	0.32	0.29	0.29	0.32	0	0			
n = 8	1	0.39	0.31	0.28	0.27	0.28	0.31	0	0		
n = 9	1	0.39	0.31	0.27	0.26	0.26	0.27	0	0	0	
n = 10	1	0.39	0.3	0.27	0.25	0.25	0.25	0	0	0	0

Tabelle 4: Maximale Wahrscheinlichkeiten, bei einer Stichprobengröße n als Messergebnis r Receivern zu finden, die den Test nicht bestanden haben, wenn $N1 = 10\ 000$ Zyklen, $N2 = 12\ 000$ Zyklen und $R1 = 0.1\ %$ sind

	r=0	r=1	r=2	r=3	r=4	r=5	r=6	r=7	r=8	r=9	r=10
n = 3	1	0.44	0.44	0							
n = 4	1	0.42	0.38	0	0						
n = 5	1	0.41	0.35	0.35	0	0					
n = 6	1	0.4	0.33	0.31	0	0	0				
n = 7	1	0.4	0.32	0.29	0	0	0	0			
n = 8	1	0.39	0.31	0.29	0	0	0	0	0		
n = 9	1	0.39	0.31	0.27	0	0	0	0	0	0	
n = 10	1	0.39	0.3	0.27	0	0	0	0	0	0	0

Dieser Ansatz kommt ohne die vereinfachende Annahme gleichwahrscheinlicher Anteile annehmbarer Receiver des ersten Ansatzes aus. Es zeigt sich aber eine andere Schwäche: Dieser Ansatz stellt sicher, dass auch statistische Ausreißer fast nie dazu führen, dass Produktionsreihen als schlecht bewertet werden, obwohl sie in Wirklichkeit der Qualitätsanforderung genügen. Dabei nimmt man allerdings in Kauf, dass Produktionsreihen, die der Qualitätsanforderung nicht genügen, häufig nicht als schlecht erkannt werden.

Durchführung von Alterungstests zur Erprobung des Arrhenius-Ansatzes

Vorarbeiten haben ergeben, dass die in diesem Arbeitspaket geplanten Alterungsversuche an kleinen, beschichteten Proben anstelle, wie zunächst geplant, an vollständigen Receiver durchgeführt werden sollen. Dieses Vorgehen bietet wesentliche Vorteile, da sowohl Alterung als auch die Charakterisierung leichter durchzuführen sind. Dies bietet für die Zeit nach dem Projekt die Möglichkeit, die Methodik später einfacher in eine kostengünstige Messdienstleistung für die Industrie zu übertragen.

Durch das veränderte Vorgehen in diesem Arbeitspaket wird der Wortlaut von Meilenstein „M 1.2.2a“ entsprechend angepasst. Ursprünglich lautete die Bezeichnung „Beschleunigungsfaktor für einen Receptyp ermittelt“. Anstelle von „Receptyp“ wird zukünftig „Absorbercoating“ verwendet.

Für die Alterungsuntersuchungen an kleinen Proben wurde ein geeigneter Vakuumofen beschafft. Dieser ermöglicht die Alterung von kleinen Proben bei bis zu 950 °C bei einem Druck von 10^{-4} mbar. Im Rahmen der Erprobung des Arrhenius Ansatzes wurden Alterungstests im Vakuumofen mit Proben einer Partnerfirma durchgeführt. Die Beschichtung der Proben soll für Absorber eingesetzt werden, die für einen Betrieb von bis zu 400 °C vorgesehen sind.

Abbildung 24 b) zeigt zwei Absorberproben im Vakuumofen.

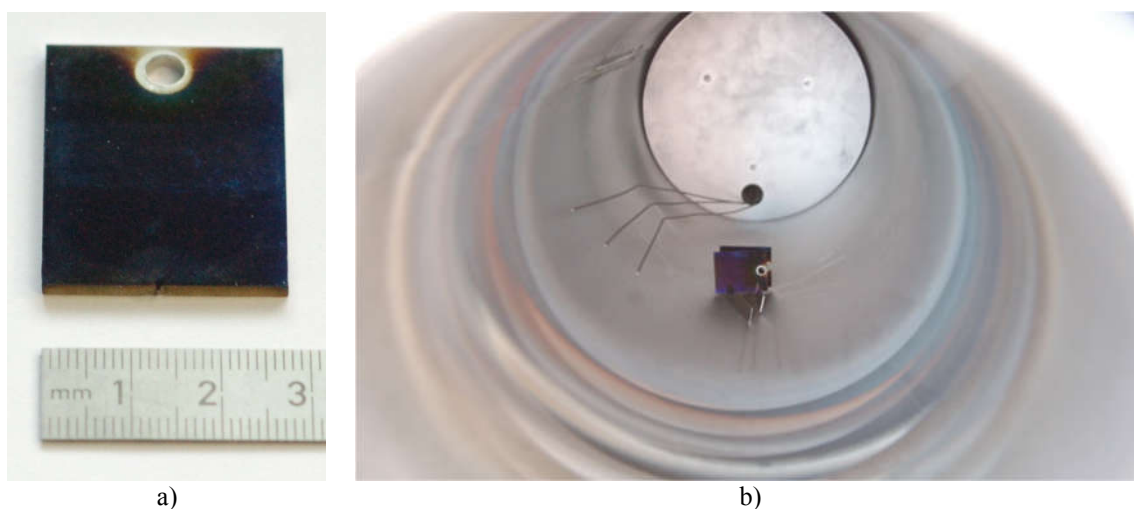


Abbildung 24: Absorberprobe(n) (etwa 25 mm x 35 mm): a) Nahaufnahme, b) im Vakuumofen, im Hintergrund drei Thermoelemente zur Messung der Kammertemperatur

Jeweils zwei Proben wurden bei 700 °C, 650 °C, 600 °C und 550 °C im Vakuumofen gealtert. Vor und nach der Alterung wurden die Proben auf den gerichtet-hemisphärischen Reflexionsgrad im Photospektrometer untersucht. Aus den so gewonnenen Spektren wurde der solar gewichtete Reflexionsgrad bestimmt, wobei die Gewichtung mit dem Spektrum ASTM 173-03 direkt durchgeführt wurde. Aus dem solar gewichteten Reflexionsgrad lässt sich der solar gewichtete Absorptionsgrad ableiten.

Aus Vormessungen war bekannt, dass die Messung des solaren Reflexionsgrads eine Wiederholgenauigkeit $< 0.1\%$ erreicht. Daher wurden die Alterungszeiten im Ofen mit dem Ziel gewählt, eine Veränderung von etwa 1 % zu messen. Einerseits soll die Veränderung so klein bleiben, dass die Alterungseffekte über lineare Modelle beschrieben werden können. Andererseits muss die Veränderung groß genug sein, dass sie mit dem Messgerät sinnvoll gemessen werden kann.

In der Messung ergaben sich schließlich Veränderungen von ca. 1 bis 3 %. Aus der Veränderung und der Alterungszeit wurde dann die Geschwindigkeit der Veränderung k' in 1/Tag ($=1/d$) bestimmt.

Das Arrhenius-Modell sagt eine exponentielle Abhängigkeit der Veränderungsgeschwindigkeit k' von der inversen Temperatur $1/T$ voraus. Daher wird üblicherweise ein Arrhenius-Plot erzeugt, bei dem $\ln(k')$ über $1/T$ aufgetragen wird. Die Messergebnisse sollte sich dann über eine Gerade beschreiben lassen. Abbildung 25 zeigt diesen Plot für die vorliegenden Messergebnisse. Im Plot bezeichnet der Datensatz „data“ die normalen Messungen. Der Datensatz „cancelled“ zeigt die Ergebnisse eines Alterungsdurchlaufs, bei der die Vakuumkammer mit den Proben im heißen

Zustand belüftet wurde. In diesem Fall kann erwartet werden, dass die heiße Probe mit dem Luftsauerstoff reagiert und schnell degradiert. Daher ist dieser Datensatz von der weiteren Auswertung ausgenommen.

Da die Temperatur über $1/T$ aufgetragen ist, erscheinen die Messungen hoher Temperaturen links und die niedriger Temperaturen rechts im Plot. Eine schnelle Veränderungsgeschwindigkeit ist oben, eine niedrige unten im Plot.

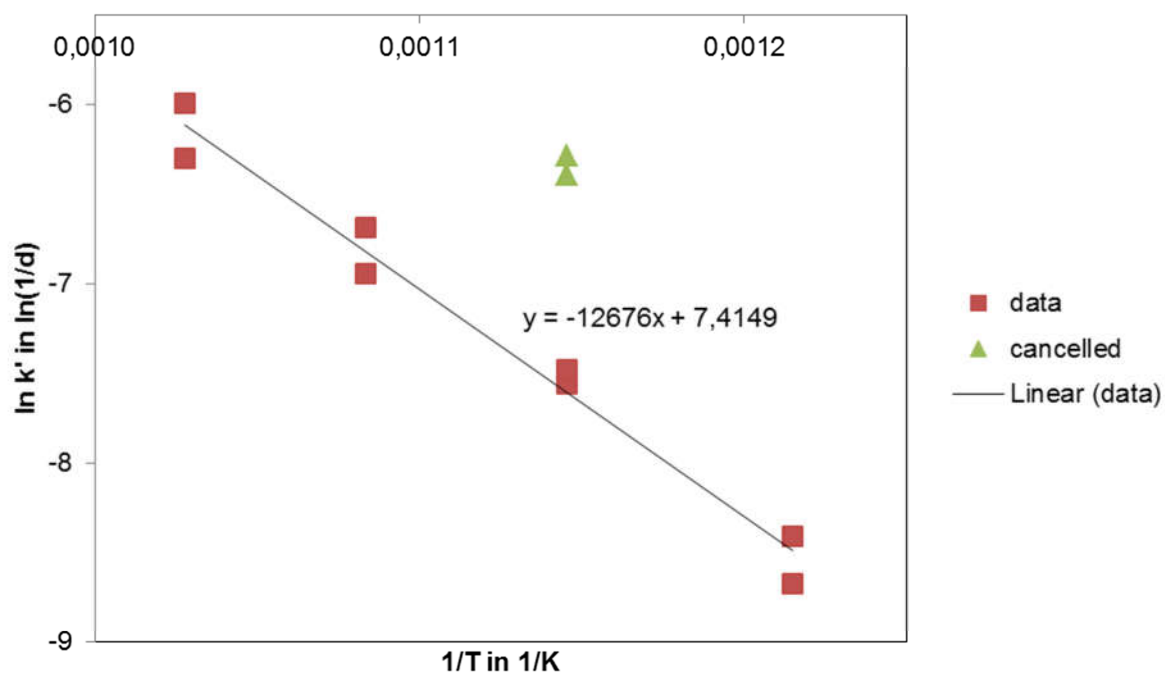


Abbildung 25 Arrhenius-Plot der gemessenen Proben des Industriepartners, Alterungsgeschwindigkeit k' für solaren Absorptionsgrad mit ASTM 173-03 d

Man erkennt, dass die lineare Näherung die Messdaten gut repräsentiert. Dies zeigt, dass das Arrhenius-Modell das Alterungsverhalten gut beschreibt und die Methodik grundsätzlich dazu geeignet ist, das Alterungsverhalten zu bestimmen. Aus der Steigung der linearen Näherung wurde die Aktivierungsenergie zu 105 kJ/mol bestimmt. Unter Annahme, dass sich das Alterungsverhalten auf Basis der Arrhenius-Gleichung zu niedrigeren Temperaturen extrapolieren lässt, ergibt sich für 400 °C eine Erhöhung des solaren Reflexionsgrades, gleichbedeutend mit einer Erniedrigung des solaren Absorptionsgrades um 1 % in 912 Tagen. Verglichen mit einer Erhöhung von 1% bei 478 °C in 129 Tagen ergibt sich ein Beschleunigungsfaktor von 7 für diese Schicht und die Temperaturen von 400 °C und 478 °C. Während 400 °C üblicherweise als für die maximale Betriebstemperatur für den Betrieb von Öltreibern angesetzt wird, entspricht die Temperatur von 478 °C der derzeit im QUARZ-Labor verwendenden Temperatur zur beschleunigten Alterung ganzer Receiver.

Für die Proben, die im heißen Zustand in der Vakuumkammer mit Luft in Berührung kamen, siehe Datensatz „cancelled“ in Abbildung 25, ergab sich eine deutlich erhöhte Alterung. Dies zeigt die Empfindlichkeit der Schicht im heißen Zustand bezüglich Luft und zudem die Notwendigkeit, solche Messungen im Vakuum mit einer vergleichbaren Qualität durchzuführen

wie sie im Receiver zu finden ist. Zudem wird so deutlich, dass bei einem Versagen des Vakuums eines Receivers, z.B. bei Glasbruch, die Leistungsfähigkeit des Receivers nicht nur aufgrund stark gesteigener Konvektiver Wärmeverluste beeinträchtigt wird. Auch kann erwartet werden, dass sich die Schichteigenschaften schnell verschlechtern.

In diesem Arbeitspaket konnte die Alterung kleiner Proben in der Vakuumkammer demonstriert werden. Die Änderung der Proben wurde über Spektrophotometermessungen charakterisiert und konnte sinnvoll über die Arrhenius-Gleichung beschrieben werden.

Verglichen mit dem Überhitzungsprüfstand im QUARZ-Labor, in dem Receiver bei 478°C für 1000 h beschleunigt gealtert werden ergibt sich: Bei einer Überhitzung auf 478 °C wird die Schicht um den Faktor 7 beschleunigt gealtert gegenüber dem Referenzfall des Betriebs im Feld bei 400 °C.

II.1. AP 2 Fortgeschrittene Prüf- und Berechnungsmethoden für Konzentratorspiegel

II.1. AP 2.1 Prüf- und Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Spiegelformgenauigkeit im Kollektor basierend auf Labormessungen

Ziel dieses Arbeitspaketes war es mittels Finiter-Elemente (FE) Modelle des gesamten Konzentrators eine Vorhersage der Spiegelform im Kollektor zu ermöglichen. Die Übertragbarkeit von der im Labor gemessenen Spiegelform auf die im realen Kollektor vorherrschenden Randbedingungen sollte untersucht werden. Zudem zielten die Arbeiten darauf ab, die entwickelten FE-Modelle mittels Strahlverfolgung auszuwerten um Ertragsprognosen des Gesamtkonzentrators zu erstellen. Der Teststand zur deflektometrischen Vermessung von Spiegelfacetten im QUARZ-Labor in Köln sollte dahingehend erweitert werden, dass im Kollektor auftretende Lastfälle nachgebildet und systematisch untersucht werden können.

II.1. AP 2.1.1 Entwicklung von Finite Elemente Modellen für einen Konzentrator der EuroTrough-Geometrie und Vergleich mit im Kollektor gemessenen Formgenauigkeiten

Bestehende Finite-Elemente Modelle eines Innen- und eines Außenspiegels der RP3-Geometrie wurden um Teile der Kollektorunterstruktur erweitert: Die Spiegelmontageklammern wurden detaillierter modelliert und die darunter liegenden Tragarme der Metallstruktur, die Kantileverarme, basierend auf Originalmaßen modelliert (siehe Abbildung 26). Im Laufe der Untersuchungen stellte sich heraus, dass insbesondere Montagefehler der L- und Z-Klammern, welche die Spiegel auf den Kantileverarmen halten, einen großen Einfluss auf die Spiegelform haben können. Daher wurden Gelenke (engl. Joints) an relevanten Stellen im Finite-Elemente-Modell implementiert, welche die relative Bewegung zwischen zwei oder mehr Bauteilen ermöglichten. Ziel war es, die Montageprozesse des Kollektors im FE-Modell abzubilden und auftretende Effekte zu verstehen und evaluieren zu können.



Abbildung 26: Laborstruktur der EuroTrough-Geometrie für Untersuchungen der Einflüsse der Unterstruktur und von Montagefehlern im QUARZ-Labor in Köln. Ein Innen- und ein Außenspiegel können auf original EuroTrough Halteklammern und Kantileverarmen montiert und untersucht werden.

Zwei Messkampagnen wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeitspakete durchgeführt – eine im QUARZ Labor in Köln sowie im Anschluss Messungen am KONTAS Kollektorteststand auf der Plataforma Solar de Almería in Spanien.

Im Rahmen der Labormessungen wurde ein Teilmodell des EuroTrough-Kollektors aufgebaut (siehe Abbildung 26). Dieses besteht aus zwei originalen Kantileverarmen, die an eine Metallstruktur, angelehnt an die EuroTrough Torsions-Box, montiert sind. Acht Montageklammern wurden installiert und ausgerichtet und dienen als Halteelemente für die Parabolspiegel. Zwei Spiegel der RP3-Geometrie, ein Innen- und ein Außenspiegel, wurden auf der Struktur montiert. Die resultierende Spiegelform wurde mittels Deflektometrie gemessen, siehe linkes Diagramm in Abbildung 27. Zur Bestimmung der Ausrichtung und Position der Montageklammern wurde anschließend eine photogrammetrische Messung durchgeführt. Die vorliegende Geometrie wurde in Teilen, soweit sinnvoll und begründbar, in das FE-Modell übernommen, um die gemessenen Spiegelformen nachbilden zu können. Das Ergebnis ist im rechten Diagramm in Abbildung 27 dargestellt. Im Rahmen dieser Labormessungen wurden erste Erfahrungen mit Dehnungsmessungen an den Halteklammern gesammelt.

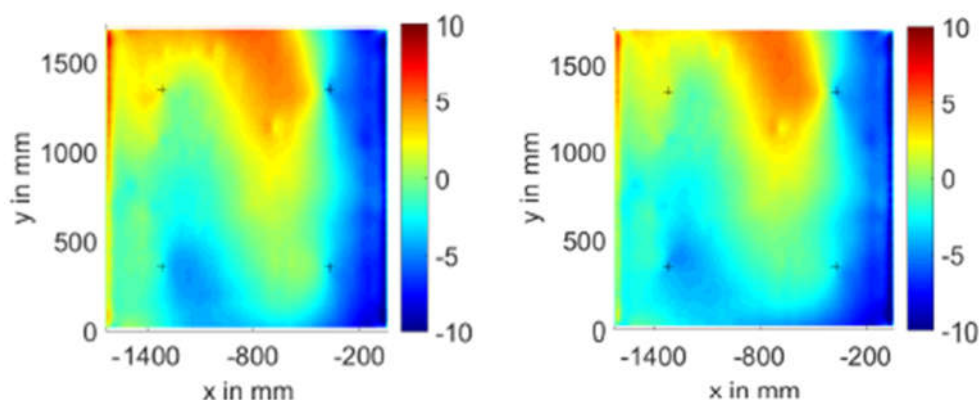


Abbildung 27: Messung der Spiegelform auf der Unterstruktur mit EuroTrough-Kantileverarmen. Gezeigt sind die Steigungsabweichungen der Oberflächennormalenvektoren (links) aus der Messung, (rechts) aus der Simulation, welche die Unterstrukturparameter der Messung berücksichtigt.

Im Anschluss wurde eine dreiwöchige Messkampagne am KONTAS-Prüfstand auf der Plataforma Solar de Almería in Spanien durchgeführt. Es wurden Daten zur Validierung der erstellten Finite-Elemente (FE)-Modelle des Konzentrators gesammelt. Die verwendeten Messmethoden und der Messablauf werden im Folgenden erläutert.



Abbildung 28: (Links) Orientation Measurement Adapter (OMA), die auf den Spiegelmontageklammern montiert werden, um deren Position und Ausrichtung photogrammetrisch zu vermessen. (Rechts) Mit Photogrammetriepunkten präparierte Spiegel in einer Kollektorreihe zur Bestimmung der Durchbiegung der Spiegel in unterschiedlichen Kollektororientierungen. Die Daten wurden mit den Daten einer QFly-Messung zusammengeführt und mit dem Finite-Elemente-Modell verglichen.

Der KONTAS-Prüfstand besteht aus einem Kollektormodul der EuroTrough-Geometrie (7 Spiegelreihen à 4 Spiegel), das zur zweiachsigen Sonnennachführung schwenk- und drehbar auf einer rotierenden Plattform installiert ist. Eine Spiegelreihe (zwei Innen- und zwei Außenspiegel) wurde demontiert und mit reflektierenden Photogrammetrie-Targetpunkten versehen, siehe Abbildung 28. Jeweils vier Dehnungsmessstreifen (DMS) wurden auf den Spiegelmontageklammern installiert um auftretende Dehnungen in unterschiedlichen Belastungssituationen messen zu können, siehe Abbildung 29 (Vorderseite der Klammer mit zwei DMS). Mittels spezieller Adapter (sogenannte OMA: Orientation Measurement Adapter, siehe Abbildung 28) wurden die Positionen und Winkelausrichtungen der Montageklammern vor der Montage der Spiegel sowie noch einmal am Ende der Messkampagne bestimmt. Die Durchbiegung der anschließend auf der Unterstruktur montierten Spiegel wurde mittels

Photogrammetrie für unterschiedliche Kollektororientierungen gemessen. Zugleich, sowie in weiteren separaten Messreihen, wurden die Dehnungen mittels der DMS aufgenommen, siehe Abbildung 29. Mit dem Kollektor in Zenit-Stellung wurde eine Messung zur Bestimmung der Steigungsabweichungen der Spiegelnormalenvektoren durchgeführt. Hierfür wurde das Messsystem QFly verwendet. Bei dieser deflektometrischen Messmethode wird die Reflexion des Absorberrohres von einer Drohne aus geometrisch ausgewertet.



Abbildung 29: Auf den Spiegelmontageklammern installierte Dehnungsmessstreifen (DMS). Die gemessenen Dehnungssignale werden mit den Werten virtueller DMS im Finite-Elemente-Modell verglichen. Rückschlüsse auf Reaktionskräfte auf die Spiegel, welche zu Spiegeldeformationen im laufenden Betrieb führen, werden ermöglicht.

Im Anschluss an die Messungen wurden die vier Spiegel im QUARZ-Labor in Köln weiter untersucht: Deflektometrische Messungen zur Bestimmung der Spiegelform außerhalb des Kollektors wurden auf dem für Spiegelformmessungen im QUARZ-Labor verwendeten Deflektometriegestell sowie auf einem Schwenkrahmen durchgeführt. Hierdurch konnten die Spiegel in möglichst kräftefreier vertikaler Position vermessen werden, so dass herstellungsbedingte Formabweichungen und Materialspannungen ermittelt und in die weiteren Auswertungen einbezogen werden konnten. Weiterhin wurden die Winkel aller Keramikpads der vier Spiegel ermittelt und ebenfalls im Weiteren berücksichtigt.

Im Rahmen des Auswerteprozesses der gemessenen Daten und zur Validierung der entwickelten FE-Modelle wurden Auswerteroutinen in Matlab entwickelt. Dies umfasste das Zusammenfügen der mittels Photogrammetrie gemessenen absoluten Durchbiegung der Spiegel in unterschiedlichen Kollektororientierungen mit den mit dem QFly-Messsystem ermittelten Steigungsabweichungen der Spiegelnormalenvektoren. Hierdurch konnten die Steigungsabweichungen für die übrigen vermessenen Kollektorwinkel bestimmt werden. Für die Auswertung der Dehnungssignale wurden die Schnittstellen zwischen FE-Modellen und Auswerteroutinen verfeinert um einen direkten Vergleich zwischen Messdaten und virtuellen Dehnungen zu ermöglichen.

Die mit OMAs photogrammetrisch erfassten Geometriedaten der Spiegelunterstruktur, die Ergebnisse aus den FE-Modellen und Optimierungsdurchläufen, sowie die Spiegelformdaten aus KONTAS- und Labormessungen wurden auf Übereinstimmung untersucht und somit die FE-Modelle validiert. Der automatisierte Arbeitsablauf (siehe AP 2.1.3) wurde verwendet.

Im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit wurde weiterhin ein Verfahren in die Matlab-Tools implementiert, bei dem mittels Optimierungsalgorithmen (genetischer Algorithmus CMA-ES / BOBYQA-Algorithmus) die zugrundeliegenden Randbedingungen (die Geometrie der Spiegelaufhängung) variiert werden, bis eine gemessene Spiegelform im Modell nachgebildet ist. Dies erlaubt einen weiteren Vergleich zwischen FE-Modell und realen Messungen und hilft die Mechanismen zu verstehen, welche im Kollektor zu Spiegelformabweichungen führen.

Insgesamt konnten für die auf der EuroTrough-ähnlichen Laborunterstruktur durchgeführten Messungen gute Übereinstimmungen der geometrischen Randbedingungen (insbesondere die Höhenposition der Montageklammern) mit den Ergebnissen des Optimierers gefunden werden. Verbleibende Abweichungen wurden auf fehlende Daten bezüglich der realen Geometrie, beispielsweise die genaue Position der Pads im Langloch, welche mit der vorliegenden Messtechnik nicht erfasst werden konnten, zurückgeführt.

Bezüglich der Auswertungen der am KONTAS-Teststand durchgeführten Messungen und dem Abgleich mit dem Modell wurde das folgende Vorgehen angewendet: Mithilfe des Optimierers wurde die Spiegelform für den Kollektor in Zenit-Orientierung nachgebildet. Die damit gefundenen Unterstrukturparameter wurden in das FE-Modell implementiert sowie daraufhin die Spiegelform in weiteren Kollektororientierungen ausgewertet und mit den Messergebnissen verglichen. Eine zufriedenstellende Übereinstimmung konnte gefunden werden, siehe Abbildung 31. Zusätzlich wurden gemessene mit simulierten Dehnungen an den Klammern der Spiegelunterstruktur verglichen. Auch hier wurden gute Übereinstimmungen gefunden, siehe Abbildung 29, woraus die korrekte strukturmechanische Funktionsweise des FE-Modells gefolgert wurde.

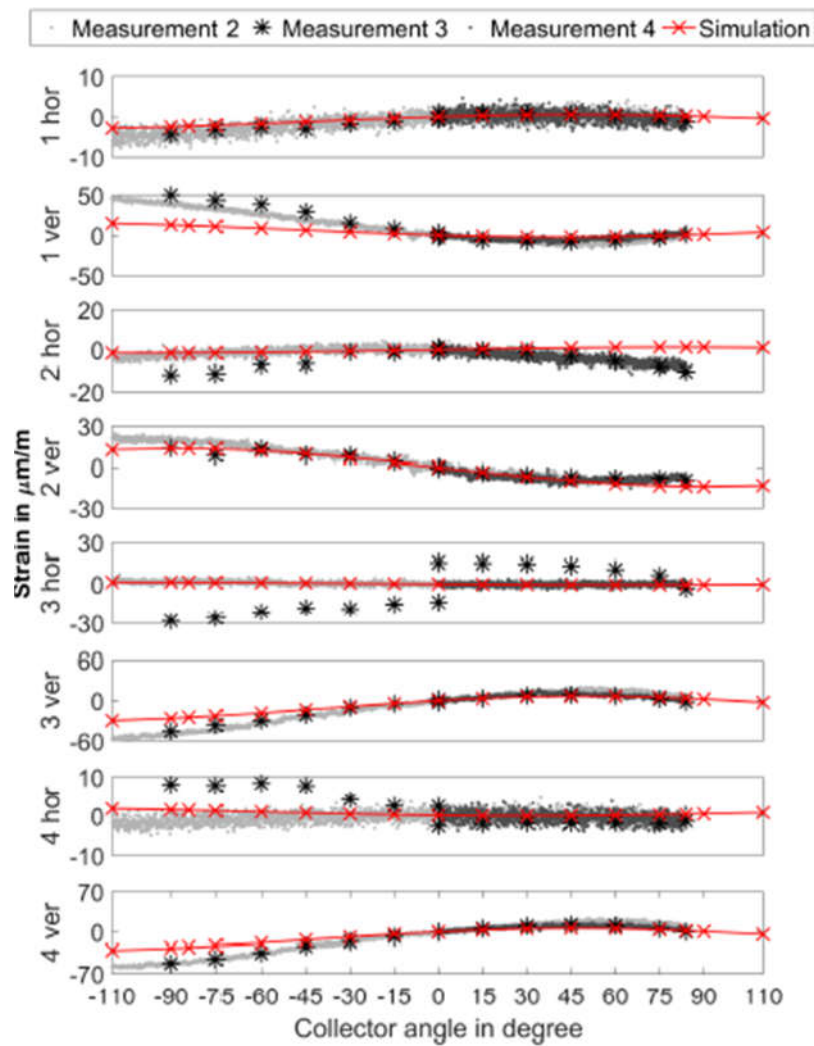


Abbildung 30: Vergleich gemessener und simulierter Dehnungen an den Halteklammern. Dargestellt sind beispielhaft drei Messungen. Die Dehnungen wurden ermittelt für unterschiedliche Kollektorwinkel an unterschiedlichen Messstellen an den vier Klammern (hor = horizontale Ausrichtung der DMS, ver = vertikale Ausrichtung). Nummern 1-4 bezeichnen die vier Klammern des hier vermessenen Spiegels.

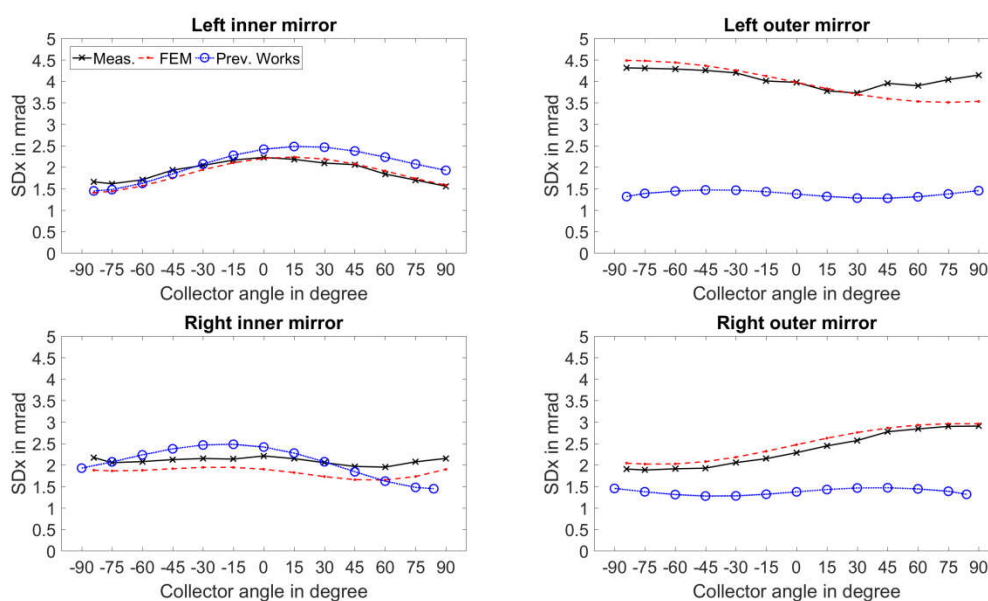


Abbildung 31 : Vergleich gemessener (Meas., schwarz) mit simulierter (FEM, rot) Spiegelform (RMS der Steigungsabweichungen der Oberflächennormalenvektoren der Spiegel für alle vier Spiegel der KONTAS-Messungen). Zur Verdeutlichung des Fortschritts ist der erreichte Stand vor den Arbeiten in diesem Projekt zusätzlich dargestellt (Prev. Works, blau).

Die in diesem Unterarbeitspaket erhaltenen Ergebnisse sind in der Dissertation „Influences on Mirror Shape Accuracy and Performance Prediction for Parabolic Trough Concentrating Solar Power Systems“ (Dissertation Simon Schneider, RWTH Aachen, Fakultät für Maschinenwesen) ausführlich dargestellt.

Aus dem Stand der Forschung ergeben sich Ideen und Vorschläge für das zukünftige Vorgehen, die am Ende von Abschnitt zum AP 2.1.3 kurz dargestellt und in der genannten Dissertation ausführlicher behandelt werden.

II.1. AP 2.1.2 Erweiterung des Funktionsumfangs des Prüfstandes zur Bestimmung der Spiegelformgenauigkeit

Der im Projekt QUARZ-CSP (Förderkennung 03UM0095) errichtete QDec Prüfstand zur Messung der Formgenauigkeit von Konzentratorspiegeln bietet die Möglichkeit einzelne Spiegel unter Laborbedingungen zu testen und den Einfluss verschiedener Messrandbedingungen zu untersuchen. Ziel dieses Arbeitspakets war es den Funktionsumfang des Teststands im Hinblick auf die für AP 2.1.1 und AP 2.1.3 erforderlichen Messrandbedingungen zu erweitern und kontinuierlich an den aktuellen Kenntnisstand bezüglich Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen anzupassen und zu erweitern.

Zur vollständigen Charakterisierung der Spiegel im Labor sowie die korrekten Interpretation und Integration der Messergebnisse zur Formgenauigkeit ist die Kenntnis der Position der Pads (Befestigungsvorrichtungen der einzelnen Spiegel im Kollektor) sowie deren Orientierung entscheidend. Daher wurde auch ein Messverfahren zur Bestimmung der Padposition entwickelt. Vervollständigt wird die die Spiegelcharakterisierung durch Adhäsionstests.

Insgesamt wurde durch diese Erweiterungen und Aktualisierungen, der Umfang der im QUARZ Labor der Industrie angebotenen Leistungen im Hinblick auf an den aktuellen und zukünftigen Bedarf von Industriekunden angepasst, signifikant erweitert und aktualisiert.

Die speziell für die im AP 2.1.1 und AP 2.1.3 benötigte Aufbau einer einstellbaren Halterstruktur für EuroTrough Spiegelfacetten im Labor ist in diesem Arbeitspaket durchgeführt und bereits im Rahmen von AP 2.1.1 beschrieben worden.

Padpositionsmessung

Die Position und Neigung der in Abbildung 32 beispielhaft dargestellten Pads, an denen Parabolspiegel mit den Halteklammern des Kollektors verbunden werden, haben einen großen Einfluss auf die Formgenauigkeit des Reflektors. Daher werden in typischen Messkampagnen im QUARZ-Zentrum neben der Formgenauigkeit auch diese beiden Eigenschaften geprüft.

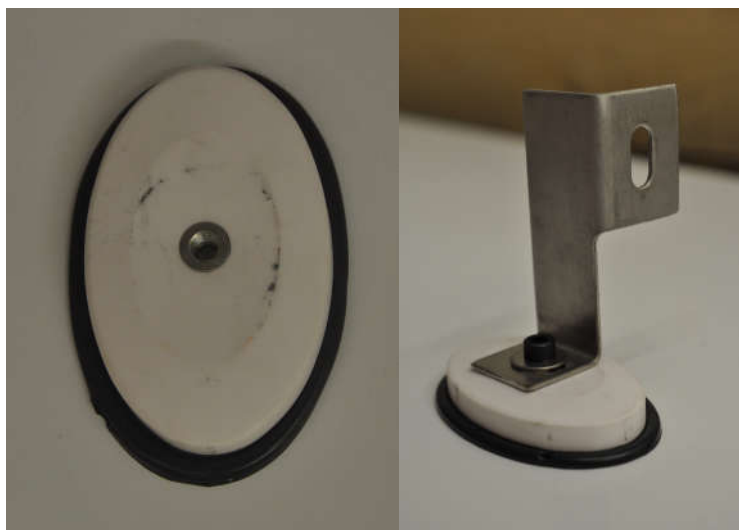


Abbildung 32: Keramisches Pad eines typischen Parabolspiegels zur Befestigung am Kollektor; rechts mit Halteklammer eines Kollektors

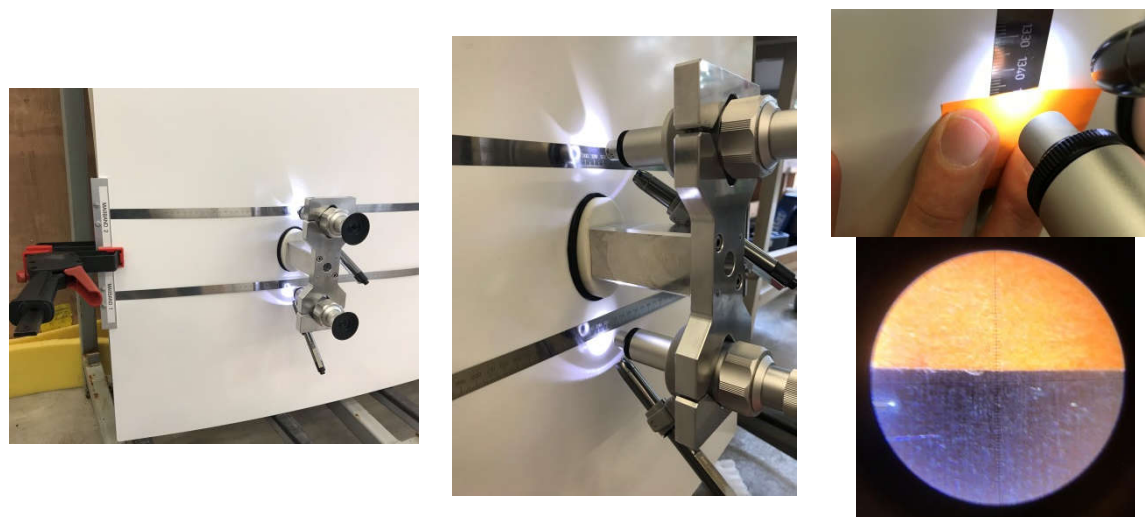
Die Messung der Padneigung/ des Padwinkels kann bereits sehr präzise mit einer speziell entwickelten Methode gemessen werden. Die Messung der Padpositionen wurde bisher mit herkömmlichen Maßbändern bzw. Gliedermaßstäben durchgeführt. Da die Unsicherheiten hierbei allerdings vergleichsweise hoch sind, wurde eine verbesserte Messmethodik entwickelt. Diese basiert auf kalibrierten Stahlmaßbändern mit Anschlägen, Messmikroskopen zum Ablesen mit einer hohen Auflösung und entsprechenden Adaptern, um die einzelnen Komponenten in Position zu halten.



Abbildung 33: Kalibriertes Stahlmaßband mit Anschlägen (links), Standmikroskop mit Lichtquelle (Mitte) [Quelle: Katalog Fa. Gödde], CAD Ansicht des Adapters zur Halterung zweier Mikroskope für Padpositionsmessungen (rechts)

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden geeignete Produkte für Stahlmaßband und Mikroskope identifiziert, das Design der benötigten Adapter definiert (Abbildung 33), diese beschafft und die neue Messmethodik erprobt. Ein besonderes Augenmerk lag dabei auf dem optimalen Verhältnis von Messunsicherheit (durch Formabweichung) und Kosten zu finden.

Abbildung 33 und Abbildung 34 zeigen das CAD Modell der aktuellen Version des Adapters, und den gefertigten Adapter. Dieser wird auf einem Pad aufgeschraubt und hält zwei äquidistante Mikroskope. Mit diesen Mikroskopen kann der Abstand zur Spiegelkante - wie in Abbildung 34 gezeigt - mithilfe von jeweils einem kalibrierten Stahlmaßband auf der Rückseite des Spiegels auf einen zwanzigstel Millimeter genau abgelesen werden. Durch Mittelwertbildung erhält man so die genaue Padposition, selbst wenn der Adapter zur Spiegelkante leicht verdreht sein sollte.



a) Übersicht Messaufbau

b) Adapter und Mikroskope

c) Ablesen der Maßbänder

Abbildung 34: Aufbau zur Padpositionsmessung mittels kalibrierter Stahlmaßbänder, Adapter und zweier Mikroskope

Adhäsionstest

Im Rahmen der Qualifizierung von Parabolspiegeln soll zukünftig auch geprüft werden, ob die Klebeverbindung der keramischen Pads (siehe Abbildung 32) den von Herstellern spezifizierten Zugkräften standhalten. Dazu wurde ein geeignetes Adhäsionskraft-Messgerät angeschafft. Durch die Geometrie der Pads und die Tatsache, dass das Messgerät auf die gekrümmte Spiegelrückseite aufgesetzt wird, ist ein allerdings ein Adapter notwendig. Dieser wurde ebenfalls im Rahmen des Arbeitspakets entwickelt und ist in Abbildung 35 (Mitte) erkennbar.

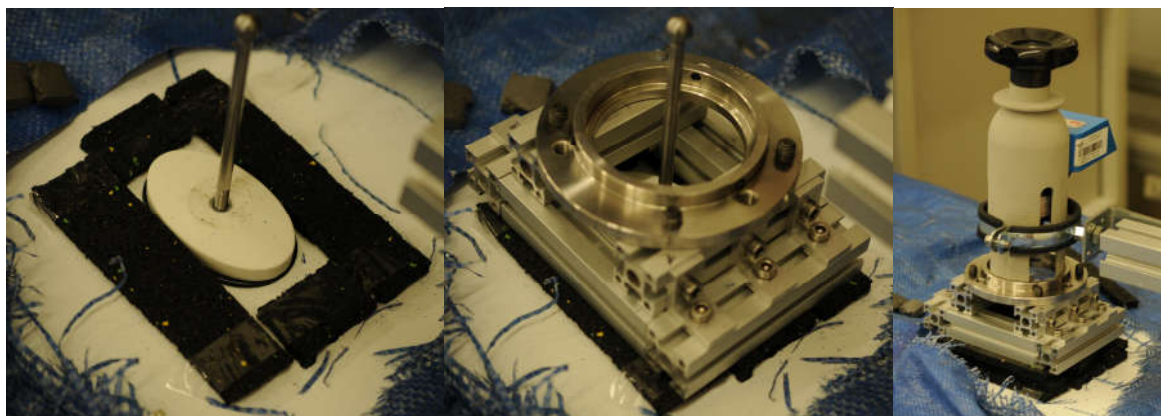


Abbildung 35: Vorrichtung zur Messung der Adhäsionskraft von Pads; Pad mit angepasster Zugstange (links), Adapter (Mitte), Installiertes Adhäsionsmessgerät mit Adapter (rechts)

Zur Erprobung der Messmethodik wurden mehrere Messreihen mit Spiegeln unterschiedlicher Hersteller und Produktionsverfahren durchgeführt. Dabei konnten alle drei möglichen Versagensmechanismen:

1. Padbruch und Lösen der Gewindehülse
2. Versagen der Klebeverbindung
3. Spiegelbruch

beobachtet werden. Es hat sich gezeigt, dass bei speziell gehärteten Spiegeln die Pads typischerweise abgezogen werden können, ohne dass der Glasspiegel bricht. Bei nicht gehärteten Spiegeln ist es vermehrt zu Spiegelbruch gekommen. Getestet wurde bis zum Versagen der Klebeverbindung oder Spiegelbruch. Abbildung 36 zeigt Pads nach dem Test für beide Fälle. Insgesamt wurde bei den Tests an Spiegeln unterschiedlicher Hersteller festgestellt, dass die Klebeverbindung der Pads den spezifizierten Zugkräften von typischerweise 3000N standhält und ein Versagen erst bei deutlich höheren Kräften eintritt.



Abbildung 36: Padbruch mit gelöster Gewindehülse am Zugstab (links), Klebestelle und abgezogenes Pad (mitte); abgezogenes Pad mit Glassplittern bei denen der Spiegel gebrochen ist (rechts)

Auf Basis der Erfahrungen konnte eine weitere Optimierung des Adapters und des Zugstabs durchgeführt werden. Der Test kann nun standardmäßig bei der Prüfung von Spiegeln angewendet und der Industrie angeboten werden.

Verbesserung und Erweiterung des Deflektometrieteststands

Für weitere Verbesserungen bzw. Erweiterungen und Aktualisierungen rund um den Deflektometrieprüfstand wurden Maßnahmen identifiziert und umgesetzt. Wesentliche Aspekte waren dabei die Auswahl und Beschaffung von Komponenten, deren Aufbau, Anpassungen in der Auswertesoftware QDec, sowie eine Untersuchung der Ebenheit der für Messungen benötigten Projektionsfläche im QUARZ Labor. Im Rahmen der regelmäßigen Kalibration des Prüfstands wurde die Einmessung der neuen Referenzen und anderen Komponenten sowie eine entsprechende Wasseroberflächenmessung durchgeführt.

(Re-)Positioniergenauigkeit und Spiegelhalterahmen

Bei Messungen mit dem Deflektometrieprüfstand zur Bestimmung der Formgenauigkeit von Reflektoren ist die Dauer der Vorbereitung im Vergleich zur Messdauer relativ lang. Wesentliche aber auch zeitintensive Aufgabe bei der Vorbereitung ist das Einmessen verschiedener Punkte im Raum mit einer laserbasierten Totalstation, um die Lage relevanter Elemente wie Spiegel, Kamera und Projektionsfläche genau zu kennen. Diese Informationen sind für die Auswertung von Messdaten unerlässlich. Erneutes Einmessen ist immer dann erforderlich, wenn beispielsweise der demontierbare Halterahmen für Spiegel seit der letzten Einmessung bewegt wurde. Dieser kann auf fest im Boden verankerten Stützstreben fixiert werden und wird immer dann demontiert, wenn der Platz im Labor für andere Zwecke benötigt wird. Um ein reproduzierbares Positionieren des Rahmens auf der Stützstruktur zu ermöglichen wurden die Auflageflächen bereits mit Passstiften bzw. Passhülsen versehen. Mit Hilfe einer im Projekt durchgeführten Messreihe zur Untersuchung dieser Reproduzierbarkeit, konnte gezeigt werden, dass die Abnahme und Wiederauflage des Spiegelrahmens keinen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis hat und somit vernachlässigbar ist. Unter dieser Voraussetzung ist daher zukünftig das Einmessen der relevanten Koordinaten bei der Vorbereitung von Messungen im Deflektometrieprüfstand nicht mehr notwendig, wodurch Aufwand und Dauer einer typischen Messkampagne deutlich reduziert sind.

Zur Verbesserung der Steifigkeit des Rahmens, Vereinfachung von Kalibrationen und Erhöhung der zukünftigen Flexibilität bei der Messung verschiedener Spiegelgeometrien wurden für einen weiterentwickelten Spiegelhalterungsrahmen für die Standardspiegelgeometrie RP3 Fertigungszeichnungen abgeleitet. Dieser besteht im Vergleich zum bisher eingesetzten Spiegelhalterungsrahmen nicht weiter aus selbstmontierten Systemprofilen aus Aluminium, sondern aus einer gefrästen Schweißkonstruktion aus Stahl. Dies dient im Wesentlichen zur Erhöhung der Biegesteifigkeit der Spiegelhalterung, minimiert die Verformung der Struktur durch extern eingeleitete Kräfte und gewährleistet eine verschleißunabhängige Reproduzierbarkeit der Messungen. Zudem ermöglichen drei definierte Auflageflächen, den oberen Teil des Spiegelhalterungsrahmens reproduzierbar positioniert auf den unteren Teil des Spiegelhalterungsrahmens aufzulegen, um diesen andernorts zu lagern oder gegen einen Rahmen für eine abweichende Spiegelgeometrie auszutauschen. Die justierbaren Spiegelauflagepunkte wurden ebenfalls weiterentwickelt und ermöglichen eine fein justierbare und gleichzeitig sicher fixierbare Positionierung der Auflagepunkte (Mountingpoints). Abbildung 37 zeigt eine CAD-Ansicht des neuen Spiegelhalterungsrahmens, der aufgebaute Bodenrahmen und ein exemplarischer justierbarer Spiegelauflagepunkt sind in Abbildung 39 (a) bzw. (b) dargestellt.

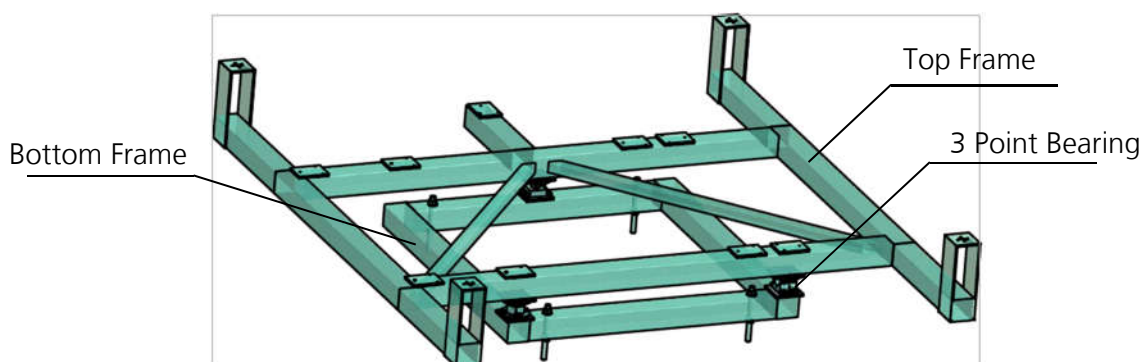


Abbildung 37: CAD Ansicht aus den Fertigungszeichnungen des neuen Spiegelhalterungsrahmens bestehend aus fest montiertem Bodenrahmen und abnehmbarem Spiegelhalterrahmen mit jeweils drei hochgenauen Auflagern

Hinzukommend wurde eine Stahlwanne für die regelmäßige Kalibration des Prüfstandes mit einer Wasseroberflächenmessung (sichtbar im Messaufbaus in Abbildung 38) konstruiert, welche auf die Schweißkonstruktion positionsreproduzierbar aufgelegt werden kann und den Arbeitsaufwand bei zukünftigen Wasseroberflächenmessungen deutlich reduziert. Ebenso kann auf den weiterentwickelten Spiegelhalterungsrahmen auch eine optische Planplatte aufgelegt werden, auf der dann auch flache Spiegelproben positioniert und (je nach Größe ggf.) ohne umfangreiche Positionseinmessung vermessen werden können.

Alternativ oder bei höheren Genauigkeitsanforderungen (z.B. für sehr kleine Spiegelproben) könnte das Set-up zukünftig auch mittels Photogrammetrie eingemessen werden.

Weiterhin wurde ein neuer **Projektor** für den Deflektometrieprüfstand ausgewählt, beschafft, installiert kalibriert und in Betrieb genommen, welcher durch den Einsatz eines neuen Objektivs die gesamte Fläche des Targets ausleuchtet und so nun auch ermöglicht große

Spiegelgeometrien und nicht- oder nur geringfügig fokussierende Spiegel wie Heliostate oder Heliostatfacetten zu vermessen.

Im Rahmen der Prüfstandsaufrüstung wurden die bisher verwendeten Spiegelreflexkameras durch **neue Industriekameras** (aus internen Beständen) ersetzt. Diese wurden in das System integriert und in Betrieb genommen und ermöglichen nun eine schnellere Messabfolge durch verbesserter Bildverarbeitung und –übertragung.

Kleinere **Softwareanpassungen** in der **QDec Software** und **Verbesserungen in den Messabläufen und Protokollen**, die im Projekt realisiert werden konnten vereinfachen zudem das Handling und die Datensicherung für zukünftige Messaufträge und wissenschaftliche Untersuchungen.

Der neue **Spiegelhalterahmen** wurde hochgenau justiert, eingemessen und eine Kalibration des gesamten Messsystems durchgeführt. Als Referenzfläche wurde wie in Abbildung 38 gezeigt eine Wasseroberfläche eingemessen und hiermit Steigungsabweichungen von unter 0.2 mrad im quadratischen Mittelwert bestätigt. Darüber hinaus wurden Referenzgläser ohne rückseitige Spiegelschicht zur schnellen routinemäßigen Überprüfung des Prüfstands eingemessen.

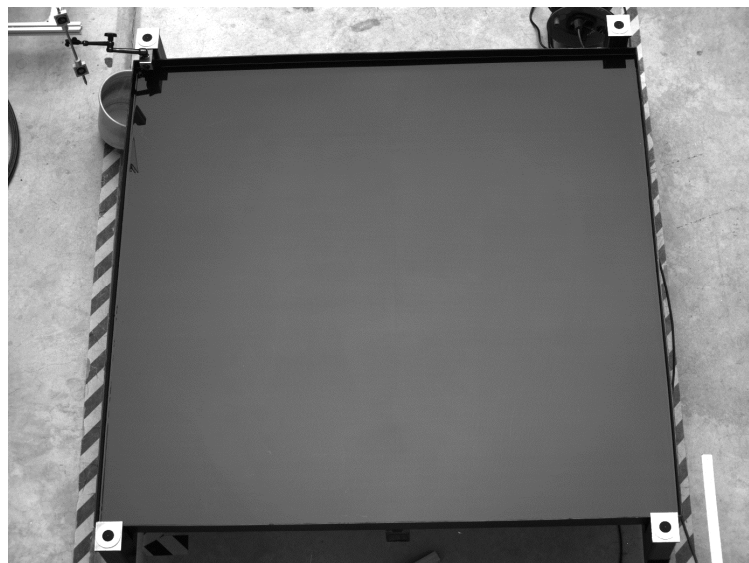


Abbildung 38: Wasseroberflächenmessung mit neuer schwarzer Stahlwanne aus Spiegelkameraperspektive

Ein hochauflöser Scan des Deckentargets mit einem Punktabstand von 12cm wurde mit dem Tachymeter durchgeführt und ausgewertet. Die so ermittelten 3D-Koordinaten des Deckentargets werden in der QDec Auswertesoftware berücksichtigt und Abweichungen von der Idealgeometrie berücksichtigt. Existierende Unebenheiten im Deckentarget im DLR QUARZ-Labor können auf seinen Aufbau und Schwerkrafteinflüsse zurückgeführt werden und bedürfen derzeit keiner weiteren Maßnahmen.

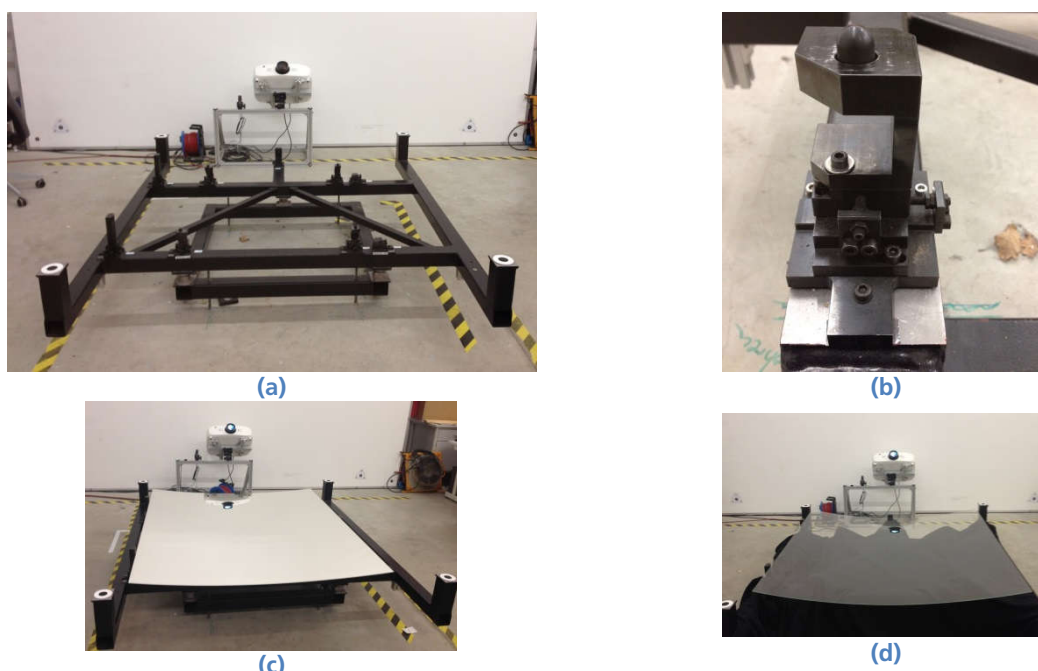


Abbildung 39: QDec- Aufbau: (a) neuer Spiegelhalterahmen, (b) Detail eines justierbaren Auflagepunkts (c) Prüfstand mit Testspiegel, (d) Prüfstands Aufbau mit Referenzglas,

Das QDec Messsystem zur Bestimmung der Spiegelformgenauigkeit ist somit durch neue Komponenten wie Industriekameras, Projektor sowie einen formstabilem Rahmen auf dem neuesten Stand der Technik und einsatzbereit für die Durchführung von Industrieaufträgen.

II.1. AP 2.1.3 Berechnungsmethoden für Konzentratorspiegel (Interceptfaktor)

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Berechnung des Intercept-Faktors (vereinfacht vorstellbar als die Trefferquote der konzentrierten Strahlung) für verschiedene Betriebsbedingungen sowie die Bewertung des Einflusses dieser Last- und Randbedingungen auf den Kollektor- bzw. Kraftwerksertrag. Hierzu war geplant, Schnittstellen für das DLR-Strahlverfolgungsprogramm STRAL zu entwickeln und in einen Programmablauf zu integrieren, um Ergebnisse aus Finite-Elemente-Analysen optisch zu evaluieren.

Zunächst wurden Schnittstellen für STRAL in Form von Matlab-Funktionen entwickelt. Im Rahmen der Einbindung des Programms in den Arbeitsablauf stellte sich heraus, dass die Implementierung der Parabolrinnentechnologie in STRAL noch grundlegender Erweiterung seitens der Entwickler bedurfte. Im weiteren Verlauf wurde durch das ebenfalls DLR-interne Strahlverfolgungsprogramm SPRAY in den Arbeitsablauf integriert. Für STRAL wurde ein Lastenheft aufgesetzt und an die Entwickler übergeben.

Der integrierende Arbeitsablauf ist in Abbildung 40 dargestellt. Er umfasst das Finite-Elemente Programm ANSYS, die Programmierumgebung Matlab, das zuvor genannte Strahlverfolgungsprogramm SPRAY sowie zur Bestimmung des Kraftwerksertrags das im DLR entwickelte Programm GREENIUS.

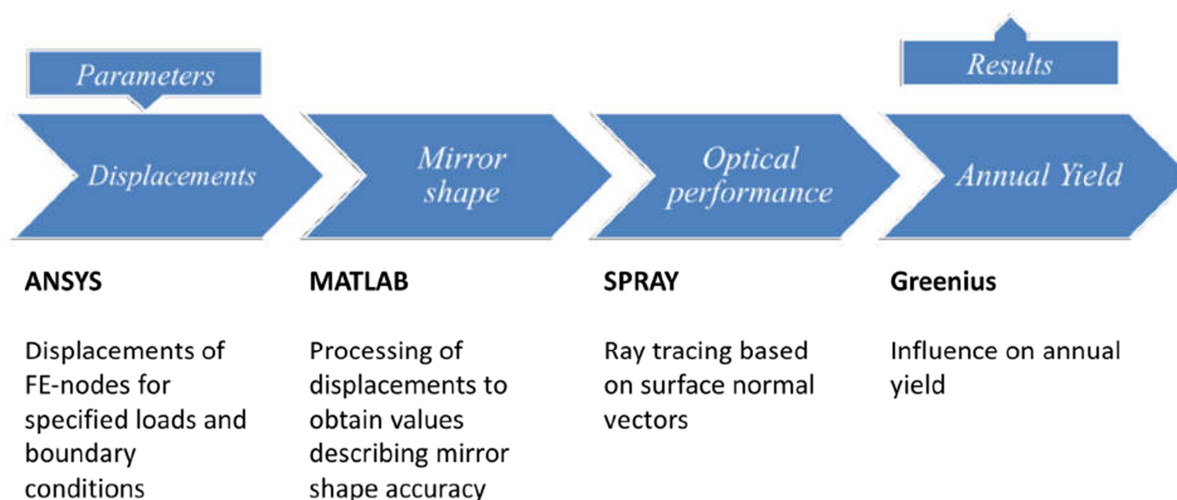


Abbildung 40: Ablauf zur Auswertung von Lasten und Randbedingungen auf die Spiegelform mit ANSYS, Matlab, SPRAY und Greenius.

In Matlab wurde ein Programm mit grafischer Oberfläche entwickelt, welches den Auswerteprozess steuert. Das Programm nimmt die Eingangsparameter für die FE-Simulation entgegen und übergibt relevante Parameter an ANSYS. In einer strukturmechanischen Analyse wird die Verformung des oder der Spiegel berechnet und die zugehörigen Daten (verformte Finite-Elemente-Knoten) an Matlab zurückgegeben. Im Anschluss werden die Steigungsabweichungen der Spiegeloberfläche berechnet und an SPRAY übergeben, welches den Intercept-Faktor mittels optischer Simulation berechnet.

Im Rahmen einer Masterarbeit wurde GREENIUS in den Arbeitsablauf integriert um sinnvoll und in akzeptabler Zeit Jahresertragsauswertungen durchführen zu können. Die integrative Betrachtungs- und Berechnungsweise ermöglicht das Zusammenspiel unterschiedlicher Einflussfaktoren, so dass ein Gesamtbild vom Konzentrator und auftretender Effekte (Unterstruktureinflüsse, Montagefehler, Verteilung der einfallenden Solarleistung, Absorberrohrverschiebungen, etc.) ermöglicht wurde.

Mit dem erlangten Stand der Arbeiten wurden Beispielauswertungen des Jahresertrags eines generischen Kraftwerks (basierend auf Andasol 1 in Spanien) durchgeführt. Abbildung 41 zeigt die aus der Verstellung der Montageklammern resultierenden monetären Einbußen im Jahresertrag.

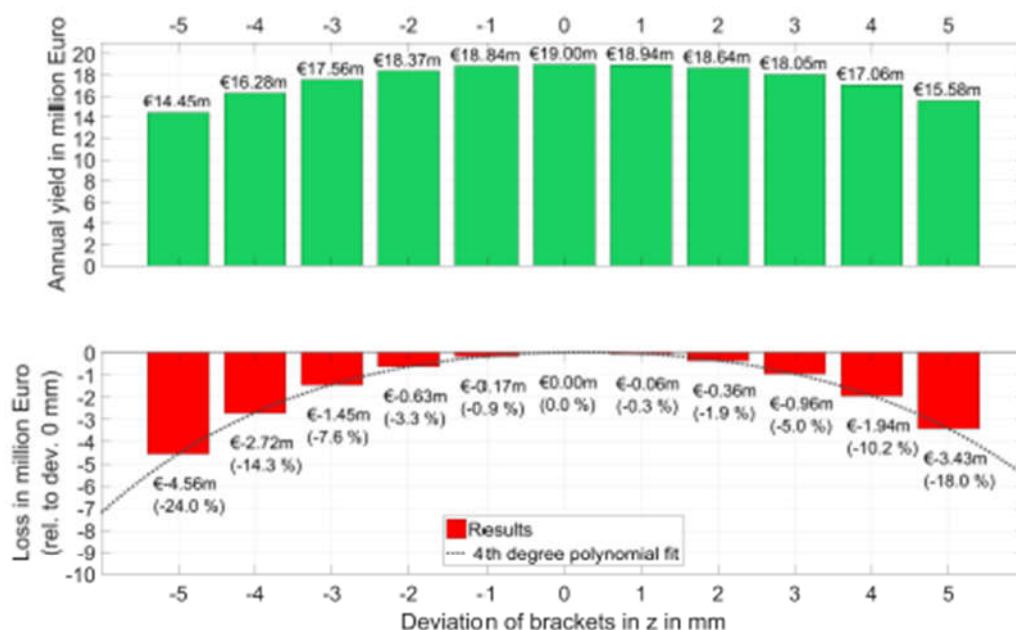


Abbildung 41: Beispielauswertung für die Jahresertragsbestimmung mit Finite Elemente Modellen. Vier von acht Montageklammern des Kollektors wurden in globaler z-Richtung zwischen -5 und +5 mm verschoben. Die Verformung der Spiegel sorgt für Ertragseinbußen.

Damit wurde die Bewertungskette von der strukturellen Verformung über die optische Performance bis hin zum Jahresertrag geschlossen. Die in diesem Unterarbeitspaket erhaltenen Ergebnisse sind in der Dissertation „Influences on Mirror Shape Accuracy and Performance Prediction for Parabolic Trough Concentrating Solar Power Systems“ (Dissertation Simon Schneider, RWTH Aachen, Fakultät für Maschinenwesen) ausführlich dargestellt.

Ausblick für zukünftige Projekte basierend auf AP 2.1

Aus dem erreichten Stand der Arbeiten zu AP 2.1 ergeben sich Folgefragestellungen, die in zukünftigen Projekten beantwortet werden sollten:

Die entwickelten Programme, Arbeitsabläufe und Modelle ermöglichen die Auswertung relevanter Parameter im Hinblick auf strukturellen Einfluss auf die Spiegelform, von der Bewertung der optischen Leistungsfähigkeit bis hin zum Einfluss auf den Jahresertrag des Kraftwerks. Hieraus erwächst die Möglichkeit einen Spiegel hinsichtlich der Qualität im Ganzen zu beurteilen. Wird hingegen nur die Formtreue der Spiegel ausgewertet, so werden eventuell Effekte nicht berücksichtigt, die erst in der Strahlverfolgung seitens anderer Kollektorteile auftreten und die Leistungsfähigkeit des Gesamtkonzentrators beeinflussen können.

Weiterhin kann der entwickelte Optimierungsablauf (mit CMA-ES/BOBYQA) genutzt werden, um den Jahresertrag eines Kraftwerks (oder den Intercept-Faktor eines Kollektorelements) zu optimieren. Hierzu können beliebige Parameter als Optimierungsgrößen definiert und ihr Wert verbessert werden. Beispielhaft kann eine initial von der idealen Parabelform abweichende Spiegelform zu einem größeren Ertrag führen. Diese kann zum Beispiel durch eine beabsichtigte Fehlmontage der Halteklammern im Falle des EuroTrough-Kollektors erreicht werden.

Die Spiegelform im Kollektor kann besser vorhergesagt werden, wenn die genannten Montagefehler der Unterstrukturelemente näher bekannt sind. Es wird vorgeschlagen mittels der QFly Messtechnik des DLR Kraftwerksspiegel zu vermessen, diese zu mitteln und anschließend eine durchschnittlich vorliegende Unterstrukturgeometrie zu definieren, welche für Vorhersagen der Spiegelform für standardisierte Messungen im Labor genutzt werden kann.

II.1. AP 2.2 Erweiterung von Industriestandards zur Glasspiegelalterung

Das Ziel des AP 2.2 war das Prüfen von Spiegelproben nach gängigen Alterungstests zur Bestimmung der Kriterien, die auf Spiegel für den Einsatz in konzentrierenden Solarsystemen anzuwenden sind. Als erwartetes Ergebnis wurde die Spezifikation der Verfahren zur Glasspiegelalterung definiert. In Zusammenarbeit mit dem spanischen AENOR Komitee AEN/CTN 206/SC 117 wurde eine Spezifikation definiert, die die Mindestanforderungen für Glasspiegel beschreibt. Zusätzlich wurde ein aggressiveres DLR-internes Testprogramm definiert, um die Haltbarkeit von Materialien unterschiedlicher Zulieferer vergleichen zu können⁹. Zu den weiteren Fortschritten zählen:

- Die Datenbasis an Degradationsanalysen für Spiegel sowohl nach Outdoor-Einsatz als auch beschleunigten Alterungstests wurde erweitert.
- Degradationsmechanismen wurden identifiziert.
- Zusätzliche Einflussfaktoren auf Glasspiegel wurden analysiert und alternative Testprozeduren angewandt.
- Die Aluminium-Reflektor Testguideline wurde veröffentlicht und Erfahrungen für Glasspiegel ausgewertet.
- Arbeit an der Standardisierung der beschleunigten Alterungstests und Analyse der Reflektoren. Publikation in der spanischen Norm UNE 206016: Reflector panels for concentrating solar technologies.
- Evaluierung der vorgeschlagenen Standardtests hinsichtlich Realitätsnähe und Fähigkeit zur Identifizierung schwacher Materialien.

Die Hauptschwierigkeit bei der Durchführung des Arbeitspaketes war die Beschaffung von Glasspiegelmaterialien von denen sowohl Proben nach längerer Außenbewitterung als auch im Neuzustand verfügbar waren. Beide sind notwendig um zum einen die natürlich auftretende Degradation zu analysieren und zum anderen beschleunigte Alterungstests durchzuführen. Bei Glasspiegeln sind dabei relativ lange Expositionsdauern notwendig, ein Minimum von 5-10 Jahren ist dabei wünschenswert, da Glasspiegel in der Regel sehr beständig sind und in den ersten Jahren nur wenig Degradation aufweisen. Als Ergebnis des Alumir-Projektes wurde eine Guideline zur beschleunigten Alterung von Aluminiumspiegeln entwickelt und veröffentlicht¹⁰. Der Vorteil bei der Entwicklung war hier, dass Aluminiumspiegel in der Regel deutlich schneller Degradation aufweisen.

⁹ Heller, P. et al: The Performance of Concentrated Solar Power (CSP) Systems, Woodhead ISBN: 978-0-08-100447-0, 2017: Kapitel 6, Tabelle 6.4

¹⁰ Sutter, F.; Wette, J.; Fernández-García, A.; Ziegler, S.; Dasbach, R. (2016): *Accelerated aging testing of aluminum reflectors for concentrated solar power. Version 1.1.*; SolarPACES Guideline; SolarPACES: Almería, Spain, August 2016

Die Glasspiegelmateriale, auf die im Zuge des Projektes zurückgegriffen wurde, waren die folgenden:

- Material aus Kraftwerken, das mehrere Jahre im Einsatz war. Material im Neuzustand war hier nicht vorhanden und beschleunigte Alterungstest konnten nicht durchgeführt werden. Ergebnisse sind vertraulich und können nicht veröffentlicht werden, waren aber trotzdem wichtig für die Identifizierung von Degradationsmechanismen.
- Proben, die an eigenen Standorten exponiert wurden. Die Expositionsdauer ist hier relativ kurz (< 3Jahre). Diese wurden auch in beschleunigten Versuchen getestet.
- Facetten aus einem Demonstrationskraftwerk in Abu Dhabi. Hierbei handelt es sich um Reflektormaterial des japanischen Herstellers Nishio, mit dem bisher keine Erfahrung besteht. Es war stark degradiertes Material nach 7 Jahren Außenbewitterung vorhanden und zusätzlich Material, das sich während dieser Zeit geschützt in einem Lagerhaus befand.

Aluminiumreflektor Test-Guideline (aus dem Alumir-Projekt):

Das Alumir-Projekt wurde während des QUARZ-Zert-Projektes abgeschlossen. Das Ziel des Projektes war die Entwicklung eines geeigneten Verfahrens zur künstlichen Alterung von Aluminiumreflektoren und zur frühzeitigen Beurteilung der Lebensdauer der Materialien. Die Adaption der entwickelten Prozedur für Glasspiegel wurde in QUARZ-Zert untersucht. Ein Überblick über die Prozedur für die Aluminiumspiegel ist in Abbildung 42 dargestellt. Die Prozedur umfasst einen ersten langen CASS-Test um Lochfraß-Korrosion auszulösen. Der zweite Schritt ist ein Sand-Abrasionstest, der die Reflektorschutzschichten schädigt und so Angriffsstellen für Korrosion erzeugt. Ein zweiter kürzerer CASS-Test ruft dann Korrosion in der reflektierenden Al-Schicht hervor. Der letzte Schritt ist ein zyklischer UV- und Feuchtigkeitstest, der charakteristisches Micropitting (zahlreicher Lochfraß im Mikrometerbereich) im Material hervorruft.

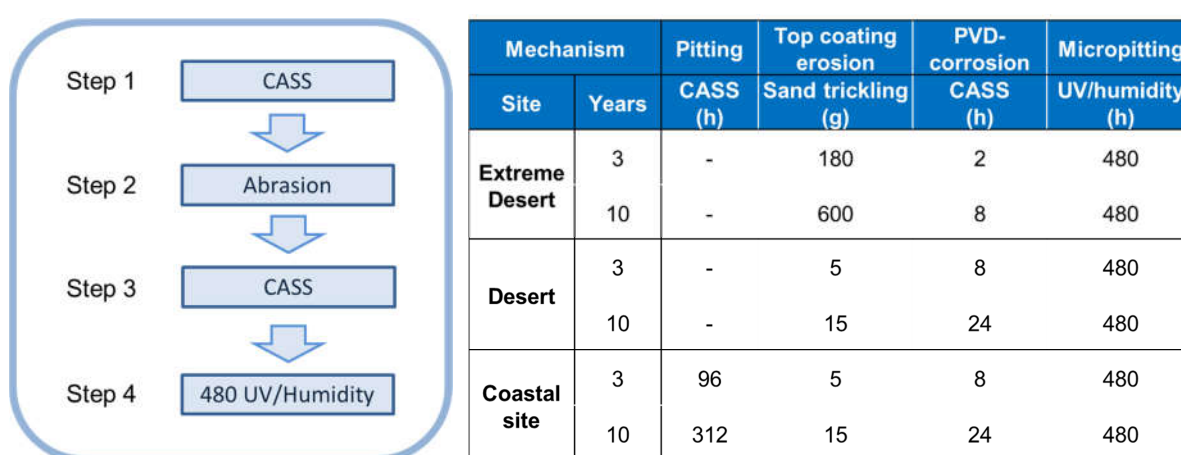


Abbildung 42: Testprozedur Alumir mit Bedingungen für verschiedene Standorttypen und Expositionsdauer

Im Laufe des QUARZ-Zert Projektes hat sich herausgestellt, dass die Degradationsmechanismen von Aluminium- und Glasspiegeln grundlegend unterschiedlich sind und somit die in Alumir

entwickelte Testprozedur nicht auf Glasspiegel übertragen werden kann. Auch die Anwendung der in Alumir entwickelten Methodik zur Ableitung von Korrelationen zwischen beschleunigter Alterung und Außenbewitterung (siehe Abbildung 43) gestaltete sich als schwierig, da für Glasspiegel eine längere Außenbewitterungsdauer als 3 Jahre benötigt wird, um erste Degradationserscheinungen analysieren zu können. Aufgrund dessen wurde ein pragmatischer Ansatz in QUARZ-Zert verfolgt, bei dem gängige Alterungstests, die typischerweise von der Industrie durchgeführt werden und mittlerweile durch UNE standardisiert wurden, hinsichtlich ihrer Wirksamkeit untersucht wurden (siehe untere Abschnitte).

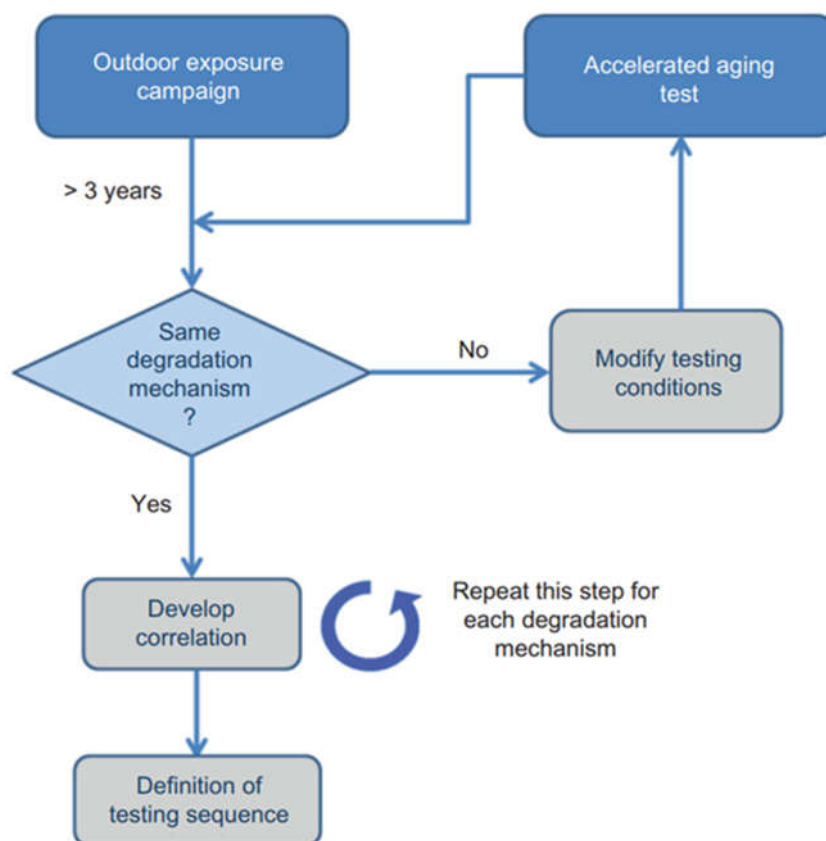


Abbildung 43: Methodik zur Ableitung von Korrelationen zwischen Außenbewitterung und beschleunigter Alterung im Labor.

Degradationsmechanismen an Glasspiegeln:

Die Analyse von Glasspiegelmaterial aus dem Außeneinsatz führte zur Identifikation von vier Hauptdegradationsmechanismen:

1. Korrosion Silberschicht
2. Kantenkorrosion Silberschicht
3. Abrasion Glasvorderseite
4. Glaskorrosion

Dies basiert vor allem auf der Auswertung der Proben, die an den marokkanischen Standorten exponiert waren sowie von Material aus den kommerziellen Kraftwerken. Beiden Arten der

Silberschichtkorrosion liegt derselbe Mechanismus zur Grunde. Die reine Silberschicht (Dicke ca. 100 nm) löst sich auf, was vor allem durch Vorhandensein von Feuchte und Chloriden begünstigt wird. Die rückseitige Beschichtung der Glasspiegel besteht aus einer Schicht Kupfer und in der Regel drei verschiedenen Lacken. Das Schichtsystem hat den Schutz der Silberschicht zur Aufgabe. Korrosion entsteht vor allem dort, wo direkter Kontakt der Silberschicht zur Atmosphäre besteht. Dies ist an den Kanten der Fall, wenn diese nicht extra geschützt sind und auch an Defekten der Schutzlacke. Kantenkorrosion tritt deshalb vor allem an kleinen Proben auf, die aus kompletten Facetten geschnitten wurden und deshalb genau diesen Kantenschutz nicht besitzen. In extremen Fällen kann sich auch großflächig der gesamte Schichtaufbau vom Glassubtrat lösen wenn die Haftung durch die Silberschicht verlorengegangen ist.

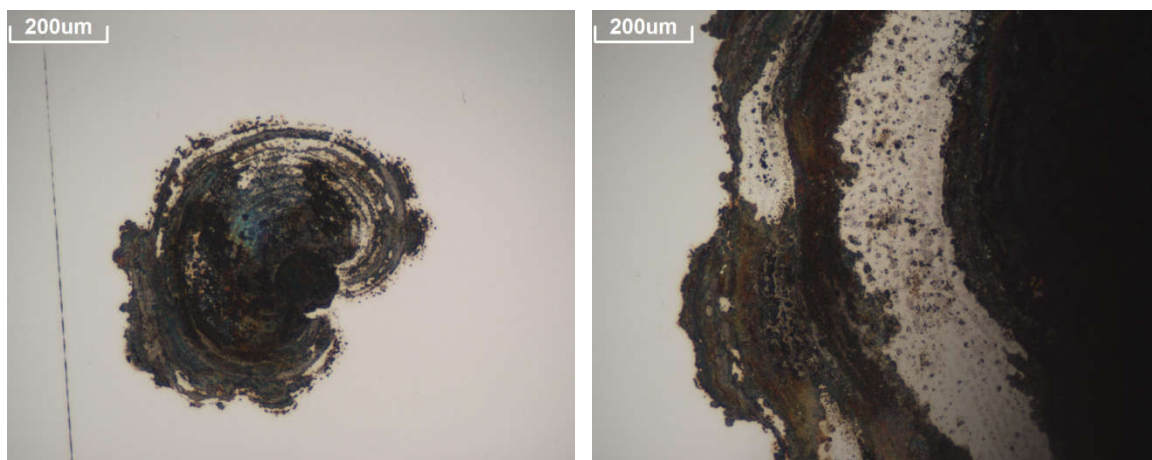


Abbildung 44: links: Korrosionsfleck, rechts: Kantenkorrosion

Abrasion auf der Glasvorderseite tritt vor allem an extremen Wüstenstandorten auf. Dabei handelt sich um mechanische Defekte, verursacht durch von der Luft mitgetragene Staub- und Sandpartikel. Bei der Exposition von Spiegelproben an solchen Standorten wurden teilweise starke Veränderungen des Reflexionsgrades nach wenigen Jahren festgestellt. Bei Aluminiumspiegeln hatten diese Defekte zusätzlich einen negativen Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit. Dieser Effekt konnte für Glasspiegel noch nicht beobachtet werden. Dies liegt vor allem daran, dass sowohl die Glasseite als auch die Lacke auf der Rückseite einen besseren Schutz der Reflektorschicht darstellen als die recht dünne Schutzschicht der Aluminiumspiegel.

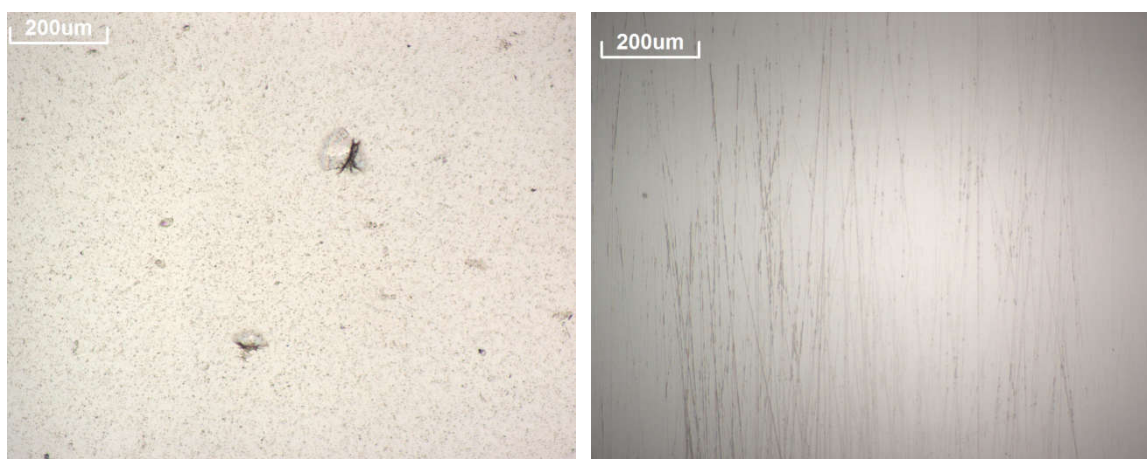


Abbildung 45: links: Abrasiondefekte auf der Glasoberfläche, rechts: Glaskorrosion

Glaskorrosion ist eine Degradation, die durch hohe Feuchte hervorgerufen wird. Dieser Defekt tritt vor allem bei beschleunigten Alterungstests auf, wenn hohe Feuchte und lange Expositionsdauern Teil der Versuchsbedingungen sind. Zusätzlich hängt das Auftreten auch von der Position der Proben in der Kammer ab (z.B. sind Glasproben, die mit der Glasseite nach unten zeigen stärker gefährdet). Die Glaskorrosion wurde bisher nur in wenigen Ausnahmefällen nach der natürlichen Exposition an Standorten festgestellt, z.B. lokal in der Nähe von Kühltürmen von Kraftwerken, wo die Feuchte extrem hoch ist.

Outdoordaten

In Tabelle 5 sind Analysen von den Proben zusammengefasst, die an verschiedenen marokkanischen Standorten exponiert waren und im Anschluss im Labor untersucht wurden. Dargestellt sind Typ des Spiegels, Expositionsort und –dauer sowie der Verlust des solargewichteten hemisphärischen, η_h (SW, 8°, h) und des gerichteten, η_s (660nm, 15°, 12.5mrad), Reflexionsgrades und schließlich auch die detektierten Degradationsmechanismen.

Tabelle 5: Analyseergebnis Degradation von Proben an marokkanischen Standorten

Probe	Ort	Expositionsdauer (Monate)	Material	$\Delta\rho_h(\text{SW},8^\circ, \text{h})$ (%)	$\Delta\rho_s(660\text{nm},15^\circ, 12.5\text{mrad})$ (%)	Degradation
1	Erfoud	20	Dickglas	0,5	2,3	Abrasion, minimale Kantenkorrosion
2	Erfoud	20	Dickglas	0,6	1,8	Abrasion, minimale Kantenkorrosion
3	Erfoud	26	Dünnglas	0,6	3,6	Abrasion, minimale Kantenkorrosion
4	Missour	12	Dickglas	0	-0,2	
5	Missour	26	Dünnglas	-0,1	0,8	
6	Missour	12	Dickglas	-0,1	0,4	
7	Tan Tan	12	Dickglas	0	0,3	Korrosionsflecken, starke Kantenkorrosion
8	Zagora	20	Dünnglas	0,4	5,9	starke Abrasion, minimale Kantenkorrosion
9	Zagora	20	Dünnglas	0,3	4,9	starke Abrasion, minimale Kantenkorrosion
10	Zagora	26	Dickglas	0,8	10,8	starke Abrasion, minimale Kantenkorrosion
11	Zagora	36	Dünnglas		6,8	starke Abrasion, minimale Kantenkorrosion
12	Zagora	42	Dünnglas	0,6	4,9	starke Abrasion, minimale Kantenkorrosion

Bei einigen Proben ist ein Anstieg des Reflexionsgrades nach Exposition zu sehen. Dieser ist minimal und übersteigt 0,2 % nicht, was innerhalb der Messungenauigkeit liegt und somit als nichtig betrachtet wird.

Ein deutlicher Abfall des Reflexionsgrades wird vor allem dort detektiert, wo Abrasion auftritt. An den Standorten Erfoud und speziell Zagora ist der Verlust nicht zu vernachlässigen. Auf der anderen Seite ist der Verlust am Standort Tan Tan, der sehr aggressiv ist und zu deutlicher Korrosion führt, minimal. Dies liegt daran, dass die Korrosion vor allem am Rand und sonst nur punktuell auftritt und deshalb bei den Reflexionsgradmessungen noch nicht ins Gewicht fällt. Der maximal gemessene Verlust des gerichteten Reflexionsgrades beträgt 10,8 % nach 26 Monaten Exposition am Standort Zagora.

Es wurden noch keine weiteren Proben von den Standorten zurückgeholt, da es wichtiger erscheint, Daten von längeren Expositionsdauern und somit deutlich umfangreicherer Degradation zu erhalten. Zusätzlich wurde im Zuge des EU Horizon 2020 Projektes Raiselife damit begonnen weitere Materialproben zu exponieren. Dabei handelt es sich um Glasspiegel

mit unterschiedlichen Rückseitenlacken, inklusive reduzierten Systemen (Anzahl und Dicke der Schichten) was zu einer schnelleren Degradation führen soll.

Beschleunigte Labor-Alterungstests

Die Tabelle 6 zeigt einen Überblick über Ergebnisse aus den beschleunigten Alterungstests. Die detaillierte Tabelle ist sehr umfangreich und enthält zusätzlich die Information zu den detektierten Degradationsmechanismen aufgeschlüsselt für die einzelnen getesteten Materialien.

Tabelle 6: Detektierte Degradation in Standardalterungstests

Test	Konditionen	Dauer (h)	Korrosion	Weitere Effekte
NSS	ISO9227	3000	Glaskorrosion, kleine bis mittlere Punktkorrosion, Kantenkorrosion	-
CASS	ISO9227	480	Kanten- und Punktkorrosion	-
Damp Heat	IEC 62108 65°C 85%r.H.	2000	Kanten-, Punkt- und Glaskorrosion	-
UV/Water	ISO16474-3	2000	Kanten-, Punkt- und Glaskorrosion	Lackdegradation, chalking
Thermal Cycling	IEC 62108 (Test 10.6 TCA3) 150 cycles - 40 to 65°C	275h	-	Lackrisse an ungeschützten Kanten
Thermal Cycling +NSS	Testsequenz	275h+3000h	Kantenkorrosion, stärker an Kante mit Riss, Punkt- und Glaskorrosion	-
Thermal Cycling + Damp Heat	Testsequenz	275h+2000h	Kanten- und Punktkorrosion, Farbveränderung Silber	-
Dust storm	500 mg/m ³ ; 6,8 m/s; 7 cycles 2 min	14 min	-	Oberflächendefekte

UV-Spray

Im Zuge des Projektes wurde eine Alterungskammer angeschafft mit der zyklische UV/Feuchte-Tests durchgeführt werden können. Die gebräuchlichste Norm ist hier die EN ISO 16474-3. Diese beinhaltet besonders zwei Varianten, die sich darin unterscheiden wie die Proben befeuchtet werden. Bei der Standardvariante wird im Kammerinnern die Luft auf 50°C erhitzt und mit Feuchte übersättigt. Da die Proben an der äußeren Kammerwand angebracht sind und im Kontakt mit der kälteren Umgebungsluft stehen, kondensiert auf der Innenseite das Wasser. Die neu angeschaffte Kammer ist in der Lage, auch die zweite Variante durchzuführen, bei der die Kondensation durch ein direktes Besprühen der Proben mit Wasser ersetzt wird.

Hauptziel der Durchführung der folgenden Versuche war zu testen ob beide Varianten äquivalent eingesetzt werden können. Als Materialien wurden für den Test ein Glasspiegel eines Herstellers gewählt bei dem in der Vergangenheit Degradation in diesem Test auftrat, sowie Aluminiumspiegel, die auch Degradation in dem Test zeigten.

Es wurden zwei Proben eines Aluminiumspiegelmaterials (B_UVS) in dem Versuch mit Spray getestet, sowie vier Proben eines 4 mm Glasspiegels. Von den Glasspiegelproben wurden zwei mit der Vorderseite (G_UVS) und zwei mit der Rückseite (G_UVS2) Richtung Kammerinneres getestet. Vom Glasspiegelmaterial wurden Proben genauso noch in der Variante mit Kondensation getestet (G_UVH und G_UVH2). Von dem Aluminiummaterial existierten bereits Ergebnisse für diese Variante. In der Tabelle 7 sind die Veränderungen des Reflexionsgrades nach Test dargestellt. Es wurde dabei über die Werte für die jeweils zwei gleich platzierten Proben gemittelt.

Tabelle 7: Reflexionsgradveränderungen der verschiedenen Materialien nach Test mit Spray

Sample	Measured reflectance difference			
	$\rho_{s,h}([280,2500],8^\circ,h)$		$\rho_{\lambda,\varphi}(660nm,15^\circ,12.5\ mrad)$	
B_UVS	-0,003	± 0,000	-0,010	± 0,009
G_UVS	-0,002	± 0,000	-0,002	± 0,002
G_UVS2	0,001	± 0,000	-0,001	± 0,001
B_UVH	-	-	0,000	± 0,000
G_UVH	-0,001	± 0,000	-0,001	± 0,002
G_UVH2	0,001	± 0,000	0,000	± 0,001

Bei den Glasspiegeln trat in beiden Testvarianten keinerlei Veränderung auf. Die Reflexionsgrade sinken zum Teil minimal, bewegen sich dabei aber noch im Rahmen der Messungenauigkeit. Auch unter dem Mikroskop sind keine Veränderungen detektiert worden.

Bei den Aluminiumspiegeln kommt es zu einem geringen Abfall des Reflexionsgrades, 0,003 für den solargewichteten hemisphärischen und 0,010 für den gerichteten Wert. Bei dem im Voraus durchgeführten Versuch mit Kondensation blieb der Reflexionsgrad stabil (B_UVH, hier lagen keine Werte des hemisphärischen Reflexionsgrad vor).

Eine weitere Möglichkeit die Degradation zu vergleichen ist die Untersuchung des sogenannten Micropittings. Dabei handelt es sich um eine punktförmige Korrosion der Aluminiumreflexionsschicht im Mikrometerbereich, die sich in der Regel auf der gesamten Oberfläche ausbreitet. Dieser Mechanismus tritt nur bei bestimmten Aluminiummaterialien auf und der UV/Kondensationstest ist einer der Wenigen die diesen provozieren.

In Abbildung 46 sind Mikroskopaufnahmen des untersuchten Materials nach beiden Varianten zu sehen. Man sieht, dass die Defekte bei der Variante mit Kondensation zwar kleiner aber deutlich dichter verteilt sind.

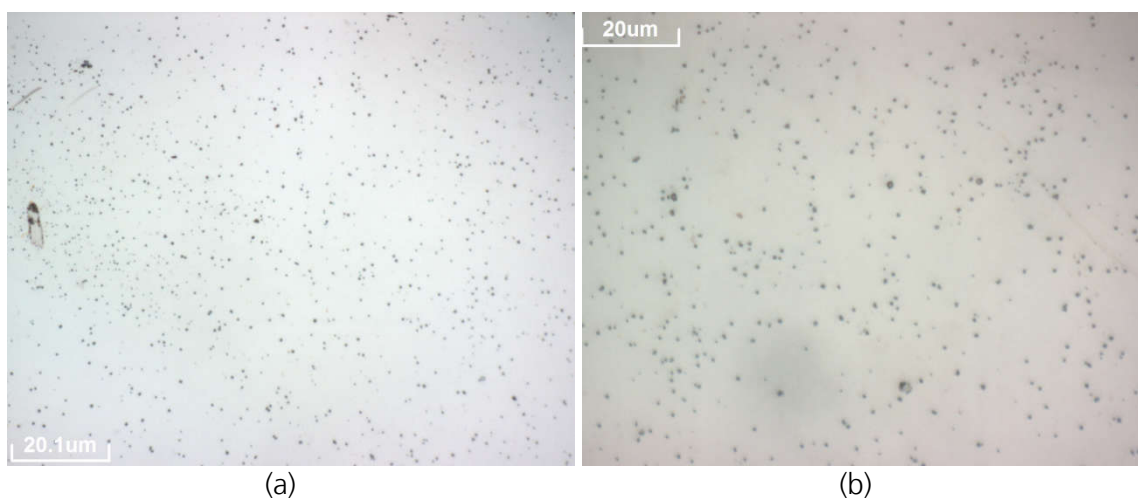


Abbildung 46: Mikropittings nach 1000 h (a) UV/Kondensation und (b) UV/Spray

Dies zeigt sich auch bei der Auswertung der Probe mit einer Software. Dabei wurden Mikroskopbilder gemacht wie in Abbildung 46. Pro Probe und Messzeitpunkt wurden 5 bis 10 Aufnahmen gemacht, die Micropitting-Anzahl wurde bestimmt und in eine Dichte an Punkten pro Fläche umgerechnet. Die Auswertung für beide Varianten ist in Abbildung 47 zu sehen. In beiden Varianten kommt es zu einer Stabilisierung der Dichte, bei der Variante mit Spray jedoch auf einem deutlich niedrigeren Niveau.

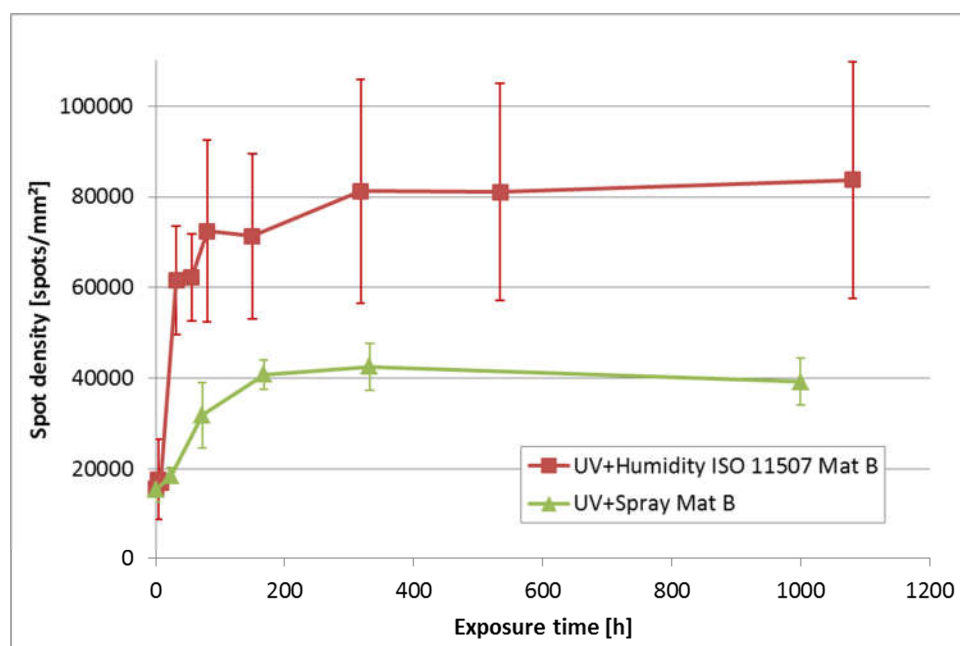


Abbildung 47: Evolution der Micropittingdichte in den Versuchen UV/Kondensation und UV/Spray

Es bleibt festzuhalten, dass der UV/Spray Versuch einen ähnlichen Effekt hat wie die Variante mit Kondensation. Nur bei den Aluminiumspiegeln sind deutliche Unterschiede im Ausmaß des auftretenden Lochfraß im Mikrometerbereich zu sehen. Wünschenswert wäre es ähnliche Effekte auch noch bei Glasspiegeln nachzuweisen.

Kombination von Sandabration und korrosiver Atmosphäre

Ein zusätzlicher beschleunigter Test bestand aus der Kombination von Abrasions- und Korrosionstests. Hintergrund ist, dass Erfahrungen aus dem Alumir-Projekt zeigen, dass eine mechanische Beschädigung der Reflektorschutzschichten durch Abrasion zu verstärkter Korrosionsbildung führen kann. Deshalb wurden verschiedene Kombinationen getestet. Es wurden zwei Standard-Glasspiegelmaterialien ausgewählt (Glasdicke 2 mm und 4 mm) und einem einfachen Abrasionstest unterzogen. Dieser bestand aus der Exposition in einem Fallrohr in dem eine definierte Menge Sand aus einer definierten Höhe auf die Probenoberfläche rieselt. Dieser Versuch beruht auf der DIN52348 und wurde mit zwei verschiedenen Sandmengen durchgeführt. Es handelte es sich dabei um 100 beziehungsweise 500 g Arizona Test Dust (SiO_2) mit einer Partikelgröße zwischen 300 und 650 μm . Diese Bedingungen sind aggressiv und im Feld nicht zu erwarten. Getestet wurde hier die Probenrückseite, da Beschädigungen hier oft mit Korrosion in der Silberschicht einhergehen, während die Glasseite chemisch und mechanisch sehr stabil ist. Die so belasteten Proben kamen im Anschluss, zusammen mit vorher unbelasteten Referenzproben, in den NSS- und den CASS-Test. Die Proben wurden in Abständen von ca. 120 h optisch kontrolliert und nach 550 h (NSS) bzw. 480 h (CASS) endgültig aus den Kammern genommen. Das Ergebnis der Tests ist, dass die Abrasion keinen detektierbaren Einfluss auf die Korrosion hat. Im NSS-Test kommt es praktisch zu keiner Korrosionsentwicklung, abgesehen von schwacher Kantenkorrosion. Im CASS-Test entwickelt sich bei den Dickglasspiegeln starke Kantenkorrosion sowie einige große Korrosionsflecken. Dies ist jedoch sowohl bei den Proben der Fall die vorher im Abrasionstest waren, als auch bei den Referenzproben. Die Dünnglasspiegel zeigen so gut wie keine Veränderung. Es wurden im Anschluss verschiedene Abrasionsdefekte auf der Rückseite untersucht. Analysen mit einem Konfokalmikroskop ergaben Tiefen der Defekte von maximal 5-8 μm , infolge der auftreffenden Sandpartikel. Dies ist bei einer Gesamtdicke des Schutzschichtsystems von über 100 μm offensichtlich nicht tief genug um einen Einfluss auf die Korrosion zu haben.



Abbildung 48: Korrosion auf Dickglasspiegel nach 480 h CASS, links mit Abrasion, rechts ohne Abrasion

UNE 206016:2018 Standard

In der spanischen Normungsagentur AENOR wurde eine Norm erarbeitet und veröffentlicht¹¹. Das DLR arbeitete an dem Normentwurf aktiv mit. Dieser enthält unter anderem eine Serie von Alterungstests mit zugehörigen Parametern und Dauern. Dabei handelt es sich um Standardalterungstest, die aus anderen Industriebereichen übernommen wurden und bereits heutzutage zu den gängigsten Tests für Solarspiegel gehören. Siehe für die Tests mit Dauern und Parametern Tabelle 8.

Tabelle 8: Tests mit Parametern und Dauern nach UNE 206016:18

Test	Duration	Summary of testing conditions
Neutral Salt Spray (NSS) ISO 9227	480 h	T: 35°C, pH: 6.5 to 7.2 at 25°C Sprayed NaCl solution of 50 ± 5 g/l with condensation rate of 1.5 ± 0.5 ml/h on a surface of 80 cm ²
Copper-accelerated acetic acid salt spray (CASS) ISO 9227	120 h	T: 50°C, pH: 3.1 to 3.3 at 25°C Sprayed NaCl solution of 50 ± 5 g/l and 0.26 ± 0.02 g/l CuCl ₂ Condensation rate of 1.5 ± 0.5 ml/h on a surface of 80 cm ²
Condensation ISO 6270-2	480 h	T: 40±3°C RH: 100%
Combined thermal cycling and humidity	10 cycles	4 h at 85°C, 4 h at -40°C, Method A: 16 h at T: 40°C and 97±3% RH, Method B: 16 h at T: 85°C and 85±3% RH or 40 h at T: 65°C and 85±3% RH
UV/Humidity ISO 16474-3	2000 h	1 cycle: 4h at UV exposure at 60±3°C followed by 4h at 100% RH at 50±3°C

Analyse Reflektormaterial Masdar

Es ist letztlich gelungen, ein Reflektor-Material zu bekommen, das sich beim Einsatz im Feld als anfällig für Degradation und damit relativ schwach erwiesen hat. Von dem Material sind gleichzeitig Proben im Neuzustand vorhanden. Auf der Masdar Institute Solar Platform (MISP) in Abu Dhabi waren die Spiegelproben in Heliostaten eines experimentellen Beam-Down Tower Systems im Einsatz. Die Facetten des Herstellers Nishio Glass waren für ca. 7 Jahre an dem Standort exponiert und gleichzeitig wurde eine kleine Anzahl an Facetten in einem Lagerhaus geschützt vor aggressiven Umwelteinflüssen gelagert. Bei dem Material handelt es sich um einen Dickglasspiegel. Die Glasdicke beträgt 5 mm und die Silberschicht ist durch mehrere Rückseitenlacke geschützt. Der Aufbau dieser Schichtstruktur unterscheidet sich etwas von den meisten kommerziellen Solarspiegeln. Hauptunterschiede sind vor allem das Fehlen einer Kupferschicht, die normalerweise als Opferanode und zugleich als Barriere gegen die UV-Strahlung fungiert. Außerdem ist die äußerste Schicht, die bei den meisten kommerziellen Produkten von einem weißen Outdoor-Lack gebildet wird in diesem Fall ein transparentes Kunstharz das diese Funktion erfüllen soll.

¹¹ UNE 206016:2018, Reflector panels for concentrating solar technologies

Nach sieben Jahre im Feldeinsatz zeigen alle Facetten Degradationserscheinungen. Bei vielen dieser Facetten ist diese Degradation recht stark ausgeprägt und betrifft erhebliche Teile der Oberfläche. In Abbildung 49 ist die Facette zu sehen die im Labor analysiert wurde.

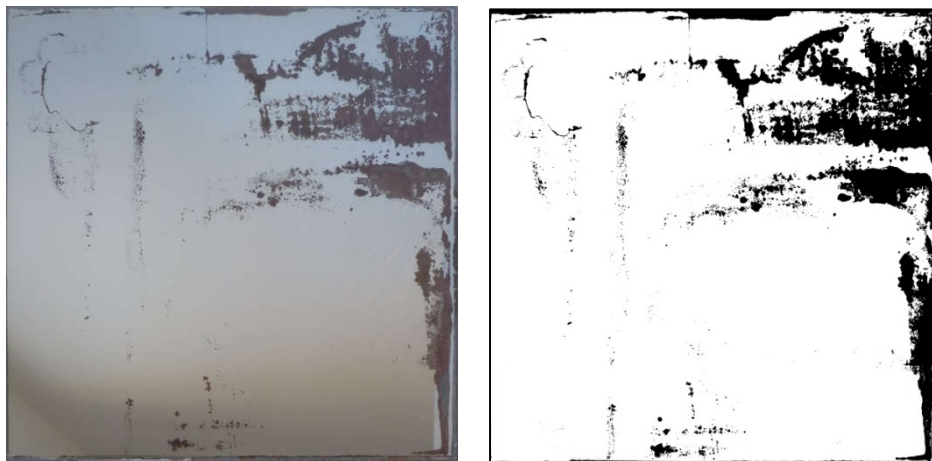


Abbildung 49: Facette nach sieben Jahren Outdoor-Einsatz, Auswertung des degradierten Flächenanteils

Da zurzeit kein System existiert mit dem die Charakterisierung der größeren Oberflächen möglich ist, wird auf eine Kombination von verschiedenen Systemen zurückgegriffen. Zuerst wird ein Foto gemacht von der degradierten Facette vor einem einheitlichen weißen Hintergrund. Dieses Foto wird mit einer Bildbearbeitungssoftware analysiert. Es wird ein Helligkeitsschwellwert definiert und so der degradierte vom nicht degradierten Bereich getrennt. In der Abbildung 49 ist rechts das Ergebnis zu sehen. Bei der betreffenden Facette ergibt sich ein betroffener Flächenanteil von 14,1 %. Der gerichtete Reflexionsgrad wird mit dem Devices & Services Reflektormeter (D&S) gemessen. Es werden Messungen im degradierten sowie im nicht-degradierten Bereich gemacht. Dabei wird versucht in Bereichen zu messen, die entweder vollständig oder gar nicht degradiert sind. Diese Messungen sind gerade im degradierten Bereich mit relativ großen Unsicherheiten verbunden, da die Entscheidung ob der Bereich degradiert ist subjektiv ist und vom jeweiligen Durchführenden abhängt. Die nicht degradierten Bereiche sind nicht so kritisch da diese relativ groß und zusammenhängend sind. Im nicht degradierten Bereich werden 13 Messungen gemacht. Der Mittelwert dieser Messungen ergibt einen Wert von 0,838 mit einer Standardabweichung von 0,003. Die sieben Messwerte im degradierten Bereich ergeben einen Mittelwert von 0,103 mit einer Standardabweichung von 0,049. Hier schwanken die Werte sehr stark zwischen 0,055 und 0,198.

Der mittlere Reflexionsgrad der Facette kann jetzt abgeschätzt werden in dem diese Werte mit ihrem jeweiligen Flächenanteil gewichtet werden:

$$\rho_{tot} = a_{non} * \rho_{non} + a_{deg} * \rho_{deg} = 0,859 * 0,838 + 0,141 * 0,103 = 0,734$$

Der Reflexionsgrad der Facette die sich im Lagerhaus befand beträgt 0,846 mit einer Standardabweichung von 0,001. Der Verlust des Reflexionsgrades beträgt damit im Schnitt 0,112. Die anderen Facetten im Außeneinsatz wurden nicht detailliert analysiert. Vergleicht man Fotos dieser Facetten sieht man deutlich, dass das Ausmaß der Degradation auf den Facetten sehr unterschiedlich ist. Siehe hierzu Abbildung 50.



Abbildung 50: Auswahl an Facetten nach sieben Jahren Outdoor-Einsatz

Die Tests, die in UNE 206016:2018 vorgeschlagen wurden, wurden jetzt mit Proben durchgeführt, die aus einer der Facetten geschnitten wurden, die im Lagerhaus gelagert waren. Da das Material nach erster oberflächlicher Analyse als nicht sehr beständig angesehen wurde, wurde bereits nach wenigen Stunden eine erste oberflächliche Sichtung der Proben vorgenommen, besonders bei dem sehr aggressiven CASS Test. Da die Proben keine offensichtliche Degradation zeigten, wurden die Tests nach Normvorschlag weitergeführt. Auch nach Abschluss der Testdauern wurde keine auffällige Degradation detektiert. Tests bei denen eine deutliche Degradation erwartet wurde, wurden auch deutlich länger als in der Norm vorgeschlagen durchgeführt. In Tabelle 9 sind die Verluste der Reflexionsgrade der Proben nach den jeweiligen Testdauern dargestellt.

Tabelle 9: Veränderung der Reflexionsgrade nach den jeweiligen Testdauern

Test	Duration (h)	$\rho_{s,h}([280,2500]nm,8^\circ,h)$	$\rho_{\lambda,\varphi}(660nm,15^\circ, 12.5mrad)$
NSS	480	-0,004	-0,010
	1000	-0,004	-0,014
	1550	-0,007	-0,034
	2000	-0,001	-0,045
CASS	120	-0,001	-0,002
	480	-0,001	0,000
Condensation	480	-0,001	-0,003
	1000	-0,001	-0,001
	2000	-0,001	-0,002
Thermocycles	10 cycles	-0,001	-0,001
UV-Humidity	2000	0,003	0,000
	3000	0,002	0,002

Wichtigstes Ergebnis der Testreihe ist, dass nach Abschluss der Norm-Tests, und auch nach zum Teil deutlich längeren Testdauern, keine nennenswerte Degradation erzeugt wird. Ausnahmen sind hier zwei: zum einen kommt es im NSS Test zu einem recht starken Abfall des Reflexionsgrades. Dies liegt jedoch ausschließlich an der auftretenden Glasskorrosion. Die zweite Ausnahme ist der UV/Feuchte Test. Hier kommt es bei der Probe, die mit der Rückseite ins Kammerinnere zeigte, zu einer deutlichen Veränderung der Rückseite. Siehe hierfür Abbildung 51. In (a) ist die Probe zu sehen, die mit der Vorderseite (Glas) in Richtung Kammerinneres zeigte nach 3000 h Test. Hier trat keine sichtbare Veränderung auf und das Bild entspricht dem Ausgangszustand. (b) und (c) zeigen die Probe, die mit der Rückseite Richtung Kammer orientiert war nach 350 bzw. 3000 h. Eine deutliche Veränderung der Oberfläche ist sichtbar.

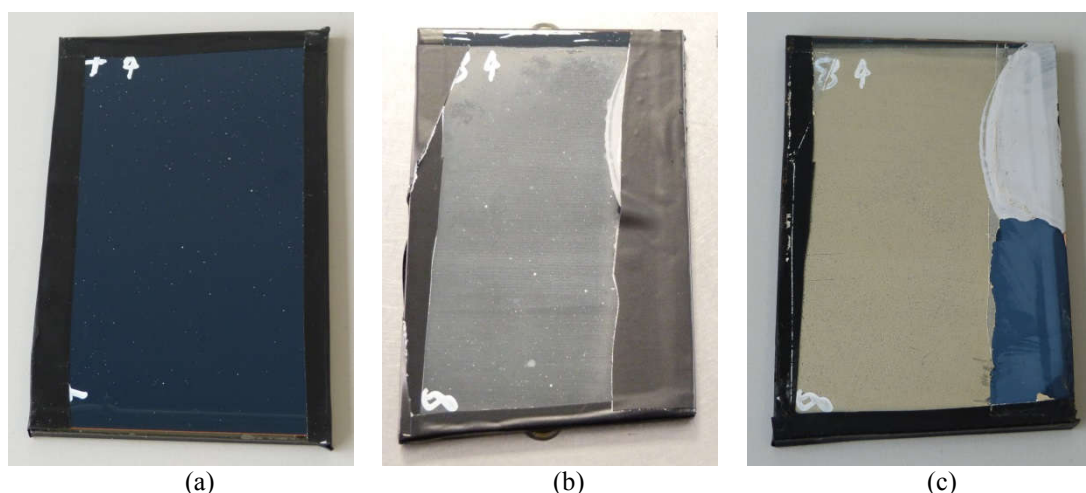


Abbildung 51: Rückseiten der Proben nach UV/Humidity, (a) nach 3000 h Rückseite nach außen, (b) 350 h Rückseite nach innen und (c) nach 3000 h

Die Auswertung der Tests macht deutlich, dass der UNE Standard zwar ein erster wichtiger Schritt in Richtung Standardisierung von beschleunigten Alterungstests für Solarspiegel ist, im konkreten Fall jedoch nicht in der Lage ist, ein offensichtlich minderwertiges Material als solches zu identifizieren. Die detaillierten Ergebnisse dieser Versuche werden in einer Veröffentlichung auf der SolarPACES 2017 vorgestellt¹².

Es gibt mehrere Möglichkeiten um eine realistischere standardisierte Testprozedur zu entwickeln, die Wahl aggressiverer Testparameter, die weitere Erhöhung der Testdauern sowie die Kombination von einer größeren Anzahl von Belastungsfaktoren. An allen diesen Möglichkeiten wird in Zukunft weiter gearbeitet.

Eine erste Testreihe zur Kombination von Faktoren wurde bereits gestartet. Offensichtlichste Möglichkeit war hier, den UV/Feuchte Test der sich als schädigend für die Rückseite herausgestellt hat, mit einem Korrosionstest (NSS oder CASS) zu kombinieren. Andere komplexere vor allem zyklische Tests sollen auch durchgeführt werden. Der erste Ansatz zeigte erste vielversprechende Ergebnisse. Nach Durchführung eines Kombinationstests aus 1000 h UV/Humidity gefolgt von 240 h CASS, zeigte sich neben der Schädigung der Rückseiten Schutzschichten auch die Entwicklung von Korrosion in der Silberschicht. Die Korrosion trat vor allem in Randbereichen auf, die im ersten Test der Feuchte und Strahlung ausgesetzt waren, sowie an Stellen wo die Rückseite augenscheinlich stärker beschädigt wurde. In Abbildung 52 sind Fotos der Probenvorder- sowie Rückseite dargestellt auf denen die Degradation deutlich zu sehen ist.

¹² Wette, J.; Sutter, F.; Fernández-García, A.; Lahlou, R.; Armstrong, P. (2018): *Standardizing Accelerated Aging Testing Conditions for Silvered-Glass Reflectors*; SolarPACES 2017, AIP Conference Proceedings 2033, 230014 (2018); doi: 10.1063/1.5067242

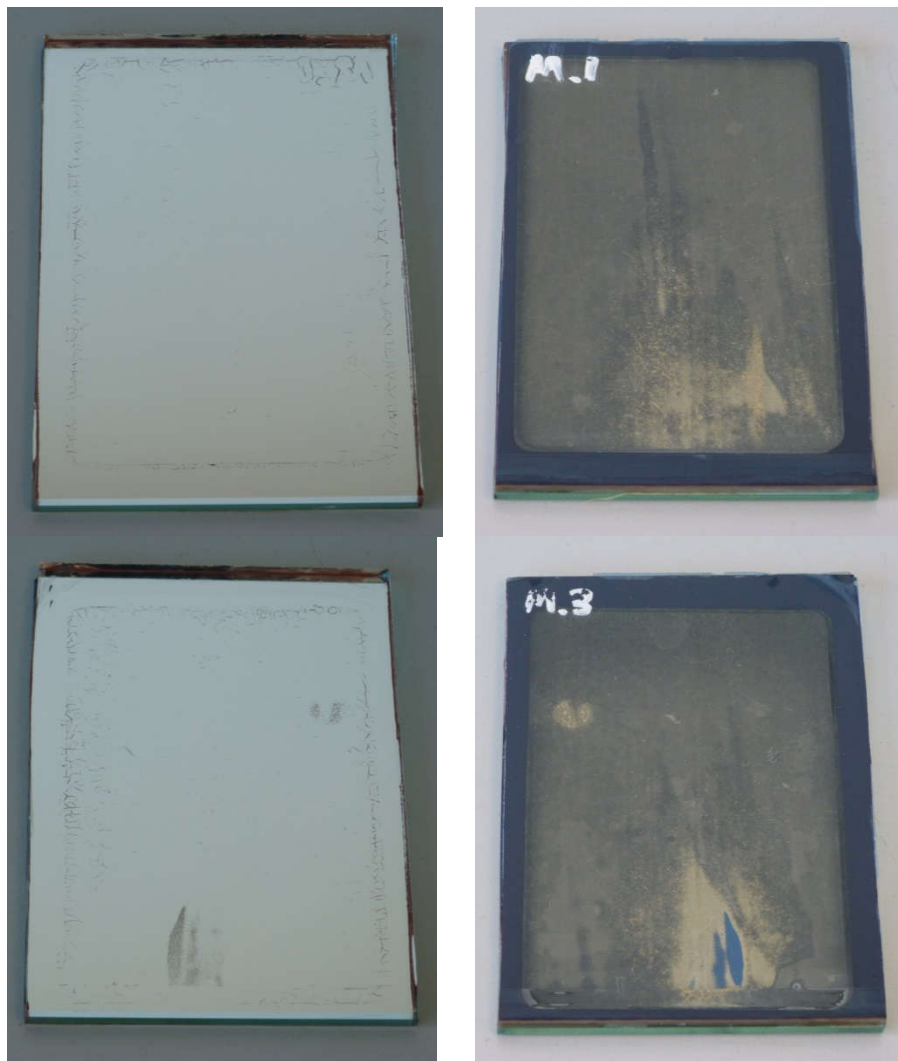


Abbildung 52: Proben Vorder- und Rückseite nach Beendigung der Prozedur UV/Humidity - CASS

II.1. AP 3 Prüfmethode- und Modellvergleich am Testkollektor (KONTAS)

II.1. AP 3.1 „Ringschluss“ KONTAS, QUARZ-Teststände in Köln und Simulationstools

In AP 3.1 sollen bestehende Verfahren zur Messung und Vorhersage von Komponenten- (QUARZ-Teststände) und Kollektorsystemkenngrößen (KONTAS) durch Prüfmethode- und Modellvergleich (Simulationstools) am Testkollektor KONTAS überprüft werden.

Dazu wurden die Ringschluss-Versuchsdaten für ein definiertes Set von Receivern und Spiegeln an den verschiedenen Testständen aufgezeichnet. Im Einzelnen waren folgende Messstände bzw. Messverfahren beteiligt:

- ThermoRec (stationäre thermische Verlustmessung mit Innenheizung)
- ElliRec (Messung des relativen optischen Wirkungsgrads im Sonnensimulator)
- KONTAS (Drehteststand zur Messung der Receiverperformance im Modul)
- QFLY (quadroptergestützte optische Vermessung der Kollektorgeometrie)

- PaReSo (transiente thermische Verlustmessung mittels Pyrometer)
- SPRAY (Ray-Tracer zur Ableitung von Intercept und Flussdichte auf dem Receiver aus geometrischen Daten)

Diese Teststände und Messinfrastruktur sind in den Fotos der Abbildung 53 und Abbildung 54 dargestellt.



Abbildung 53: Feldtest der Receiver zur thermischen und optischen Qualifizierung im KONTAS-Teststand (links) inklusive QFly-Vermessung (rechts)



Abbildung 54: Am Ringschluss-Versuch beteiligte Labor- und Feldprüfstände zur Receiverqualifizierung (v.l.n.r.: ElliRec, ThermoRec, PaReSo)

Als Vergleichsgrößen für die Leistungsfähigkeit der Receiver dienen die charakteristischen Leistungskenngrößen optischer Wirkungsgrad und spezifische thermische Verluste. Sie werden direkt aus den Versuchen bestimmt bzw. durch Korrektur der Messergebnisse z.B. um Sauberkeit, Intercept oder andere zusätzliche Verluste abgeleitet und ineinander überführt. Analog werden für den Gesamtkollektor die Leistungskenngrößen optischer Wirkungsgrad und Gesamtwirkungsgrad herangezogen.

Vorbereitende Maßnahmen und begleitende Messungen

Im Vorlauf der Tests wurden die Temperatursensoren am KONTAS kalibriert und mechanisch stabilisiert, eine mechanische Versteifung der Receiverrohrhalterung eingefügt und weitere Verfahrensverbesserungen durchgeführt.

Für einzelne Auswertungen waren zusätzlich Korrekturterme für die Wärmeverluste in den verschiedenen Bereichen eines Receivers (Glashüllrohr, Faltenbalg) notwendig. Dazu wurde eine ergänzende Labor-Messkampagne am ThermoRec Prüfstand durchgeführt und ausgewertet. Dabei wurde die Verteilung der Wärmeverluste verschiedener Receiver mithilfe von Wärmefluss Sensoren und Infrarotkameras charakterisiert (Abbildung 55).

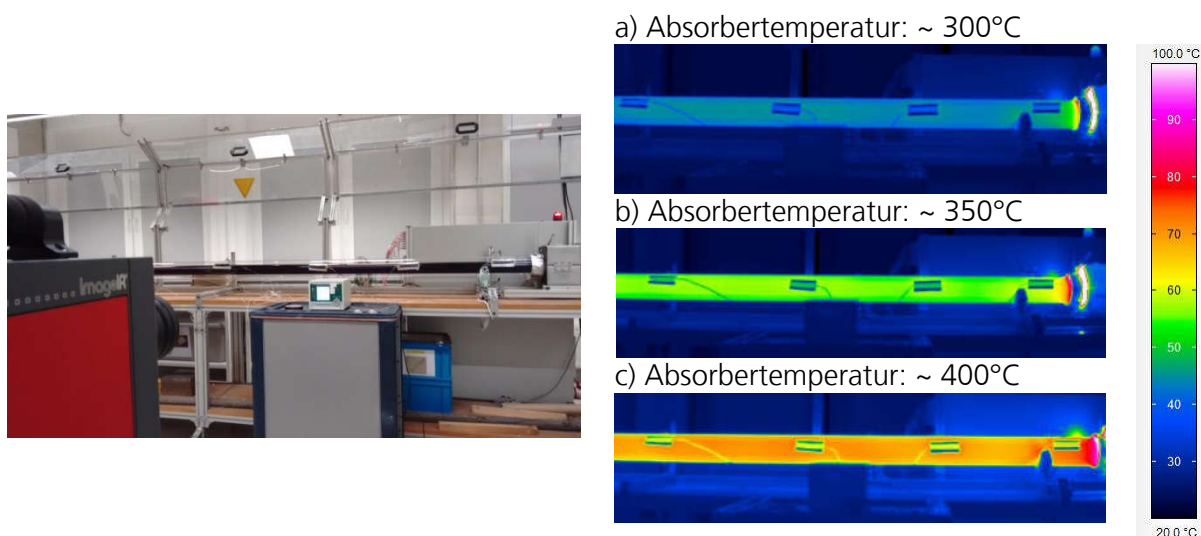


Abbildung 55: (Links) Experimenteller Aufbau zur Charakterisierung der Verteilung der Wärmeverluste. (Mitte) Infrarot-Temperaturmessungen des Borosilikat-Glashüllrohrs. (Rechts): Temperaturskala.

Verschiedene evakuierte Receiverrohre mit unterschiedlichen Faltenbälgen wurden unter Laborbedingungen für typische Absorberrtemperaturen zwischen 300°C und 400°C untersucht. Die Faltenbälge wurden systematisch mit entsprechenden Schilden isoliert. Mit dem experimentellen Aufbau wurden zunächst keine signifikanten Unterschiede in der Verteilung der Wärmeverluste über die Länge des Glashüllrohrs beobachtet. Wärmebrücken zwischen Glashüllrohr und Glas-Metall-Verbindung sowie Faltenbälgen könnten mit Dünnschicht Wärmefluss-Sensoren näher charakterisiert werden.

Die im ThermoRec-Teststand eingespeisten elektrischen Haupt- und Gegenheizleistungen wurden durch deren spezifische Länge geteilt¹³. Diese spezifischen Wärmeverluste wurden mit der Außenfläche des Glashüllrohrs bzw. des Faltenbalges normalisiert und mit gemessenen Wärmeflussdichten verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 56 beispielhaft für einen Parabolrinnenreceiver dargestellt. Am Glashüllrohr stimmen gemessene und normalisierte Wärmeflussdichte gut überein, mit einer maximalen Abweichung von 13% bei der maximalen Absorberrtemperatur (400°C). Am Faltenbalg weichen gemessene und normalisierte Wärmeflussdichte um bis zu 17% bei der niedrigeren Absorberrtemperatur (300°C) ab. Insgesamt unterschätzen die gemessenen Wärmeflussdichten die normalisierten Werte systematisch.

¹³ Gong, G. et al., *An optimized model and test of the China's first high temperature parabolic trough solar receiver*, Solar Energy 84 (2010) 2230-2245

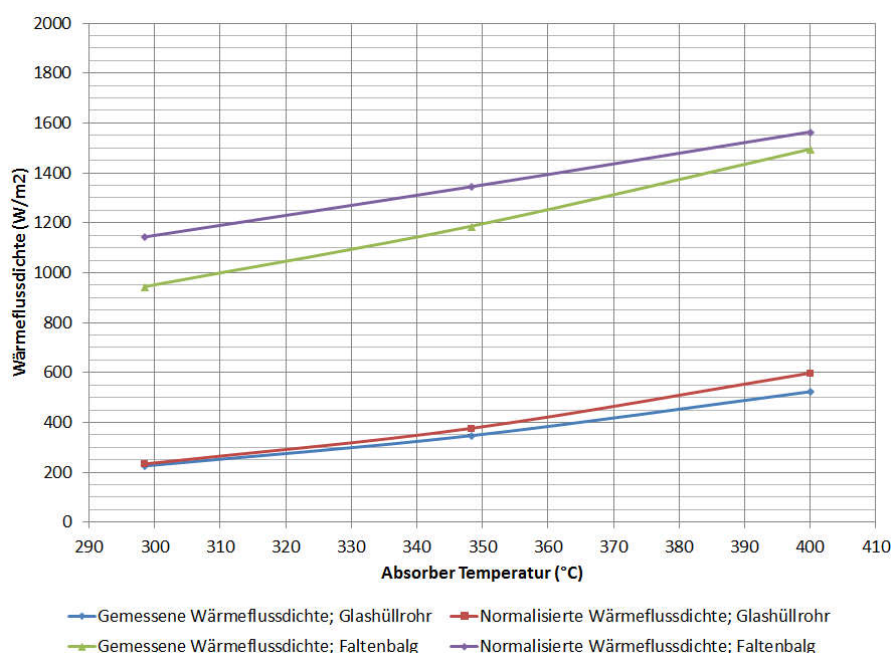


Abbildung 56: Vergleich der gemessenen und normalisierten Wärme-flussdichten am Glashüllrohr und Faltenbalg für einen Parabolrinnenreceiver

Das Verhältnis zwischen Wärmeverlusten an Faltenbalg und Glashüllrohr nimmt bei niedrigeren Temperaturen (Tabelle 10) zu. Gemessene Wärme-flussdichten können geometrisch zu Gesamt-Receiver-Wärmeverlusten hochgerechnet werden. Diese Werte unterschätzen die am ThermoRec gemessenen Wärmeverluste. Die Abweichung steigt mit der Absorb-temperatur von 6% bei 300°C auf bis zu 12% bei 400°C. Die Ergebnisse sind in den Ringschluss-Vergleich eingeflossen und ermöglichten genauere Aussagen über Messabweichungen.

Tabelle 10: Wärme-flussdichte Messergebnisse für einen Parabolrinnenreceiver

Mess-/Auswertegröße	Kürzel	Symbol	Messung #1	Messung #2	Messung #3
Absorb-temperatur		T_{abs}	298.4 °C	348.3 °C	400.0 °C
Glastemperatur ¹⁴		T_{gl}	45.1 °C	54.5 °C	66.3 °C
Gemessene Wärme-flussdichte (Glashüllrohr)	(A)	$q''_{glas,meas}$	226 W/m ²	347 W/m ²	523 W/m ²
Normalisierte Wärme-flussdichte (Glashüllrohr)	(B)	$q''_{glas,calc}$	234 W/m ²	377 W/m ²	598 W/m ²
Relative Abweichung (Glashüllrohr)	$[(A)-(B)]/(B)$	$\Delta q''_{glas}$	-4%	-8%	-13%
Gemessene Wärme-flussdichte; (Faltenbalg)	(C)	$q''_{bellow,meas}$	944 W/m ²	1187 W/m ²	1496 W/m ²
Normalisierte Wärme-flussdichte; (Faltenbalg)	(D)	$q''_{bellow,calc}$	1143 W/m ²	1345 W/m ²	1564 W/m ²
Relative Abweichung (Faltenbalg)	$[(C)-(D)]/(D)$	$\Delta q''_{bellow}$	-17%	-12%	-4%
Verhältnis der Wärme-flussdichte	(C)/(A)	$q''_{bellow,meas}/q''_{glas,meas}$	4.2	3.4	2.9

¹⁴ Die Umgebungstemperatur liegt bei 19°C.

Mess-/Auswertegröße	Kürzel	Symbol	Messung #1	Messung #2	Messung #3
(Faltenbalg / Glashüllrohr)					
Gemessene Wärme- verluste (<i>ThermoRec</i>)	(E)	$Q_{loss, meas}$	424 W	656 W	1010 W
Integrierte Wärme- verluste (<i>Wärmefluss</i>)	(F)	$Q_{loss, calc}$	400 W	602 W	892 W
Relative Abweichung (<i>Wärmebilanz</i>)	$[(E)-(F)]/(F)$	ΔQ_{loss}	6%	8%	12%

Ergebnisse

Die mittels QUARZ-Labor, KONTAS-Teststand, PARESO Thermographie, QFly-Messung und optischer und thermischer Simulationen erzielten Messergebnisse wurden für den Ringschlussvergleich im Hinblick auf optischen Wirkungsgrad der Receiver und des Kollektors sowie den Gesamtkollektorwirkungsgrad und die thermischen Receiververluste ausgewertet. Die zum Vergleich herangezogenen typischen Qualitätskenngrößen für ein Parabolrinnensystem sind in Abbildung 57 in einer Übersicht dargestellt. Tabelle 11 zeigt eine Zusammenfassung der einzelnen Testergebnisse.

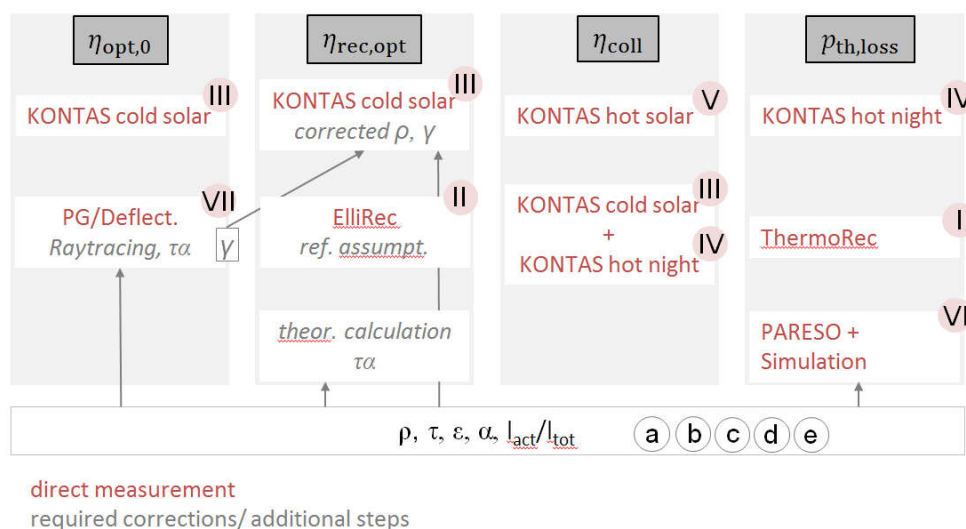


Abbildung 57: Qualitätskenngrößen und im Ringschlussvergleich ausgewertete Tests und Simulationen

Tabelle 11: Messergebnisse der am Ringschluss beteiligten Teststände und -methoden (Referenztemperatur für heiße Tests 350°C, für kalte Tests nahe Umgebungstemperatur) mit Standardmessunsicherheiten (1 σ)

ID	Quantity	Symbol	units	Test result		comment / nature of correction
				value	u(x)	
Theory						
a	mirror reflect.	ρ_{SWH}	-	0.946	0.007	
b	transmittance	$\tau_{\text{glass env.}}$	-	0.96	0.002	
c	absorptance	α	-	0.96	0.007	
d	emittance	ε	-	0.085	0.007	
e	active length	$l_{\text{act}}/l_{\text{tot}}$	-	0.972	0.0005	fraction of active receiver length
ThermoRec						
I	specific heat loss	$\rho_{\text{th,loss,ThermoRec}}$	W/m	148	2.7	
ElliRec						
II	rel. optical eff.	$\frac{\eta_{\text{rec,opt}}}{\eta_{\text{rec,opt,ref}}}$	-	1.057	0.002	corrected for active length
II*	abs. optical eff	$\eta_{\text{rec,opt}}$		0.899	0.02	
KONTAS						
III	optical efficiency (cold+sun)	$\eta_{\text{coll,opt,KONTAS}}$	-	0.791	0.007	
IV	thermal loss (no sun)	$\rho_{\text{th,loss,KONTAS}}$	W/m	157.3	9.1	@ $T_m = 350^\circ\text{C}$
V	thermal eff (hot+sun)	$\eta_{\text{coll,KONTAS}}$	-	0.743	0.009	@ $T_m = 350^\circ\text{C}$
PaReSo						
VI	heat loss	$\rho_{\text{th,loss,PaReSo}}$	W/m	154.8	10.8	Correction: Glas tube eccentricity
Simulation						
VII	QFly+Raytracing intercept factor	γ	-	0.9503	0.2	
VII	heat loss	$\rho_{\text{th,loss,sim}}$	W/m	146.3	tbd	Only partial information available for spectral ε (interpolation and vacuum assumption, $\varepsilon=8.5\%$ assumed)

Die in Abbildung 58 dargestellten Ringschlussresultate für die vier ausgewählten Qualitätsparameter zeigen generell eine gute Übereinstimmung der auf den verschiedenen Wegen ermittelten Ergebnisse. Die ebenfalls neu ausgewerteten und mit Fehlerbalken dargestellten erweiterten (2 σ) Unsicherheiten der Messmethoden und Auswerteverfahren illustrieren die Genauigkeitsunterschiede der Ansätze.

Während die ermittelten optischen Receiver- und optischen Kollektorwirkungsgrade ausgezeichnet übereinstimmen, zeigen sich größere (aber im Rahmen der Messunsicherheit durchaus akzeptable) Diskrepanzen beim Gesamtkollektorwirkungsgrad und den spezifischen thermischen Receiververlusten. Diese sind hauptsächlich auf bisher nicht korrigierte Abweichungen in den Messbedingungen sowie systematische Probleme mit der Coriolismassenstrommessung im KONTAS bei hohen Betriebstemperaturen zurückzuführen:

- Bei der unbestrahlten Wärmeverlustmessung im KONTAS werden die Wärmeverluste von (kurzen) Zuleitungsrohrstücken, Receiverhalterungen und nicht optimal isolierten Receiverübergängen mit bilanziert. Diese erklären die höheren spezifischen Wärmeverluste.
- Bei der Ermittlung des thermischen Gesamtkollektorwirkungsgrads aus den unbestrahlten Wärmeverlustmessungen und den kalten Wirkungsgradmessungen kommt dieser Effekt ebenfalls zum Tragen. Gleichzeitig scheint sich eine aus anderen Messungen vermutete systematische Unterschätzung des Massenstroms durch den Coriolismesser bei hohen Fluidtemperaturen zu bestätigen, die diesen Effekt überkompensiert. So ergibt sich in der direkten heißen Wirkungsgradmessung tendenziell ein niedrigerer Wert als in den aus kalten und unbestrahlten Messungen abgeleitet wird.

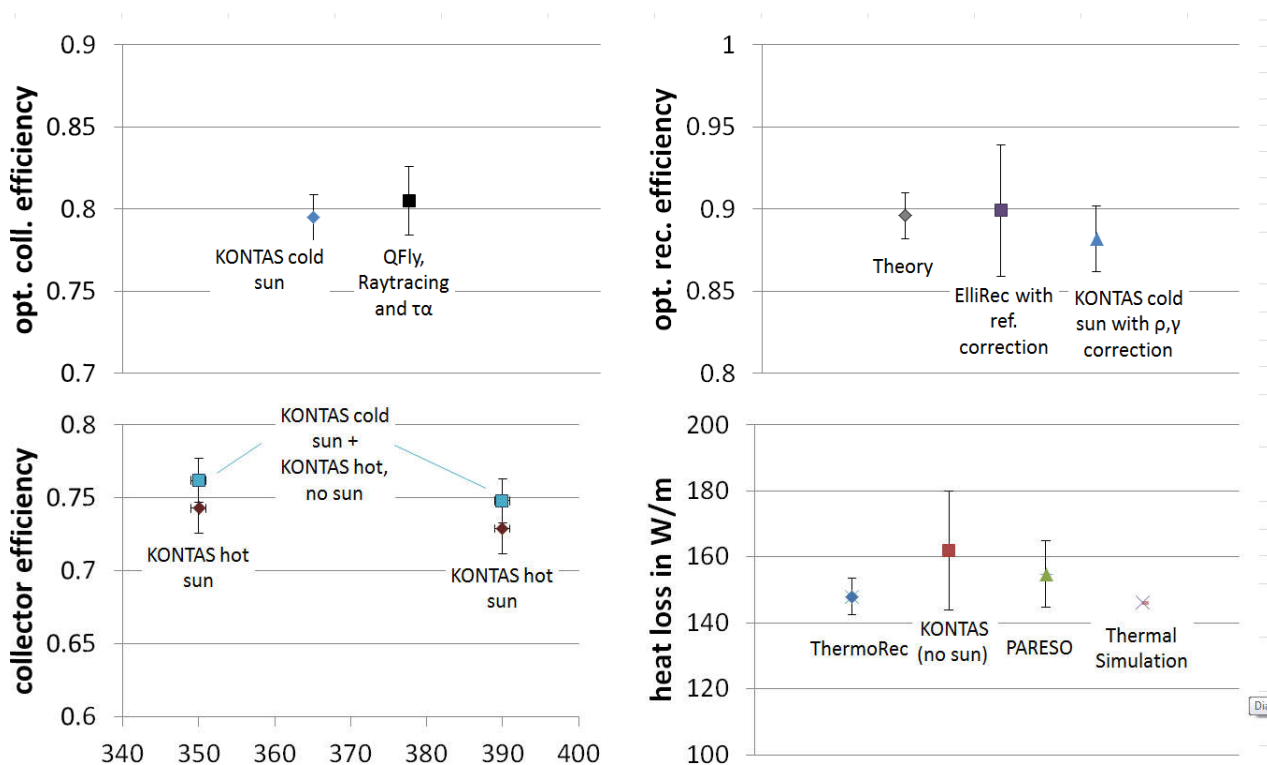


Abbildung 58: Ringschlussergebnisse für die ausgewählten Qualitätsparameter optischer Kollektorwirkungsgrad (oben links), optischer Receiverwirkungsgrad (oben rechts), Kollektorwirkungsgrad (unten links), spezifische Receiverwärmeverluste (unten rechts) mit erweiterten (Mess-) Unsicherheiten (2σ)

II.1. AP 3.2 Studie zur Änderung der spezifischen Wärmekapazität des Thermoöls (cp-Messung) über die Zeit

Für die in diesem Arbeitspaket vorgenommene Studie zur Änderung der spezifischen Wärmekapazität von Thermoöl über die Zeit wurde der zu diesem Zweck entwickelte Messaufbau, im Rahmen des EU-Projektes SFERA II im Q1 2016, an den KONTAS Teststand auf der Plataforma Solar de Almería in Spanien angeschlossen. Zuvor war eine Validierungsmessung mit Wasser erfolgreich durchgeführt worden, welche die präzise Funktionalität des Messgerätes bei Umgebungstemperatur nachwies.

Abbildung 59 zeigt die Messvorrichtung (Durchflusskalorimeter) am KONTAS Prüfstand.



Abbildung 59: Messvorrichtung zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Thermoöl im KONTAS Prüfstand

Die Inbetriebnahme mit heißem Thermoöl (Syltherm 800) wurde im Q1 2016 begonnen und im Q2 2016 abgeschlossen, sodass der Beginn der Langzeitmessungen im Q2 2016 begonnen werden konnte.

Die erste Messung zur Charakterisierung des im Teststand befindlichen Wärmeträgerfluids (engl.: heat transfer fluid, HTF) Syltherm 800 wurde in Q2 2016 durchgeführt. Die zweite / abschließende Messung der spezifischen Wärmekapazität des Silikonöl- HTFs im KONTAS Teststand, anhand derer die Veränderung der Wärmekapazität über die Zeit bzw. den Betrieb einer Anlage untersucht wurde, erfolgte im Q2 2018. Im Rahmen der kostenneutralen Verlängerung des Projektes wurde der Betrachtungszeitraum verlängert und damit die Chance der Beobachtung von alterungsbedingten Veränderungen in der, in dem Zusammenhang ohnehin kurzen, Projektlaufzeit erhöht.

Die Ergebnisse des Durchflusskalorimeters und die zweier cp-Bestimmung durch Differenzkalorimetrie sind in Tabelle 12 gelistet und zeigen im Temperaturbereich bis 270°C mit Abweichungen von 0,2 bis 1,0% (bezogen auf die DSC-Labormessung) eine hervorragende Übereinstimmung beider Messmethoden. Bei einer höheren HTF-Temperatur von 329°C zeigt sich eine Abweichungen von 1,2 bis 4,5%, die wahrscheinlich auf eine unzulängliche Temperaturkorrektur im eingesetzten Coriolissensor (Massenstromsensor) zurückzuführen ist, der auch den dominierenden Einfluss im Unsicherheitsbudget der Messung ausmacht.

Tabelle 12: Vergleich der spezifischen Wärmekapazität ermittelt mit KONTAS-cp und Differentialkalorimetrie

Betriebspunkt	KONTAS-cp 2016		KONTAS-cp 2018		DSC Labormessung 2014		DSC Labormessung 2017	
T_{HTF} in °C	J/kgK	%	J/kgK	%	J/kgK	%	J/kgK	%
161	1903	±1,4			1898	±2,0	1887	±2,0
210	1993	±1,2			1987	±2,0	1998	±2,0
269	2106	±1,5			2086	±2,0	2092	±2,0
329	2247	±1,9	2206	±2,6	2174	±2,0	2188	±2,0

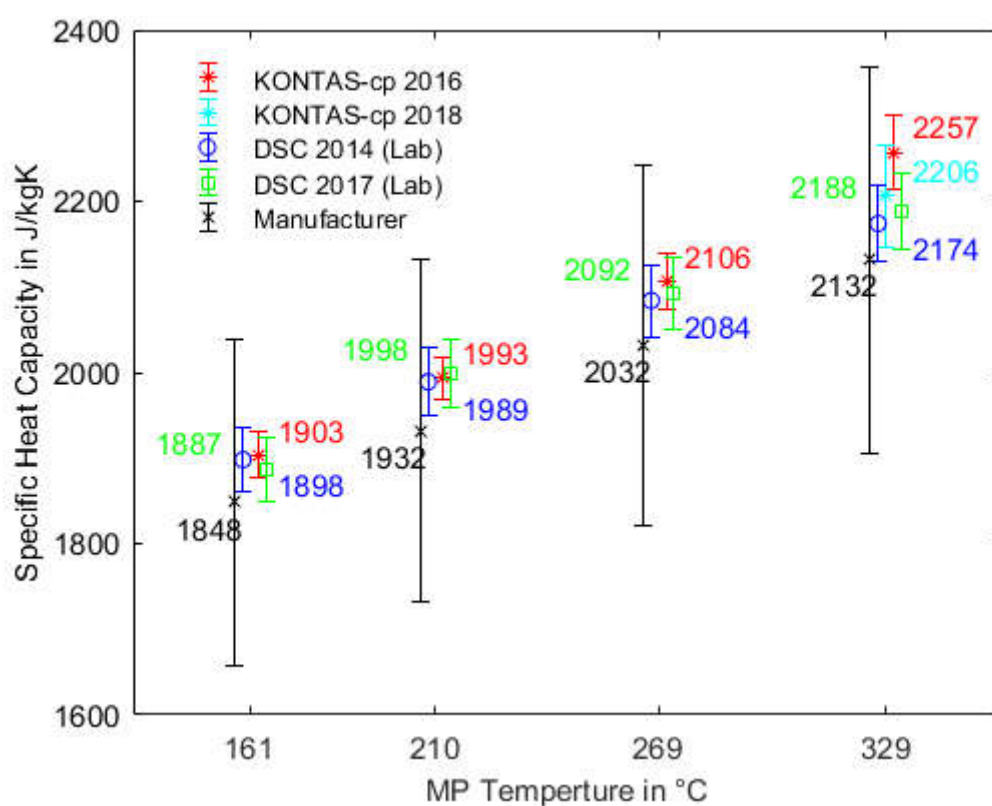


Abbildung 60: Vergleich der spezifischen Wärmekapazität mit Unsicherheiten (Fehlerbalken) über der Temperatur

Vor der zweiten Messung, nach längerem Stillstand des KONTAS Teststands, waren einige Arbeiten an der Peripherie des Prüfstands erforderlich geworden, um das Messsystem für die cp-Messungen einsatzbereit zu machen. Dabei sind allerdings größere Probleme mit dem Wärmeträgerkreislauf des Prüfstands aufgetreten. Die cp-Messtechnik selbst war hiervon nicht betroffen. Das Ergebnis zeigt keine signifikanten Abweichungen zur Initialen Messung.

Nachfolgend sind drei Gründe genannt, die den Nutzen des angestrebten Vergleich der spezifischen Wärmekapazität vor und nach dem Betriebszeitraum zwischen Q2 2016 und Q3 2018 einschränken:

- Die Auswertung der Messung im Q2 2018 war aufgrund besagter technischer Einschränkungen ausschließlich bei einer Mitteltemperatur von etwa 330°C durchführbar. Diese Temperatur / Messpunkt ist zwar hinsichtlich von CSP Anwendungen relevant, weißt aber die höchste Messunsicherheit auf.
- Insbesondere ist dieser Messpunkt (330 °C) von der stark temperaturabhängigen und von den Herstellerangaben abweichenden Messunsicherheit des Coriolis Massenstromsensors beeinflusst. Die für eine Kompensation notwendige Temperaturkalibration ist bisher wirtschaftlich nicht sinnvoll durchführbar und daher nicht verfügbar.
- Die absolvierten Betriebsstunden (<100 h) bei einem mittleren Temperaturniveau von 300 bis 350°C des KONTAS Teststandes im Zeitraum von Q2 2016 bis Q3 2018 reichten nicht aus, um beim HTF Syltherm 800 eine signifikante Degradation zu bewirken, die wiederum einen Einfluss auf die spezifischen Wärmekapazität hätte haben können.

Hinsichtlich zukünftiger Anwendungen des Durchflusskalorimeters sollte der Betrieb des Coriolis Massenstromsensors bei Temperaturen im Bereich von 200°C erfolgen, weil bei höheren Temperaturen absehbar keine Temperaturkalibrationen zur Verfügung stehen werden. Dazu ist eine Art Zwischenkühlung denkbar, die den Betrieb des Kalorimeters bei 400 °C erlaubt, den Coriolis Sensor aber nur mit etwa 200 °C heißem HTF durchströmt. Weiterhin ist die Verwendung des Messaufbaus an einer Einrichtung sinnvoll, die mehr Betriebsstunden absolviert und somit das Wärmeträgermedium eine messbare Veränderung der spezifischen Wärmekapazität erfahren könnte.

II.1. AP 4 Definition umfassender Produktprüfverfahren für die Schlüsselkomponenten

Standardisierung und Normung

Es wurden wissenschaftlich-technische Erkenntnisse und Erfahrungen in verschiedene internationale Standardisierungsprozesse eingebracht.

Zum Thema Parabolrinnen-Receiver stehen die optischen Methoden zur Messung von Schichteigenschaften in Reflexion und Transmission zur Verfügung. Spektral aufgelöste Messungen benötigen Spektrophotometer für den Wellenlängenbereich 280 bis 2500 nm mit integrierender Kugel, im Fall der Emissionseigenschaften der Absorberschicht ein Infrarot-Spektrometer (FTIR). Besonders gute Reproduzierbarkeit von Messergebnissen wird demgegenüber mit der integralen Methode für den optischen Wirkungsgrad im Sonnensimulator mit linearem Fokus des DLR erzielt. Jedoch wird dafür ein absoluter Standard erwartet, um nicht nur auf Referenz-Receiver als Arbeitsstandard angewiesen zu sein. Die Entwicklung eines Systems zur absoluten Messung des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern ist Ziel des Arbeitspakets 1.

Im Rahmen eines Round Robin Tests auf europäischer Ebene haben sich zum Teil unerwartet große Abweichungen der Prüfstände der Institute DLR, CENER (Spanien), CIEMAT-PSA (Spanien), und ENEA (Italien) zur Wärmeverlustmessung bzw. zur Messung des optischen

Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern ergeben. Da dieser Round Robin Basis für die Standardisierungsaktivitäten im Rahmen von IEC, TC 117 sein sollen, ergibt sich kurz und mittelfristig internationaler Abstimmungsbedarf. Mögliche Ursachen an den Prüfständen im DLR werden daher aufgrund der großen Bedeutung für die Standardisierung im Rahmen dieses Arbeitspaketes gezielt näher untersucht und international diskutiert.

Im Bereich Standardisierung und Normung ist teilweise erheblicher zeitlicher und experimenteller Aufwand erforderlich, um aus Expertensicht ungünstigen Vorschlägen entgegenzuwirken bzw. durch konstruktive Vorschläge die Mitglieder der Arbeitsgruppe vom Nutzen besserer aber auch aufwendigerer Methoden zu überzeugen.

Wissenschaftler des DLR haben an Telefonkonferenzen und Veranstaltungen von folgenden Arbeitsgruppen bzw. Gremien zum Thema Standards für CSP teilgenommen:

- IEC TC 117 Solarthermische Kraftwerke, E. Lüpfer als Leiter der deutschen Delegation
- IEC TC 117, Part 3.3 Systems and Components, J. Pernpeintner als Experte für Receiver-Tests
- SolarPaces Task III, Arbeitsgruppen für Spiegel-Reflektivität, -Form, -Lebensdauer, Receiverrohr-Tests, Abnahmetests für Solarfelder
- DIN DKE K374 Solarthermische Kraftwerke (Spiegelkomitee zu TC117), E. Lüpfer als gewählter Sprecher/Obmann
- AENOR Arbeitsgruppe GT1 (System) und Arbeitsgruppe GT2 (Komponenten), (Spiegelkomitees zu TC117), E. Lüpfer, F. Sutter, J. Pernpeintner als Experten

Die Arbeiten an der Standardisierung der beschleunigten Alterungstests und Analyse der Reflektoren (siehe AP 2.2) wurden in der spanischen Norm UNE 206016: „Reflector panels for concentrating solar technologies“ publiziert.

In der spanischen Norm UNE 206016 sind ebenfalls die im DLR entwickelten Methoden der Spiegelformmessung mittels Deflektometrie (Streifen-Reflexion) eingeflossen.

Für das Thema Receiver wurde innerhalb der IEC ein offizieller Normentwurf (IEC Technical Specification TS 62862-3-3) verabschiedet, über den im April 2019 abgestimmt wird.

Definition von Produktprüfverfahren

Schwerpunkt der Definition von Produktprüfverfahren war die exemplarische Auswahl und Zusammenstellung von Tests für Spiegel und Receiverrohre für ein kommerzielles Parabolrinnenfeld. Das Ziel der Prüfungen ist zum einen die Einhaltung von einfachen aber konkreten Spezifikationen von Geometrie und Material. Zum zweiten sind leistungsrelevante Parameter zu prüfen. Drittens sind die Auswirkungen von Bewitterungs- und Alterungstests auf die Leistungsparameter auszuwerten. Bestandteil des Entwurfs des Prüfplans sind die Zeitpunkte, der Umfang (Losgröße) und die Art der Überprüfung der Probennahme aus einer Serienproduktion beim jeweiligen Hersteller, um aussagekräftige und relevante Ergebnisse zu erzielen, ohne unverhältnismäßig hohe Kosten für die Probennahme und Tests auszulösen.

Typischerweise liegt der Zeitpunkt der Probennahme erst Monate nach der Unterzeichnung des Liefervertrags. Die Durchführung und Auswertung von Tests dauert vor allem mit Alterungstests 2-4 Monate. Das Ergebnis der Tests und das Einhalten konkreter Leistungsparameter ist dann die notwendige Bedingung dafür, dass der Liefervertrag gültig wird. Es ist daher erforderlich, klare Testbedingungen und Abnahmekriterien zu definieren, auf die sich die Vertragspartner (Hersteller, Abnehmer) ohne unbekannte Risiken einlassen können. Außerdem ist ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit der Tests und Reputation des Labors für solche Bedingungen nötig.

Auf der Basis wird eine eher niedrige Anzahl von möglichst aussagekräftigen Tests definiert, deren Ergebnisse einschließlich Berücksichtigung von Messunsicherheiten bei einer handhabbaren Zahl von Prüflingen die entscheidenden Schlussfolgerungen ermöglichen. Präzise Beschreibungen der gewünschten Ergebnisse sind ebenso erforderlich wie eine sehr geringe Messunsicherheit bei gleichzeitig hoher Aussagekraft der Tests für den Käufer der Produkte.

QUARZ-Label

a) Vorarbeiten / Prüfung von Übertragbarkeiten aus anderen Branchen

Um die Übertragbarkeit von Prozessen aus anderen Branchen zu untersuchen, wurde eine Recherche zur Produktprüfung von Photovoltaikmodulen und Flachkollektoren durchgeführt. Diese Branchen sind geeignete Vorbilder, da eine ähnliche Anwendung vorliegt, entsprechend ähnliche Anforderungen an die Produkte gestellt werden, die Standardisierung weit fortgeschritten ist und eine Zertifizierung etabliert ist. Die Recherche umfasst auch die dort verwendeten Zertifizierungsstrukturen.

Zertifikate, Siegel und Produktprüfverfahren im Bereich der Photovoltaik und Flachkollektoren

Zum Begriff „Zertifikat“

Die „Zertifizierung“ eines Produktes, einer Dienstleistung o.ä. ist in DIN EN ISO 17065 definiert als „Mittel sicherzustellen, dass es/er/sie festgelegten Anforderungen in Normen und anderen normativen Dokumenten entspricht.“ Dazu kommt, dass Zertifikate meist von akkreditierten Zertifizierungs- und Testeinrichtungen vergeben werden. Auch wenn der Begriff „Zertifikat“ nicht gesetzlich geschützt ist, scheint es sehr unüblich und irreführend, eine Qualitätsprüfung „Zertifizierung“ zu nennen, wenn sie nicht gemäß Normen erfolgt. Die Begriffe „Gütesiegel“ oder „Qualitätssiegel“ werden hingegen freier verwendet.

Prüfungen von PV-Modulen

Bei der Prüfung von PV-Modulen sind Prüfungen gemäß Normen und die Vergabe von Zertifikaten am weitesten verbreitet. Die häufigsten Zertifikate bescheinigen eine Prüfung nach DIN EN 61215 (Bauartzertifizierung mit Leistungsmessung und Alterung) und DIN EN 61730 (elektrische Sicherheit). Sie werden von vielen Projektentwicklern als Bedingung für den Einbau der jeweiligen Module gefordert.

Die führende Einrichtung für die Vergabe von Zertifikaten für PV-Module ist der TÜV Rheinland. Eine weitere Einrichtung zur Vergabe von Zertifikaten ist das TestLab des Fraunhofer ISE und des VDE. Sowohl das Testlabor des TÜV Rheinland als auch das TestLab sind zertifizierte Testlabore nach DIN/EN/ISO/IEC 17025. Der TÜV Rheinland bietet neben der Zertifizierung von PV-Modulen ein weiteres Prüfschema „PV+Test“ an, welches eine bessere und differenziertere Bewertung der PV-Module ermöglichen soll. Im Folgenden werden beide Varianten kurz vorgestellt.

Zertifizierung von PV-Modulen

Bei der Zertifizierung von PV-Modulen, wie sie vom TÜV Rheinland und TestLab durchgeführt werden, handelt es sich meist um Bauartzertifizierungen. Das heißt, „[...] ein Zertifikat gilt immer explizit für den geprüften Modultyp mit den bei seiner Herstellung verwendeten Materialien. Bei nachträglichen Modifikationen am Moduldesign (z. B. Rahmen, Größe, Zellzahl) oder der Verwendung neuer Materialien (z. B. Zelle, Rückseitenfolie, Einkapselungsmaterial) müssen deshalb gemäß den Retesting-Guidelines bestimmte Testsequenzen wiederholt werden, damit das zuvor ausgestellte Zertifikat seine Gültigkeit behält.“¹⁵

Bei einer Zertifizierung ist das Ergebnis immer eine Pass-Fail-Aussage. Eine genauere Aufschlüsselung der Testergebnisse findet nicht statt. Die Anzahl an getesteten Modulen liegt im mittleren einstelligen Bereich. Abbildung 61 zeigt beispielhaft die Testsequenz der Norm DIN EN 61215. Hieran kann man erkennen, dass nicht alle Module dieselben Tests durchlaufen. Das heißt, die statistische Signifikanz der einzelnen Tests ist eher gering, da teilweise nur ein Modul pro Test geprüft wird. Wenn mehrere Module den gleichen Test durchlaufen, dient das eher zum Vorher-Nachher-Vergleich, nicht zur Erhöhung der statistischen Signifikanz. Es wird allerdings gefordert, dass alle Module alle an ihnen durchgeführten Tests bestehen. Ein Mindestmaß an statistischer Aussagekraft soll über das zufällige Ziehen der Module aus einer oder mehrerer Produktionschargen erreicht werden. Für das hierzu anzuwendende Verfahren wird auf andere Normen (z.B. DIN EN 61646) verwiesen.

¹⁵ Fraunhofer ISE, „Prüfungen zur Zertifizierung von PV-Modulen,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/servicebereiche/testlab-pv-modules/leistungen/pruefungen-zur-zertifizierung-von-pv-modulen/pruefungen-zur-zertifizierung-von-pv-modulen>. [Zugriff am 27 Januar 2017].

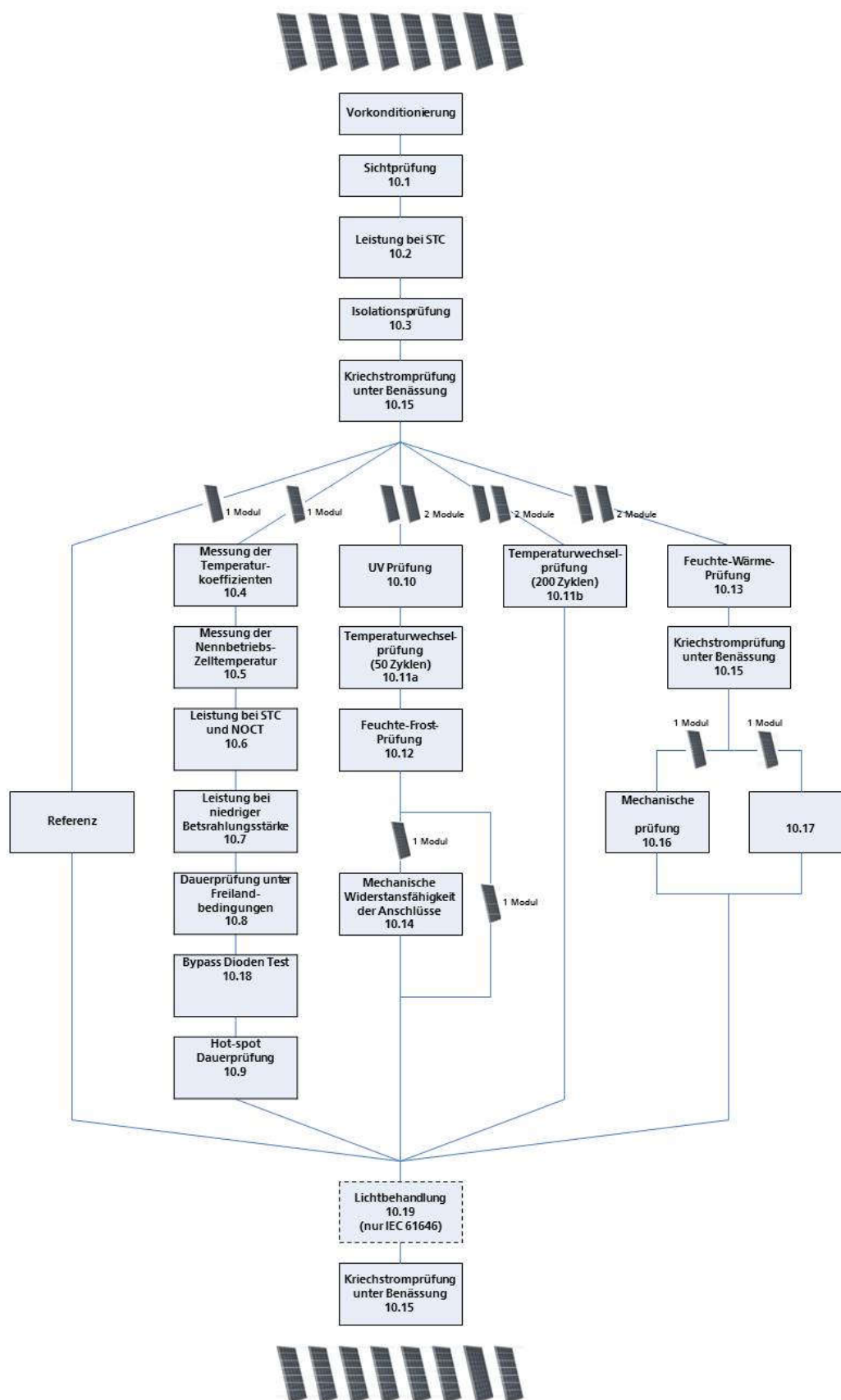


Abbildung 61: Prüfsequenz nach DIN EN 61215

Aufgrund der geringen Zahl an Prüfobjekten muss eine starke Streuung der Qualität innerhalb der Produktion eines Modultyps auf andere Weise ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund gehört zur Zertifizierung auch die Überprüfung der Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Produktion und regelmäßige Kontrollen der Produktion im Werk während der Gültigkeitsdauer des Zertifikats.

Bei Zertifikaten gibt es keine Veröffentlichungspflicht. Der TÜV Rheinland bietet an, Zertifikate in einer öffentlichen Datenbank für Zertifikate zu veröffentlichen.¹⁶

PV+Test

PV+Test wurde vom TÜV Rheinland gemeinsam mit Herstellern und Forschungsinstituten entwickelt. Es ist ein ergänzendes Prüfverfahren, das eine differenzierte Bewertung und bessere Vergleichbarkeit von PV-Modulen ermöglichen soll. Die Ergebnisse sollen hauptsächlich für potenzielle Kunden, die keine Möglichkeit haben, eigene Tests mit Modulen durchzuführen, eine Unterstützung bei der Kaufentscheidung bieten.

Bei PV+Test werden fünf am Markt gekaufte Module getestet. Zunächst werden Mindestvoraussetzungen geprüft, wozu auch das Vorhandensein der oben beschriebenen Zertifikate gehört. Zusätzlich werden weitere Leistungs-, Sicherheits- und Alterungstests durchgeführt (siehe Abbildung 62).

¹⁶ TÜV Rheinland, „Certipedia,“ 2015. [Online]. Available: <https://www.certipedia.com/>. [Zugriff am 27 Januar 2017]

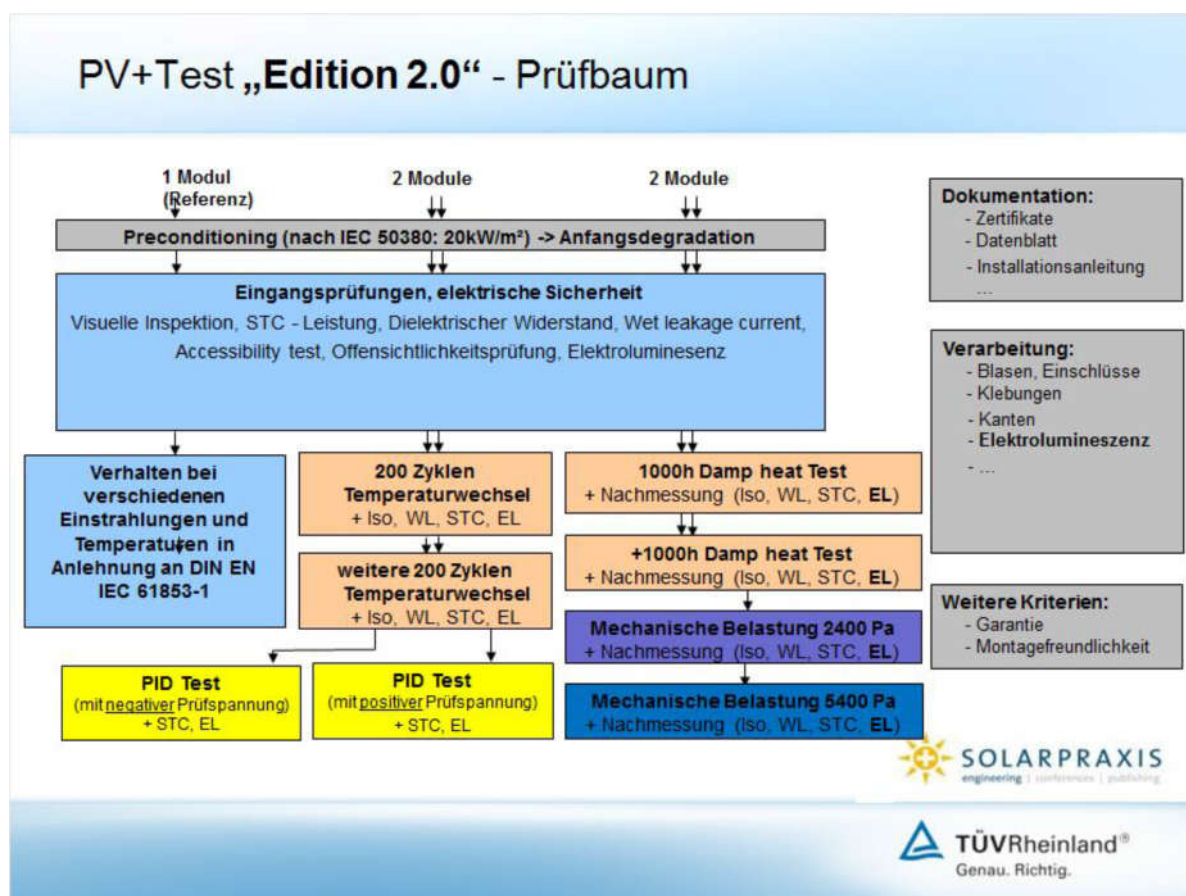


Abbildung 62: Prüfschema für PV+Test.

Ergebnisse sind eine Gesamtnote nach dem Schema deutscher Schulnoten und Punkte für einzelne Testabschnitte. Die Ergebnisse werden veröffentlicht.¹⁷ Auf Wunsch der Hersteller kann die Veröffentlichung allerdings anonymisiert erfolgen, sodass bei schlechten Testergebnissen die Hersteller meist nicht angegeben sind.

Prüfung von Flachkollektoren

Anders als für PV-Module gibt es für Flachkollektoren mit der Solar Keymark ein europaweit abgestimmtes Verfahren zur Zertifizierung von Flachkollektoren. Das Zertifizierungskomitee des CEN (European Committee for Standardization) ermächtigt Prüfeinrichtungen, die Solar Keymark zu vergeben. Für die durchzuführenden Tests wird auf mehrere europäische Normen verwiesen, die insbesondere Vorgaben zu Leistungsmessungen und Alterungstests enthalten (Nielsen, 2016). Mit einem Solar-Keymark-Zertifikat wird bescheinigt, dass das Produkt die vorgegebenen Labortests bestanden hat, dass alle zwei Jahre eine Überprüfung des zertifizierten Produkts im Werk stattfindet und jedes Jahr die Qualitätssicherungsmaßnahmen im Werk überprüft werden. Ein Zertifikat ist für fünf Jahre gültig und kann bei erfolgreichen Überprüfungen im Werk um weitere fünf Jahre verlängert werden. Die Auswahlregeln für die im Labor getesteten Kollektoren sind wie folgt angegeben:

¹⁷ pv magazine, „Testergebnisse PV+Test,“ 2014. [Online]. Available: <http://www.pv-magazine.de/modultest/testergebnisse-tabelle/#c6418>. [Zugriff am 27 Januar 2017].

„The selection of products for initial type testing is made under the responsibility of the certification body. The test samples for initial type testing are taken out of the current production or from the stock of the manufacturer. The inspector points out the test samples and records their serial numbers. The manufacturer shall prove through his factory production control and quality management system conformity of the test sample with the series production.

A series production is existing when a least 10 collectors are produced with the same materials and the same manufacturing technologies in the same way and all major production processes are performed in presence of the inspector.

At least 10 collectors of the same type more than the number of test samples picked must be available in the stock for picking the sample(s) to be tested.”¹⁸

Anders als bei deutschen Zertifikaten für PV-Module werden die Zertifikate veröffentlicht. Sie enthalten ein Datenblatt mit Testergebnissen, die für Ertragssimulationen durch Anlagenbauer genutzt werden können. Seit 2011 wird auch der aus den Testergebnissen berechnete Jahresertrag für die vier Standorte Athen, Davos, Stockholm und Würzburg angegeben.

Basierend auf den Testergebnissen und den Klimadaten für den Standort Würzburg wird in Deutschland das Label SOLERGY vergeben, mit dem Solarkollektoren in Klassen von B bis AAA eingeteilt werden. Es orientiert sich damit an den Effizienzklassen für Elektrogeräte und soll über diese Komplexitätsreduktion eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Kollektoren für mögliche Kunden gewährleisten, für die die Datenblätter der Solar-Keymark-Zertifikate nicht verständlich sind.

Umsetzung für Parabolrinnenreceiver und Parabolrinnenspiegel

Allgemein kann festgehalten werden, dass die Prüfungsmethoden selbst nur begrenzt aus dem PV- und Warmwasserkollektoren in die Solarthermie übertragbar sind. Zu unterschiedlich sind, trotz der Ähnlichkeiten in der Anwendung, im Einzelnen die Produkte und Prüfungen. Die Prüfungen betreffen in allen Branchen die Themengebiete der Leistungsprüfung, Lebensdauertests und Produktsicherheit. Allerdings werden Komponenten in der Solarthermie nur in abgesperrten Großanlagen eingesetzt, während Solarmodule und Warmwasserkollektoren vom normalen Endkunden eingesetzt werden. Dieser Punkt, und die Tatsache dass Solarmodule elektrische Geräte sind, erklärt wohl, warum Produktsicherheit in der Prüfung von Parabolrinnenkollektoren und Parabolrinnenspiegeln bislang kaum eine Rolle spielt. Zudem sollten nicht jede, in anderen Branchen übliche, Prüfung auf Receiver und Spiegel übertragen werden, da jede Prüfung mit zusätzlichen Kosten verbunden ist. Derzeit werden bei Receivern und Spiegeln neue Prüfungsmethoden in engem Austausch von Prüflabor, Produkthersteller und Kraftwerksbauer und –betreiber entwickelt, wenn eine entsprechende Fragestellung in der Praxis auftritt. So bleibt der Prüfaufwand auf ein sinnvolles Maß begrenzt. Daher bleibt als Erkenntnis, dass der derzeitige Weg, Prüfungen aufgrund von Erfahrungen in der Praxis zu entwickeln, fortgesetzt werden sollte. Der Begriff „umfassende Produkttests“ wird

¹⁸ J. E. Nielsen, „The Solar Keymark Scheme Rules,“ 12 Dezember 2016. [Online]. Available: http://www.estif.org/solarkeymark/Links/Internal_links/network/sknwebdoclist/SKN_N0106R29-SKNSchemeRules.pdf. [Zugriff am 2 Februar 2017].

also hier interpretiert als nach bestem Stand des Wissens, wobei dieser im Wesentlichen bereits in den vorhandenen Prüfständen manifestiert ist.

Eine wesentliche Fragestellung war, wie mit dem Problem der kleinen Stichprobengrößen in der Produktprüfung umgegangen werden soll. So werden typischerweise heute jeweils nur drei Receiver auf optische und thermische Eigenschaften untersucht. Wie die Recherche zeigte, wird in PV und Warmwasserkollektoren dies auch ähnlich gehandhabt. Eine Untersuchung zur Statistik solcher Prüfungen hat ergeben, dass für eine statistisch aussagekräftige Prüfung die Stichprobengröße mindestens ein bis zwei Größenordnungen über den derzeit verwendeten Stichprobengrößen sein müsste, was aber nicht umsetzbar erscheint. In der Prüfung von PV-Modulen und bei Warmwasserkollektoren wird dies so gelöst, dass die Prüfung im Prüflabor mit Überprüfungen der Qualitätssicherung in der Fertigung ergänzt wird, die die statistische Problematik löst. Ergänzend gibt es verschiedene Verfahren eine Stichprobe zu ziehen, die dann im Prüflabor getestet wird. Zufallsproben werden aus einer größeren Auswahl gezogen, aus der laufenden Produktion entnommen, oder auf dem Markt gekauft. Dieses Vorgehen kann teilweise auf die Parabolrinnenreceiver und -spiegel übertragen werden, um auch hier das Problem der kleinen Stichprobenanzahl zu lösen.

Zertifikate sind in PV und bei Warmwasserkollektoren etabliert. Im Bereich der Parabolrinnenreceiver und Spiegel ist die Einführung von Zertifikaten (im oben genannten Sinn) kurzfristig nicht möglich. Dies liegt daran, dass es keine fertigen Standards gibt und, nachdem der Round Robin Test für Parabolrinnenreceiver ungenügende Übereinstimmung zwischen den Labors ergab¹⁹, noch weitere Verzögerungen zu erwarten sind. Hinzu kommt, dass das DLR Institut für Solarforschung kein akkreditiertes Prüflabor ist, und der Akkreditierungsprozess einen erheblichen Aufwand darstellt. Daher wird hier die Einführung eines Siegels verfolgt, zumindest bis ein Zertifikat realisierbar erscheint.

Das QUARZ®-Siegel soll die Einordnung einzelner oder mehrerer Produkttest im Hinblick einerseits auf Aussagekraft und andererseits auf Vollständigkeit der Charakterisierung seiner technischen Eigenschaften für die Kunden erleichtern. Die Bewertung der Ergebnisse unter den individuellen Anwendungsbedingungen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen obliegt den Kunden.

Die Kriterien zur Bewertung der Qualität der Produktprüfung werden daher in zwei Dimensionen gegliedert, nach denen durch das Siegel mit Namen QUARZ®-Label unabhängig bewertet wird. Diese sind

- Scope level und
- Significance category.

¹⁹ J. Pernpeintner, B. Schiricke, F. Sallaberry, A. García de Jalón, R. López-Martín, L. Valenzuela, A. de Luca, A. Georg, „Parabolic Trough Receiver Heat Loss and Optical Efficiency Round Robin 2015/2016“, SolarPACES 2016, AIP Conference Proceedings 1850, 020012 (2017); doi: 10.1063/1.4984337

Unter **Scope Level** soll in den verallgemeinerten Kategorien

- Level 0: scope that does not meet requirements of level 1
- Level 1: full characterization of initial performance
- Level 2: simple ageing
- Level 3: advanced ageing

unabhängig von der getesteten Komponente der Prüfumfang bewertet werden. Welche Tests für das jeweilige Level gefordert werden, ist komponentenspezifisch definiert.

Unter **Significance category** werden Aspekte zur Aussagekraft der Messungen zusammengefasst und in die Kategorien A bis E eingeteilt. Diese Kategorien sind (im Anspruch von E nach A steigend):

- Cat E: recommended quantity of samples not achieved
- Cat D: recommended quantity of samples achieved
- Cat C: independent sampling from larger quantity according to Solar Keymark or better
- Cat B: published report
- Cat A: independent sampling from serial production

In beiden Dimensionen ist ein Level bzw. eine Kategorie erst dann erreicht, wenn alle Kriterien dafür erfüllt sind.

Abbildung 63 zeigt die Bewertungsmatrix für das QUARZ®-Label, welches Produktprüfungen in zwei Dimensionen bewertet.

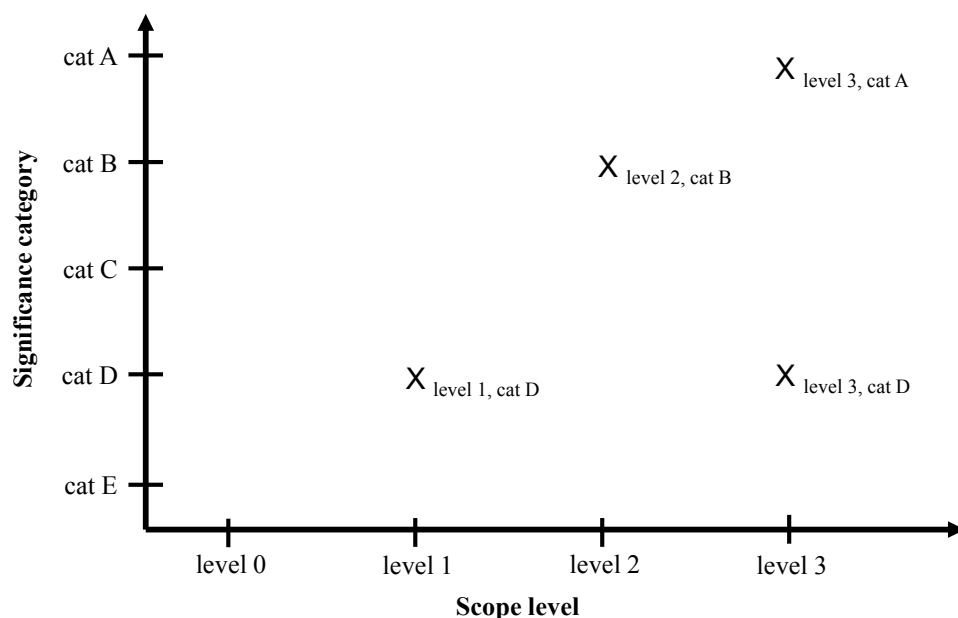


Abbildung 63: Bewertungsmatrix für das QUARZ®-Label mit vier beispielhaften Bewertungen

Für die Komponenten Parabolrinnenreceiver und Parabolspiegel wurden Prüffolgen auf Basis bestehender Richtlinien, Normentwürfe und DLR Standards die drei *scope level* „performance“

(Level 1), „basic ageing“ (level 2) und „advanced ageing“ (level 3) definiert. Tabelle 13 zeigt die aktuelle *scope level* Definition für Parabolrinnenreceiver, Tabelle 14 die *scope level* Definition für Parabolspiegel.

Tabelle 13: Aktuelle Definition des *scope levels* für Parabolrinnenreceiver

Parabolic Trough Receivers			
	Level 1	Level 2	Level 3
Required Tests with Receivers:	Heat Loss Optical Efficiency	Heat Loss I Optical Efficiency Overheating Heat Loss II Optical Efficiency II	Heat Loss I Optical Efficiency Thermal Cycling Overheating Heat Loss II Optical Efficiency II Bellow Fatigue
Required Tests with Glass Envelope Samples:	-	-	Transmittance I Condensation Taber Abrasor Transmittance II


Tabelle 14: Aktuelle Definition des *scope levels* für Parabolspiegel

Parabolic Trough Reflectors			
	Level 1	Level 2	Level 3
Required Tests with Facets:	Shape Accuracy Pad Accuracy Reflectance Pad Adhesion	Shape Accuracy Pad Accuracy Reflectance I Pad Adhesion	Shape Accuracy Pad Accuracy Reflectance I Damp Heat Neutral Salt Spray Pad Adhesion
Required Tests with Small Reflector Samples:	-	Reflectance I Basic Ageing* Reflectance II Degradation analysis	Reflectance I Advanced Ageing* Reflectance II Degradation analysis

*Accelerated ageing testing dependent on reflector type (glass/aluminum) and method (only aluminum)

Durch die Verknüpfung mit der jeweiligen Jahreszahl wird es künftig möglich sein, Änderungen an den im Label verwendeten Definitionen vorzunehmen und diese jeweils an den aktuellen Fortschritt auf dem Gebiet der Normung und Standardisierung sowie den technischen Wissensstand anzupassen. Abbildung 64 zeigt die beispielhafte Darstellung der Zusammenfassung einer Produktprüfung für Parabolrinnenreceiver in einem standardisierten QUARZ® Prüfbericht, Abbildung 65 den entsprechenden Abschnitt des *scope levels* für Parabolrinnenspiegel. Ziel der grafischen Darstellung ist eine schnelle Erfassung der durchgeführten sowie der darüber hinaus noch möglichen Test und Randbedingungen und der Gesamtbeurteilung.

DLR QUARZ Evaluation Report

Receiver 

Quality of commissioned testing scope

Sample Type: Parabolic Trough Receiver; Small Curved Glass Sample
 Sample Selection: By Client
 Tested Samples: 3
 Manufacturer: XY
 Report Date: dd. month yyyy

QUARZ® -Scope Assessment 2017: Category B, Level 2

Significance Category

Category E Category D Category C Category B Category A	 	<input checked="" type="checkbox"/> Recommended sample quantity <input checked="" type="checkbox"/> Independent sampling <input checked="" type="checkbox"/> Report published <input type="checkbox"/> Serial production
--	---------------------	---

Scope Level

Level 0 Level 1 Level 2 Level 3	 	<p><i>Receiver</i></p> <input checked="" type="checkbox"/> Heat Loss <input checked="" type="checkbox"/> Optical Efficiency <input checked="" type="checkbox"/> Overheating <input type="checkbox"/> Thermal Cycling <input type="checkbox"/> Bellow Fatigue <p><i>Small glass envelope samples</i></p> <input type="checkbox"/> Transmittance <input type="checkbox"/> Condensation - ISO 6270-2 (AENOR draft) <input type="checkbox"/> Taber Abrasor - AENOR Draft
--	----------------	---

Additional Tests

Small glass envelope samples

 Humidity freeze IEC 62108 Test 10.8
 UV-Light Stability / Humidity ISO 11507
 Sandstorm Chamber
 Miscellaneous

Confidential Report to XY

1

DLR_QUARZ_XY_Rec_YYMM

Abbildung 64: Beispiel für die Zusammenfassung einer durchgeführten Produktprüfung in einem standardisierten QUARZ Prüfbericht für Parabolrinnenreceiver

Scope Level

Level 0	Level 1	Level 2	Level 3	
				<i>Facets</i>
				<input checked="" type="checkbox"/> Shape Accuracy
				<input checked="" type="checkbox"/> Pad Accuracy
				<input checked="" type="checkbox"/> Reflectance - SolarPACES Reflectance Guideline v2.5
				<input type="checkbox"/> Damp Heat - IEC 62108 (Test 10.7)
				<input checked="" type="checkbox"/> Neutral Salt Spray (NSS) - ISO 9227
				<input type="checkbox"/> Pad Adhesion
				<i>Small reflector samples</i>
				<input checked="" type="checkbox"/> Basic Ageing
				<input type="checkbox"/> Glass reflector – Aenor Draft
				<input type="checkbox"/> Aluminum reflector: Coastal – SolarPACES Guideline v1.1
				<input checked="" type="checkbox"/> Aluminum reflector: Desert – SolarPACES Guideline v1.1
				<input type="checkbox"/> Aluminum reflector: Extreme Desert – SolarPACES Guideline v1.1
				<input type="checkbox"/> Advanced Ageing
				<input type="checkbox"/> Glass reflector
				<input type="checkbox"/> Aluminum reflector: Coastal – SolarPACES Guideline v1.1
				<input type="checkbox"/> Aluminum reflector: Desert – SolarPACES Guideline v1.1
				<input type="checkbox"/> Aluminum reflector: Extreme Desert – SolarPACES Guideline v1.1
				<i>Additional Tests</i>
				<i>Small reflector samples</i>
				<input type="checkbox"/> Neutral Salt Spray (NSS) - ISO 9227
				<input type="checkbox"/> Copper-accelerated acetic acid salt spray (CASS)- ISO 9227
				<input type="checkbox"/> Condensation - ISO 6270-2
				<input type="checkbox"/> Damp Heat - IEC 62108 (section 10.7b)
				<input type="checkbox"/> Combined thermal cycling and humidity
				<input type="checkbox"/> Sample UV-Light Stability / Humidity ISO 11507
				<input type="checkbox"/> UV/Humidity - ISO 16474-3
				<input type="checkbox"/> Cyclical temperature and humidity tests - AENOR draft
				<input type="checkbox"/> Thermal cycling - IEC 62108 (Test 10.6 TCA3)
				<input type="checkbox"/> Combined thermal cycling and Damp Heat - IEC 62108 (Test 10.6 TCA3 + Test 10.7b)
				<input type="checkbox"/> Combined thermal cycling and NSS - IEC 62108 (Test 10.6 TCA3) + ISO 9227
				<input type="checkbox"/> Sand erosion Test dust - ISO 12103-1 A4 coarse
				<input type="checkbox"/> Kesternich Test - DIN 50018
				<input type="checkbox"/> Miscellaneous

Abbildung 65: Beispiel für die Zusammenfassung einer durchgeführten Produktprüfung in einem standardisierten QUARZ Prüfbericht für den scope level für Reflektoren

Eine ausführliche Zusammenfassung zum QUARZ Siegel wird im Paper „Introduction of DLR QUARZ Scope Assessment Label for Independent Product Tests of CSP Key Components“ gegeben, welches auf der SolarPACES Konferenz 2017 vorgestellt und in den AIP Conference Proceedings veröffentlicht wurde.²⁰

II.1. AP 5 Dokumentation der Forschungsergebnisse

Die Arbeiten in AP 5 fanden dem Projektfortschritt entsprechend statt und fließen in die vorherigen Arbeitspakete ein. Die resultierenden Veröffentlichungen sind in Abschnitt II.5. „Veröffentlichungen der Ergebnisse“ aufgezählt.

²⁰ Happich, Christoph und Fernandez-Garcia, Aranzazu und Lüpfer, Eckhard und Pernpeintner, Johannes und Schiricke, Björn und Sutter, Florian (2018); *Introduction of DLR QUARZ Scope Assessment Label for Independent Product Tests of CSP Key Components*; SolarPACES 2017, AIP Conference Proceedings 2033, 230005 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5067233>

II.2. Zahlenmäßiger Nachweis

In Tabelle 15 und Tabelle 16 sind die wesentlichen Posten des zahlenmäßigen Nachweises dargestellt.

Tabelle 15: Gesamtvorhabenskosten gemäß Vorkalkulation und zahlenmäßigem Nachweis

Kostenart	Vorhabenskosten laut Vorkalkulation	tatsächlich entstandene und abgerechnete Vorhabenskosten
0813 Material	177.702,70 €	108.850,57 €
0837 Personalkosten	1.503.399,00 €	1.572.836,92 € ²¹
0838 Reisekosten	19.274,00 €	13.701,72 €
0847 vorhabensspezifische Abschreibungen	57.712,30 €	55.097,47 €
0850 sonstige unmittelbare Vorhabenskosten	149.514,00 €	138.994,68 €
Summe	1.907.602,00 €	1.889.481,36 €

Tabelle 16: Übersicht über die vorhabensspezifischen Anlagen (Pos. 0847)

lfd. Nr.	Bezeichnung	Anzahl	Einzelpreis in € geplant	Einzelpreis in € IST	Differenz
1	Datenerfassung	1	7.426,00	6.591,47	834,53
2	DMS-Messmodul	1	2.055,50	1.696,22	359,28
3	Padpositions-Adapter	1	730,00	382,69	347,31
4	Projektor mit Zubehör	1	2.753,00	2.617,45	135,55
5	Projektorobjektiv	1	911,00	860,00	51,00
6	Spiegelhalterahmen	1	8.000,00	7.801,35	198,65
7	Wellen-Wasserwaage	1	262,00	0,00	262,00
8	Parallel-Endmaß	1	142,00	0,00	142,00
9	Anschlagwinkel	1	152,00	199,73	-47,73
10	Tachymeterzubehör	1	814,50	573,25	241,25
11	UV-Testkammer	1	11.500,00	11.446,40	53,60
12	Sunlamp	1	334,00	341,04	-7,04
13	Vakuumofen	1	12.510,00	12.510,00	0,00
14	Coriolissensor	1	7.499,00	7.499,00	0,00
15	Differenzdrucktransmitter	1	858,30	849,17	9,13
16	Heizleiter	1	1.765,00	1.729,70	35,30
			57.712,30	55.097,47	2.614,83

²¹ Hierbei handelt es sich um den Wert des vorläufigen Verwendungsnachweises vom 07.09.2018.

II.3. Nutzen, Verwertbarkeit, Erfahrungen

Die im Rahmen des Projektes erarbeiteten beziehungsweise fortentwickelten Teststände und Prüf- und Berechnungsmethoden tragen dazu bei, Qualitätskriterien für solarthermische Kraftwerkskomponenten weiter zu etablieren und damit Risiken und Kosten der Technologie signifikant zu senken.

Am Ende des Projektes stehen neue und erweiterte Teststände, Prüf- und Berechnungsmethoden zur Verfügung, die die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Schlüsselkomponenten solarthermischer Parabolrinnenkraftwerke umfassend bewerten können. Diese werden der Industrie zu unabhängigen Produktprüfungen und für Produktvergleiche angeboten. Dies ermöglicht einerseits den Herstellern die Qualität ihrer Produkte zu belegen, sowie andererseits die Auswahl der am besten geeigneten Komponenten für Generalunternehmer und Kraftwerksprojektierer. Für KMU oder neu in die Technologie einsteigende Industriepartner können Dienstleistungen zur Komponentenbeurteilung, sowie zur Unterstützung in Forschung und Entwicklung innovativer Produkte angeboten werden.

Die unabhängige Prüfung der Komponenten ist ein wesentlicher Beitrag zu nachhaltiger Qualität der Produkte. Der Nutzen für Investoren, Projektierer, Generalunternehmer und Betreiber von solarthermischen Kraftwerken besteht in der weiteren Etablierung von Qualitätsanforderungen und internationalen Standards für Komponenten in Ausschreibungen, so dass Risiken und Kosten weiter gesenkt werden können.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse wurden auf wissenschaftlichen Konferenzen und in Zeitschriften der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Die Netzwerke des DLR zur Industrie und zu nationalen und internationalen F&E-Partnern wurden genutzt, um die Ergebnisse vorzustellen, zu diskutieren und Erkenntnisse auszutauschen. Wichtige Foren dafür waren zum Beispiel die jährlich stattfindenden SolarPACES-Workshops, sowie die Gremien bei AENOR und bei IEC TC 117 bzw. dem Spiegelkomitee DKE K374.

Die resultierenden Richtlinien, Normentwürfe sowie Normen, die hieraus entstanden sind, sind in Abschnitt II.4. „Fortschritt anderer Stellen“ und resultierende Veröffentlichungen sind in Abschnitt II.4. „Veröffentlichungen des Ergebnisses“ dargestellt.

Die im Rahmen des Projektes entwickelten Teststände und Prüf- und Berechnungsmethoden können in Zukunft für weitere Forschungs- und Entwicklungsvorhaben auf dem Gebiet der Qualifizierung solarthermischer Kraftwerkskomponenten genutzt werden. Sie können Anwendung finden in der Bewertung von Komponenten mit modifizierter Geometrie oder neuer Produktentwicklungen.

Des Weiteren werden die wissenschaftlichen Erfahrungen und Erkenntnisse nach Möglichkeit weiterhin kontinuierlich in Standardisierungs- und Normungsaktivitäten einfließen.

Ein wirtschaftliches Anschlussvorhaben könnte ebenfalls die Vermarktung der entwickelten Teststände und Methoden für den Einsatz in der Qualitätskontrolle während der Produktion bei Herstellern solarthermischer Kraftwerkskomponenten sein.

II.4. Fortschritt anderer Stellen

Das spanische Standardisierungskomitee UNE (Subkomitee AEN / CTN206 / SC117) hat im März 2018 einen Standard zur Qualifizierung von Spiegelpanels veröffentlicht (UNE 206016:2018), an dessen inhaltlicher Ausarbeitung das DLR maßgeblich beteiligt war. Es handelt sich um den ersten Standard, der speziell für Spiegel von solarthermischen Kraftwerken entwickelt wurde. Obgleich er derzeit nur in spanischer Sprache erhältlich ist, stellt er einen wichtigen ersten Schritt in Richtung Vergleichbarkeit der am Markt erhältlichen Spiegel dar. In der Vergangenheit wurden Spiegel mit Hilfe von Standards qualifiziert, die für andere Industriezweige (z.B. Glas-, PV- oder Automobilindustrie) entwickelt wurden. In seiner jetzigen Form beinhaltet die Norm jedoch keine Akzeptanzkriterien für die definierten Alterungstests, weshalb die Aussagekraft der Testergebnisse nur gering ist. Diese Norm soll daher in den nächsten zwei Jahren noch verbessert werden, bevor sie bei der IEC als Entwurf einer internationalen Norm vorgeschlagen werden soll.

Für Parabolrinnenreceiver wurde innerhalb der IEC, mit nennenswerter inhaltlicher Unterstützung des DLR, ein offizieller Normentwurf für thermische und optische Tests (IEC Technical Specification TS 62862-3-3) verabschiedet, über den im April 2019 abgestimmt wird.

In den Jahren 2015 und 2016 fand eine internationale Vergleichskampagne (Round Robin Test) ähnlicher Receiver-Prüfstände im Rahmen des EU-Projektes STAGE-STE statt. Dabei zeigte ein Vergleich der Ergebnisse systematische Abweichungen, die die angegebenen Messunsicherheiten teilweise deutlich übersteigen und deren Ursachen bislang noch nicht geklärt werden konnten. Da seitdem kein systematischer Vergleich mehr stattgefunden hat ist uns über die Verbesserungen an anderer Stelle nichts bekannt. Es besteht aus unserer Sicht weiterhin der Bedarf an technisch/wissenschaftlichen Untersuchungen, um fundierte Grundlagen für normative Messvorschriften zu erzielen, so dass die Norm genaue Messungen gewährleistet.

II.5. Veröffentlichungen der Ergebnisse

Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Konferenzbänden:

Sallaberry, F.; Fernández-García, A.; Lüpfert, E.; Morales, A.; San Vicente, G.; Sutter, F. (2017): *Towards Standardized Testing Methodologies for Optical Properties of Components in Concentrating Solar Thermal Power Plants*; SolarPACES 2016, AIP Conference Proceedings 1850, 150004 (2017); <https://doi.org/10.1063/1.4984533>

Happich, C.; Janotte, N.; Pernpeintner, J.; Schiricke, B.; Lüpfert, E. (2018): *Second generation linear focus sun simulator to test optical performance of parabolic trough receivers – OptiRec*; SolarPACES 2017, AIP Conference Proceedings 2033, 030007 (2018); doi: 10.1063/1.5067023

Happich, C.; Fernandez-Garcia, A.; Lüpfert, E.; Pernpeintner, J.; Schiricke, B.; Sutter, F. (2018): *Introduction of DLR QUARZ Scope Assessment Label for Independent Product Tests of CSP Key Components*; SolarPACES 2017, AIP Conference Proceedings 2033, 230005 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5067233>

Wette, J.; Sutter, F.; Fernández-García, A.; Lahlou, R.; Armstrong, P. (2018): *Standardizing Accelerated Aging Testing Conditions for Silvered-Glass Reflectors*; SolarPACES 2017, AIP Conference Proceedings 2033, 230014 (2018); doi: 10.1063/1.5067242

Caron, S.; Röger, M.; Pernpeintner, J. (2018): *Heat Flux and Temperature Measurements on Glass Envelope and Bellows of Parabolic Trough Receivers*; SolarPACES 2017; AIP Conference Proceedings 2033, 030004 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5067020>

Messvorschriften und –richtlinien, Beiträge zu Normen und Büchern

Sutter, F.; Wette, J.; Fernández-García, A.; Ziegler, S.; Dasbach, R. (2016): *Accelerated aging testing of aluminum reflectors for concentrated solar power. Version 1.1.*; SolarPACES Guideline; SolarPACES: Almería, Spain, August 2016

Heller, P. et al: *The Performance of Concentrated Solar Power (CSP) Systems*, Woodhead ISBN: 978-0-08-100447-0, 2017: Kapitel 6, Tabelle 6.4

UNE 206016:2018, Norm, Reflector panels for concentrating solar technologies

Dissertationen:

S. Schneider, S. (2017): *Influences of Mirror Shape Accuracy on Performance Prediction for Parabolic Trough Concentrating Solar Power Systems*; Dissertation, RWTH Aachen, 2017

Pernpeintner, J. (2019): *Optical Efficiency Measurement in Solar Simulators of Receivers for Parabolic Trough Solar Thermal Power Plants*; Dissertation, RWTH Aachen, im Druck

Abschlussarbeiten

Lütge, J. (2016): *Implementierung einer neuen Messmethodik am Sonnensimulatorprüfstand mit linearem Fokus der zweiten Generation*; Bachelorarbeit, Universität Duisburg Essen

Häberle, E. (2017): *Entwicklung und Aufbau des Wärmeträgerkreislaufs eines Sonnensimulatorprüfstands zur kalorimetrischen Bestimmung des optischen Wirkungsgrades von Parabolrinnenreceivern*; Bachelorarbeit, Hochschule Düsseldorf.

Nießen, T. (2017): *Entwicklung, Konstruktion und Aufbau eines Radiometers für einen Linearfokus-Sonnensimulator*; Bachelorarbeit, TH Köln.

Sonstige Veröffentlichungen:

Schneider, S.; Schiricke, B.; Lüpfert, E.; Saal, J. (2016): *Strukturmechanische Simulation von Parabolrinnenkollektoren: Spiegelverformungen und ihr Einfluss auf den Kraftwerksertrag*; Poster, 19. Kölner Sonnenkolloquium, DLR, 2016

Happich, C.; Janotte, N.; Pernpeintner, J.; Scharf, E. (2017): *OptiRec - 2nd generation sun simulator for the characterization of optical efficiency of parabolic trough receivers*, Poster, 20. Kölner Sonnenkolloquium, DLR, 2017

Happich, C.; Janotte, N.; Pernpeintner, J.; Scharf, E. (2017): *Introduction of DLR QUARZ® scope assessment label for independent product tests of CSP key components*, Poster, 20. Kölner Sonnenkolloquium, DLR, 2017