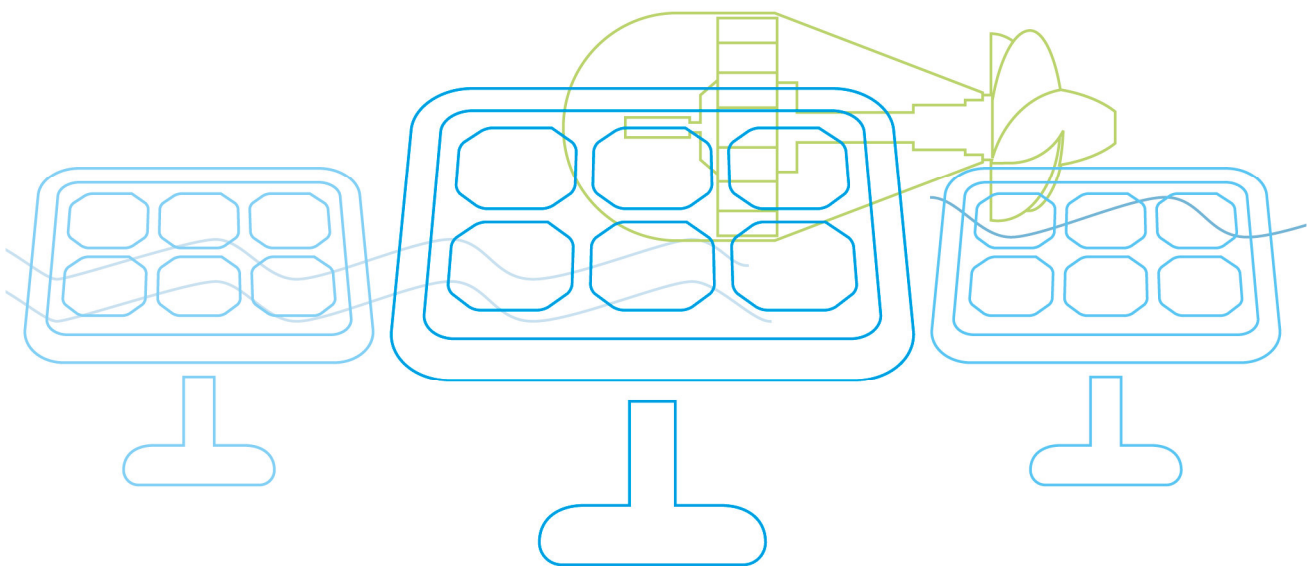




MasterCPC

Neue Verfahren zur Entwicklung leistungsfähiger Mitteltemperaturkollektoren am Beispiel stationärer CPC-Kollektoren



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A handwritten signature in black ink, reading 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, reading 'Ingmar Höbarth'.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

Inhalt

1	Technisch-wissenschaftliche Beschreibung der Arbeit	2
1.1	Projektabriss	2
1.2	Ausgangssituation/Motivation des Projektes	3
1.3	Zielsetzungen des Projektes	5
1.4	Durchgeführte Arbeiten und Beschreibung der Ergebnisse	6
1.4.1	Experimentelle Methoden (AP2)	6
1.4.2	Theoretische Methoden und Modellentwicklung (AP3)	16
1.4.3	Assemblierung von Mitteltemperatur-CPC-Funktionsmustern (AP4)	22
1.4.4	Analyse der Mitteltemperaturfunktionsmuster (AP5)	36
2	Publikationen	47
3	Ausblick.....	50

1 Technisch-wissenschaftliche Beschreibung der Arbeit

1.1 Projektabriss

Dem jüngsten Klimaschutzbericht des Umweltbundesamtes zufolge, kann Österreich seine Klimaziele, eine Reduktion der CO₂ Emission von 16% bis 2020, nur dann erreichen, wenn mit mehr Ehrgeiz und zusätzlichen Anstrengungen an der Erreichung der Zielsetzung gearbeitet wird. Ein Bereich, der sich für Maßnahmen zur Reduktion anbietet, ist die Industrie, die nahezu ein Drittel der Treibhausgasemissionen verursacht. Eine Möglichkeit zur Emissionsreduktion ist die verstärkte Integration von Erneuerbaren Energiequellen wie z.B. der Sonne via thermische Kollektoren. Von besonderem ökologischem als auch ökonomischem Interesse für österreichische Kollektorhersteller, die seit Jahren weltweit innovative Lösungen anbieten, ist dabei die Erschließung der Bereiche industrielle Prozesswärme sowie solare Klimatisierung. Trotz einiger Forschungsanstrengungen in den letzten Jahren befindet sich die dafür notwendige Technologie noch in den Kinderschuhen. Die größte Herausforderung, der sich die Kollektorhersteller gegenüber sehen, ist der geringe Wirkungsgrad (20 bis 35%) der Kollektoren in dem, für die meisten Mitteltemperatur-anwendungen notwendigen, Temperaturniveaubereich von 100 bis 150°C. Mangels der Möglichkeit einer detaillierten Analyse der Wärmeverluste, ist es in den aktuellen Pilotprojekten gängige Praxis, in einer Art Trial and Error Verfahren oftmals kostspielige Verbesserungen in der Kollektorphysik sowie den verwendeten Materialien vorzunehmen, um damit den Wirkungsgrad zu erhöhen. Viele dieser Änderungen finden nicht Eingang in die Produktion der Mitteltemperaturkollektoren, da auf Seiten der Kollektorhersteller Zweifel am Kosten-Nutzen-Verhältnis dieser Neuerungen besteht. Um in Zukunft den Einfluss verschiedener Konzepte, Designs und Komponenten auf den Wirkungsgrad der Kollektoren quantifizieren zu können, werden im Projekt *MasterCPC* neue experimentelle Methoden und vorgeschrittene theoretische Modelle erarbeitet, angewendet und hinsichtlich ihres Einflusses auf die Kollektorleistung untersucht. Man konzentriert sich dabei auf den CPC Kollektor, der sich aufgrund seines speziellen Designs besonders gut für den angestrebten Mitteltemperaturbereich eignet. Das im Projekt erarbeitete Portfolio an Mess- und Simulationsmethoden erlaubt in Zukunft eine wissenschaftlich fundierte Analyse der Auswirkungen von Neuerungen aller Art an Kollektoren. Damit wird die österreichische Kollektorindustrie die Möglichkeit erhalten, eine weit detailliertere als bisher, auf ihre Bedürfnisse zugeschnittene, Analyse ihrer thermischen Sonnenkollektoren durch ein österreichisches Institut durchführen zu lassen. Der Industriepartner, die Firma Solarfocus, kann darauf aufbauend mittelfristig gezielt einen optimierten Mitteltemperaturkollektor entwickeln und damit interessante Märkte erschließen.

Im Zuge der Arbeiten konnten alle notwendigen theoretischen und experimentellen Methoden, die zur Entwicklung von Mitteltemperaturkollektoren notwendig sind (zumindest aus heutiger Sicht), entwickelt werden.

Auf der experimentellen Seite bedeutet dies, dass alle thermischen (Wärmeleitfähigkeit, spez. Wärme, therm. Dehnung, Temperaturleitfähigkeit, therm. Beständigkeit inkl. Ausgasung) und optischen (Absorption, Reflexion, Transmission, Emissivität) Materialeigenschaften sämtlicher Komponenten im

relevanten Temperaturbereich vermessen werden können. Auf der theoretischen Seite konnte eine Simulationsumgebung mit entsprechenden Modellen (auf Basis von ANSYS Fluent sowie eigenem Ray-Tracer) entwickelt werden, die ein vollständiges Design und eine vollständige Berechnung sämtlicher Wärmeströme und –verluste in Kollektoren vollständig transient in 3d erlaubt. Insbesondere in nicht-trivialen Geometrien konnte gezeigt werden, dass 2d Berechnungen zu falschen Ergebnissen führen und stationäre Berechnungen ebenfalls mit Fehlern behaftet sind.

Auf dem Gebiet der Leistungsvermessung von Mitteltemperaturkollektoren konnte ein in Österreich einzigartiger Prüfstand entwickelt und erprobt werden, der eine Vermessung von Kollektoren bis 220°C und 15kW Verlustleistung erlaubt. Zudem wurde mit der quasi-dynamischen Messmethode ein entsprechend umfangreicheres und damit aussagekräftigeres Modell zur Charakterisierung von Mitteltemperaturkollektoren implementiert.

Die entwickelten Methoden konnten anhand von mehreren Mitteltemperatur-CPC-Funktionsmustern erprobt werden. Die erzielten Ergebnisse zeigten klare Wege zur Minimierung der Wärmeverluste sowie Anforderungen an eine zukünftige Serienproduktion der Kollektoren auf. Insbesondere sind die Weiterentwicklung einer qualitativ höherwertigen Fertigung sowie einem fertigungsfehlertolerantem Design notwendig. Wesentlich sind zudem Weiterentwicklungen auf Material- und Designseite um die Kollektorkosten zu senken, insb. in einer Serienfertigung.

Als breiterer Ausblick bleibt die stetige Weiterentwicklung auf methodischer Seite insbesondere in Richtung (großer) Kollektorfelder und der Erschließung von entsprechenden Anwendungsfeldern für solare Wärme auf Mitteltemperaturniveau (insb. solare Prozesswärme, Fernwärme). Ebenso müssen die anderen notwendigen Komponenten für solche Systeme weiterentwickelt werden, wobei thermische Speicher an vorderster Stelle zu nennen sind.

1.2 Ausgangssituation/Motivation des Projektes

Dem jüngsten Klimaschutzbericht des Umweltbundesamtes zufolge, kann Österreich seine Klimaziele, eine Reduktion der CO₂ Emission von 16% bis 2020, nur dann erreichen, wenn mit mehr Ehrgeiz und zusätzlicher Anstrengungen an der Erreichung der Zielsetzung gearbeitet wird. Ein Bereich, der sich für Maßnahmen zur Reduktion anbietet, ist die Industrie. Sie verbraucht derzeit rund ein Drittel der Primärenergie und stellt mit 25,3 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten bzw. einem Anteil von rund 27,8 % Anteil an den Gesamtemissionen im Jahr 2006 den größten Verursacher von Treibhausgas (=THG)-Emissionen dar. Hauptverursacher sind dabei die energie- und prozessbedingten CO₂-Emissionen aus der Eisen- und Stahlerzeugung, Prozessemissionen aus der Mineralverarbeitenden und der Chemischen Industrie sowie Emissionen aus dem Energieverbrauch der übrigen Industriebranchen Papier- und Zellstoffindustrie, Chemie, Nahrungs- und Genussmittel, Bau sowie der Mineralverarbeitenden Industrie.¹

¹ Umweltbundesamt, Klimaschutzbericht 2008, Wien 2008

Eine Möglichkeit zur Reduktion der THG-Emissionen der Industrie ist die verstärkte Integration von Erneuerbaren Energiequellen wie z.B. der Sonne via thermische Kollektoren. Dieser Ansatz bietet sich insofern an, als österreichische Unternehmen der Kollektorindustrie als Pioniere gelten und seit Jahren mit innovativen Lösungen weltweit tätig sind. Obwohl die Bereiche industrielle Prozesswärme sowie solare Klimatisierung aufgrund ihres enormen Potenzials in den vergangenen Jahren verstärkte öffentliche Aufmerksamkeit erregt haben, befinden sich beide noch in den Anfängen. So wurden in ganz Europa bisher nur je rund 100 – 200 Pilotanlagen errichtet, wobei dabei vor allem konventionelle Komponenten, wie sie in der Klima- bzw. Prozesstechnik Anwendung finden, eingesetzt wurden. Kaum eine dieser Anlagen ist hinsichtlich solartechnischer Erfordernisse optimiert. Darüber hinaus haben diese Anlagen ein erhebliches Verbesserungspotenzial bezüglich der Gesamtenergiebilanz. In zahlreichen nationalen und internationalen Forschungsprojekten werden derzeit verbesserte Komponenten und Systeme entwickelt. Ein besonders interessanter Bereich in diesem Zusammenhang ist die Erschließung des mittleren Temperaturniveaus, zwischen 80°C und 250°C, in dem der größte Teil des industriellen Bedarfs besteht. Trotz einiger Forschungsbemühungen befindet sich dieser Teilbereich nach wie vor in einem sehr frühen Entwicklungsstadium. Insbesondere gibt es noch keine Produkte im industriellen Maßstab.²

Die größte Herausforderung, der sich Hersteller von Mitteltemperaturkollektoren gegenüber sehen, ist der geringe Wirkungsgrad (20 bis 35%), der Kollektoren in dem für die meisten Mitteltemperaturanwendungen notwendigen Temperaturniveaubereich von 100 bis 150°C.

Trotz einiger Forschungsanstrengungen konnte bis dato nicht geklärt werden, wie sich diese enormen Wärmeverluste, die sich aus Konvektions-, Wärmeleitungs- und Strahlungsverlusten ergeben, bei den unterschiedlichen, erhöhten Betriebstemperaturen genau zusammensetzen. In den aktuellen Pilotprojekten ist es daher gängige Forschungspraxis, in einer Art Trial and Error Verfahren oftmals kostspielige Verbesserungen in der Kollektorphysik (evakuierter Kollektor, Doppelverglasung) sowie den verwendeten Materialien (neue Folien, neue Isolierungen, etc.) vorzunehmen, um damit den Wirkungsgrad zu erhöhen.

Viele der in Pilotprojekten zum Einsatz kommenden Änderungen an den Kollektoren finden derzeit nicht Eingang in die Produktion der Mitteltemperaturkollektoren, da auf Seiten der Kollektorhersteller Zweifel am Kosten-Nutzen-Verhältnis der Neuerungen besteht.

Um in Zukunft den Einfluss verschiedener Konzepte, Designs und Komponenten auf den Wirkungsgrad der Kollektoren quantifizieren zu können, sollen im Projekt „MasterCPC“ neue experimentelle Methoden und vorgeschrittenen theoretischen Modelle erarbeitet, angewendet und hinsichtlich ihres Einflusses auf die Kollektorleistung untersucht werden.

² Solares Heizen und Kühlen für eine nachhaltige Energiezukunft in Europe: Vision, Potenzial, Entwicklungsplan, Strategische Forschungsagenda, European Solar Thermal Technology Plattform, 2008

Bezüglich der im IEA Task 33 - Solar Heat for Industrial Processes – vorgeschlagenen unterschiedenen Typen an Mitteltemperaturkollektoren wird man sich dabei auf einen non-imaging concentrating collector oder kurz CPC Kollektor konzentrieren, da sich diese Art aufgrund des speziellen Designs (Flachbauweise, leichte Konzentrierung, keine Nachführung), wie sich in ersten Ergebnissen von Forschungsprojekten bei AO SOL, ZAE sowie Solarfocus gezeigt hat, besonders gut für den angestrebten Mitteltemperaturbereich eignet.

1.3 Zielsetzungen des Projektes

Das Hauptziel des Projekts *MasterCPC* ist die Erarbeitung von experimentellen und theoretischen Methoden zur Untersuchung und Entwicklung von Mitteltemperaturkollektoren unter besonderer Berücksichtigung von stationären CPC-Kollektoren.

Dieses Ziel soll durch die Erfüllung folgender Unterziele erreicht werden:

1. Entwicklung und Erprobung von vorgeschrittenen experimentellen Methoden zur Charakterisierung von Mitteltemperaturkollektoren, wie
 - Methoden zur Analyse der thermischen und optischen Materialeigenschaften relevanter Materialien.
 - Methoden zur Analyse der Gesamtwärmeverluste und deren Aufschlüsselung nach physikalischem Mechanismus.
 - Methoden zur Ermittlung der Leistung von Mitteltemperatur-CPC-Kollektoren im gesamten Betriebsbereich
2. Entwicklung von nachfolgend angeführten theoretischen Simulationsmodellen, um ein möglichst vollständiges Verständnis der physikalischen Vorgänge in einem thermischen Kollektor zu erhalten:
 - Modellierung der Strahlungsphänomene (Sonnenlicht, Wärmestrahlung)
 - Modellierung der Konvektionsphänomene (natürliche und erzwungene Konvektion, Turbulenz)
 - Modellierung der Wärmeleitungsphänomene (Absorber, Rahmen, Fluid)
 - Modellierung strukturmechanischer Phänomene (thermische Ausdehnung)
3. Eingehende Analyse von CPC-Funktionsmustern durch Anwendung obiger Modelle
Insbesondere werden dabei folgende Punkte erarbeitet:
 - Identifikation der geeigneten Kollektormaterialien für einen Mitteltemperatur-CPC-Kollektor
 - Identifikation der notwendigen, und hinsichtlich Kosten und Nutzen sinnvollen, neuen Komponenten für einen Mitteltemperatur-CPC-Kollektor

Die Ergebnisse dieser umfangreichen Analyse ermöglichen der Fa. Solarfocus im Anschluss die Entwicklung eines Prototyps, und darauf basierend, die gezielte Entwicklung von optimierten Mitteltemperaturkollektoren und damit die Erschließung neuer, ökonomisch besonders attraktiver, Marktfelder wie Prozesswärmeanwendungen und Solares Kühlen.

Das im Projekt entwickelte Portfolio an Mess- und Simulationsmethoden wird eine wissenschaftlich fundierte Analyse der Auswirkung von Neuerungen am Kollektor aller Art (neue Kollektorkomponenten sowie Kollektormaterialien) ermöglichen. Damit wird die österreichische Kollektorindustrie die Möglichkeit erhalten, eine weit detailliertere als bisher, auf ihre Bedürfnisse zugeschnittene, Analyse ihrer thermischen Sonnenkollektoren durch ein österreichisches Institut durchführen zu lassen.

1.4 Durchgeführte Arbeiten und Beschreibung der Ergebnisse

1.4.1 Experimentelle Methoden (AP2)

Vorwort zur Neuordnung des Projektkonsortiums:

Im Zuge der internen Umstrukturierung des AIT (ehem. arsenal research und Forschungszentrum Seibersdorf), wurde bereits kurz vor Beginn des Projekts der „Thermophysik-Teil“ der ehem. AMAT-Abteilung des Forschungszentrum Seibersdorfs, in das Energy Department des AIT eingegliedert.

Die damit zur Verfügung stehenden thermophysikalischen Charakterisierungsmethoden wurden im Projekt MasterCPC erstmals auf solarthermische Kollektormaterialien angewandt und legten u.a. die Grundlage für genaue 3D-Kollektorsimulationen mit tatsächlich gemessenen Materialparametern.

AP 2.1: Materialanalyse

Die Materialuntersuchungen bilden einerseits die Grundlage zur Analyse des Ist-Statuses des Kollektors und liefern andererseits die für die Simulationen notwendigen Eingangsgrößen. Besonders letzterer Punkt ist entscheidend, da die Datenblätter von Herstellern entweder zu ungenau oder unvollständig (der interessante Parameterbereich (Temperatur, Wellenlänge) ist oft nicht angegeben bzw. fehlen viele Materialeigenschaften vollständig). Leider werden stattdessen oft Literaturwerte angenommen, welche aber oft beträchtlich von den tatsächlichen abweichen.

Die „funktionellen Hauptkomponenten“ des Serien-CPCs (Fig. 1) wurden vermessen (insbesondere Sammelrohr, Absorberrohr, Absorberfinne, Spiegel, Glasabdeckung). Zusätzlich wurden Analysen an Materialien für die verbesserten Prototypen durchgeführt, da bereits vor Projektbeginn (u.a. aus Vorprojekten und Kollektorprüfungen (Solar Keymark), der Literatur oder einfachen physikalischen Überlegungen) klar war, dass die Wärmeverluste sowohl nach hinten als auch nach vorne zu hoch sind. Erstere können mit geeigneter Isolierung und zweitens u.a. mit Konvektionsbarrieren (z.B. hochtransparente Folien, Doppelverglasung) vermindert werden.

Exemplarisch ist in Abbildung 1 ein Ergebnis einer **Thermophysikmessung** dargestellt, welche u.a. zeigt, dass die Werte (Temperaturleitfähigkeit, thermische Dehnung, spezifische Wärme,

Wärmeleitfähigkeit) für das verwendete Kupfer weit von Reinkupfer entfernt liegen. Insbesondere wenn es um Materialeinsparungen des teuren Kupfers geht, ist es unbedingt notwendig die genauen Eigenschaften auch unabhängig vom Hersteller analysieren zu können, da mitunter eine billigere Kupferlegierung sehr viel schlechtere Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit) aufweisen kann und somit kontraproduktiv sein kann.

Im finalen Funktionsmuster (in Zukunft PT2013 genannt) wurde beim Absorber völlig auf Kupfer verzichtet. Einerseits wurde dies durch die erhöhten Materialanforderungen aufgrund der höheren Kollektorbetriebs- und stagnationstemperaturen motiviert und durch die neue Spiegelform ermöglicht (die neue Spiegelform konzentriert das Licht auf einen kleineren Bereich, der mit einem runden Absorberrohr abgedeckt werden kann und keine zusätzlich „Lichteinfangfläche“ in Form einer Finne benötigt), andererseits ist Kupfer ein relativ teures Material, weshalb der Umstieg auf spezielle Stahllegierungen zusätzlich Sinn macht.

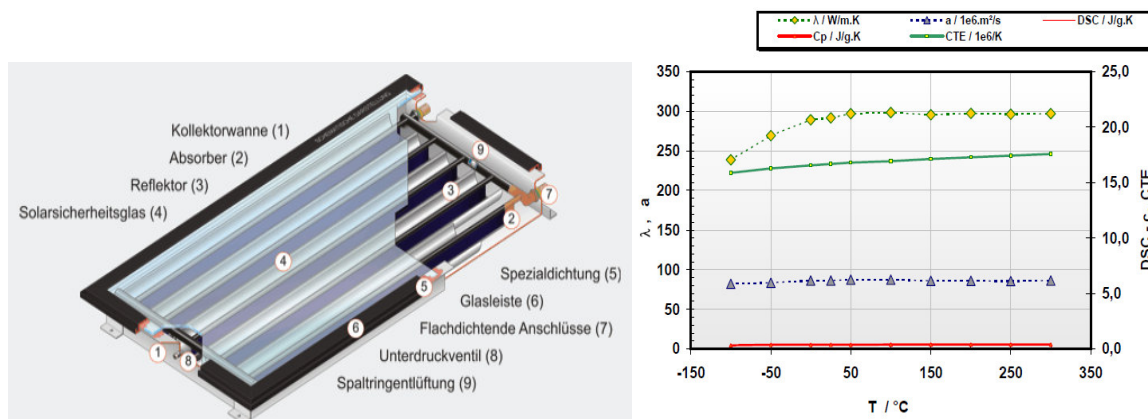


Abbildung 1: Links: Schema des momentanen CPC-Kollektors von Solarfocus. Rechts: gemessene thermophysikalische Eigenschaften der Sammelrohre (Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit, spezifische Wärme, thermische Dehnung)

Abbildung 2 (links) zeigt exemplarisch die Thermogravimetrie (TGA) an einem Isolierschaum. Mittels TGA lässt sich die thermische Beständigkeit von Materialien analysieren, was insb. für Mitteltemperaturkollektoren wichtig ist, da hier im Vergleich zu konventionellen Flachkollektoren höhere Betriebs- und Stagnationstemperaturen auftreten. Neben der thermischen Beständigkeit ist die Analyse von möglichen Ausgasungen (welche sich u. U. am Glas oder Absorber niederschlagen können und zu Leistungsminderung und/oder Schädigungen führen können) notwendig, um entsprechende Isoliermaterialien für Mitteltemperaturkollektoren auswählen zu können. Am AIT gibt es die Möglichkeit die Ausgasungen mittels spektroskopischen Methoden bei unterschiedlichen Temperaturen detailliert zu analysieren. Dazu werden ein FTIR-Spektrometer und ein Quadrupol-Massenspektrometer an die Thermowaage gekoppelt und die Ausgasungsprodukte chemisch analysiert. Abbildung 2 (rechts) zeigt exemplarisch ein FTIR-Spektrum (z-Achse ist proportional zur Proben temperatur), bei dem man sieht, dass ab einer gewissen Temperatur „Ausgasungen“ in diesem Material (PU-Schaum) auftreten.

Die Suche nach geeigneten Isoliermaterialien für die verbesserten Prototypen und gab u.a. den Anstoß für eine viel weitreichendere Analyse von Isoliermaterialien in solarthermischen Anwendungen, welche in eine erfolgreiche FFG-Einreichung (siehe Highlight 3- Projekt ISOLAR) mündete.

Im zweiten Projektabschnitt wurde am AIT ein neues Verfahren zur Vermessung der Wärmeleitfähigkeit eingeführt und im Projekt MasterCPC auf Isoliermaterialien angewendet. In Abbildung 3 ist links der Messsensor der Transient Hot Bridge Methode (THB) sichtbar. Mit Hilfe dieser neuen Technik ist es möglich innerhalb weniger Minuten die Wärmeleitfähigkeit von Materialien in einem weiten Bereich (ca. 0.03 bis 20 W/mK, -40°C bis 200°C) zu bestimmen. Im gegenständlichen Projekt wurden verschiedene Isoliermaterialien untersucht und die geeignetsten ausgewählt. Das rechte Bild der Abbildung 3 zeigt den bereits zugeschnittenen PU-Schaum der Fa. Eurofoam (Greiner Gruppe), der für den finalen PT2013 verwendet wurde.

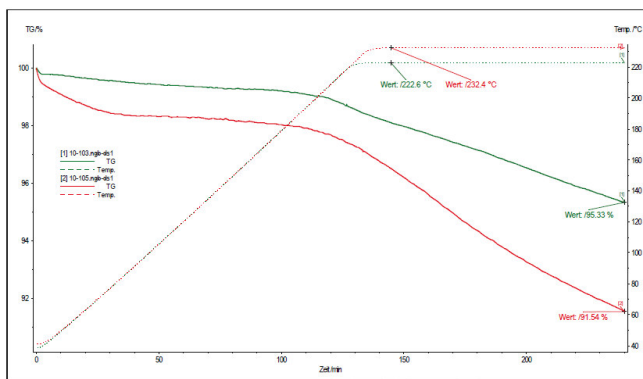


Abbildung 3: TGA des PU Schaums bei einer Heizrate von 2 K/min und einem zweistündigen Isothermsegment, durchgezogene Linie: TG Signal, punktierte Linie: Temperatur am Messsensor

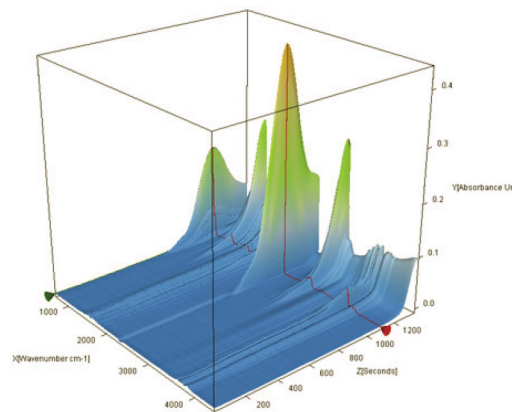


Abbildung 2: Links: Thermogravimetrie von Isolierschäumen zur Analyse der thermischen Beständigkeit. Rechts: zugehöriges FTIR Signal zur Analyse der Ausgasungsprodukte

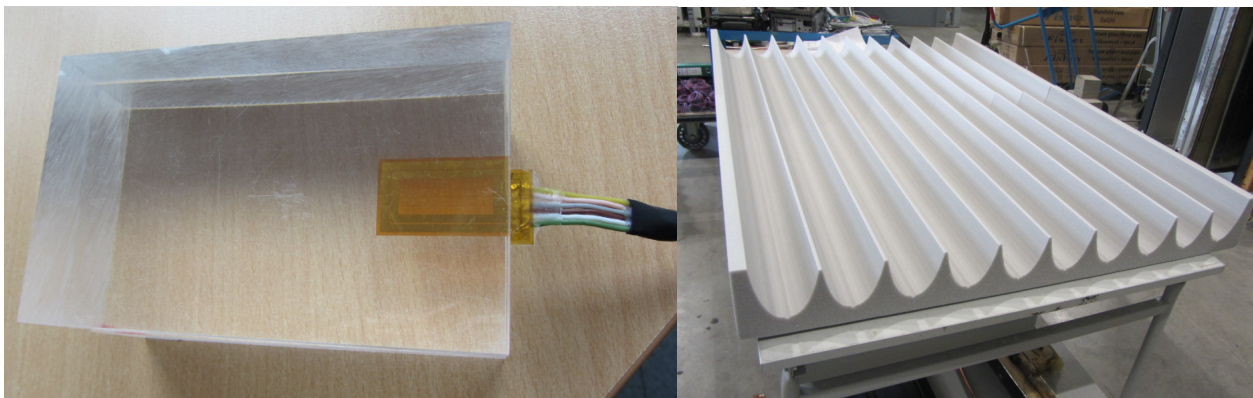


Abbildung 3: Links: THB-Sensor zur Vermessung der Wärmeleitfähigkeit. Rechts: speziell geformte Isolierung aus PU-Schaum, die im PT2013 verwendet wurde.

Zu Beginn des Projekts wurde am AIT ein neues FTIR-Spektrometer (Bruker Vertex 70) zur Analyse der solartechnisch relevanten optischen Eigenschaften erworben und in Betrieb genommen. Die Kenntnis der optischen Eigenschaften der unterschiedlichen Materialien stellt eine unbedingte Voraussetzung für jegliche Art der Kollektor(weiter)entwicklung dar. Dies gilt insbesondere für Mitteltemperaturkollektoren, da hier die optischen Anforderungen noch größer sind, als bei konventionellen Kollektoren. Im Folgenden sind für die wesentlichen Kollektorkomponenten und deren „Berührungspunkte“ mit optischen Phänomenen kurz stichwortartig festgehalten. Je nach gewünschter Kollektordesigngenauigkeit sind die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften in verschiedenerer Genauigkeit zu vermessen:

- Kollektorabdeckung (meist Glas (einfach, mehrfach), Folien): Gerichtete und diffuse Transmission (Stichwort prismiertes Glas) über das gesamte Sonnenspektrum; Transmission/Reflexion im Infrarot (Wärmeabstrahlung; vgl. anti-reflex- / low-e Beschichtung in PT2013 (unten)), Folien: (winkelabhängige) Transmission/Reflexion (Interferenz) im Solarspektrum als auch im IR (Wärmeabstrahlung)
- Spiegel: gerichtete, winkelabhängige Reflexion (nachgeführte (Parabol, Fresnel, etc.) vs. nicht nachgeführt Kollektoren (CPC))
- Absorber: Absorption im solaren Spektrum (gerichtet vs. diffus (vgl. konzentrierende Kollektoren vs. Flachkollektoren), temperaturabhängige Emissivität im Infrarotbereich (Datenblätter bzw. gängige Norm misst bei Raumtemperatur und rechnet via Stefan-Boltzmann auf 100°C; nicht geeignet für „Mitteltemperaturabsorber“))
- Rahmen (Seiten- und Rückwände): temperaturabhängige Emissivität, u. U. Absorption (vgl. Effizienz auf Brutto- vs. Aperturfläche)

Im Projekt MasterCPC konnten anhand von konkreten Messungen an Absorbern, Spiegeln, Folien und Gläsern das entsprechende methodische Know-How aufgebaut werden. Abbildung 4 zeigt exemplarische Messungen von konvektionsblockierenden, hochtransparenten Folien. Links oben ist das AM 1.5 Sonnenspektrum dargestellt. Links unten sieht man die senkrechte, gerichtete Transmission von 3 unterschiedlichen Folien im spektralen Bereich von ca. 300nm bis ca. 2500nm. Auffällig sind die auftretenden Interferenzmuster, die vor allem bei höheren Wellenlängen zum Tragen kommen (ein bekannter physikalischer Effekt, der in vielen Dünnschichtanwendungen techn. Verwendung findet (vgl. Newton'sches Farbenglas, Bragg Spiegel etc.)). Äußerst überraschend war in diesem Zusammenhang die starke Winkelabhängigkeit der Transmission der Folien, die mit Vorzugsrichtungen beim Herstellungsprozess von Folien zusammenhängen (Abbildung 4 rechts; bei diesen Messungen wurde natürlich berücksichtigt und „herausgerechnet“, dass der senkrechte Anteil des einfallenden Lichtes geringer ist).

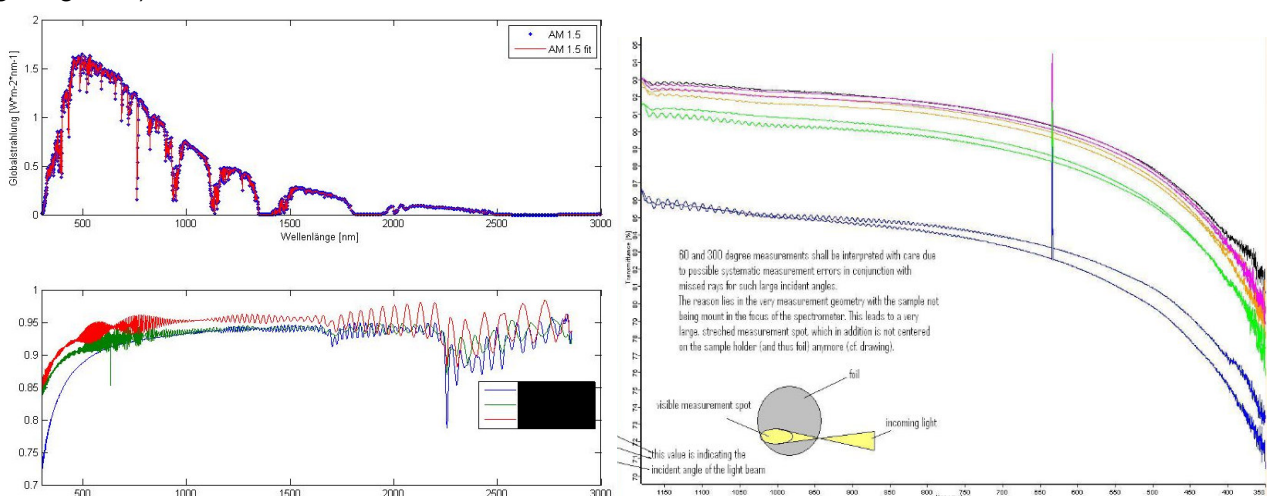


Abbildung 4: Links: oben: AM 1.5 Sonnenspektrum, unten: spektrale Transmission (gerichtete, normale Einstrahlung) von 3 unterschiedlichen Folien im solaren Spektralbereich. Rechts: Winkelabhängige Transmission (gerichtet) einer Folie (zur Konvektionsverlustminderung) im solaren Spektralbereich.

AP 2.2: Methoden zur Bestimmung der Wärmeverluste

Ein wesentlicher Inhalt und Motivation des Projekts ist die Aufschlüsselung der verschiedenen thermischen und optischen Verluste in (CPC-)Kollektoren (Abbildung 5), da erst dies ein Abkommen von Trial und Error ermöglicht. Eine gleichzeitige Untersuchung aller Effekte in einem Aufbau ist praktisch unmöglich und auch nicht unbedingt sinnvoll oder notwendig, weshalb die verschiedenen Regime im Projekt in besser untersuchbare Teilprobleme, -apparaturen und –simulationen unterteilt wurden.

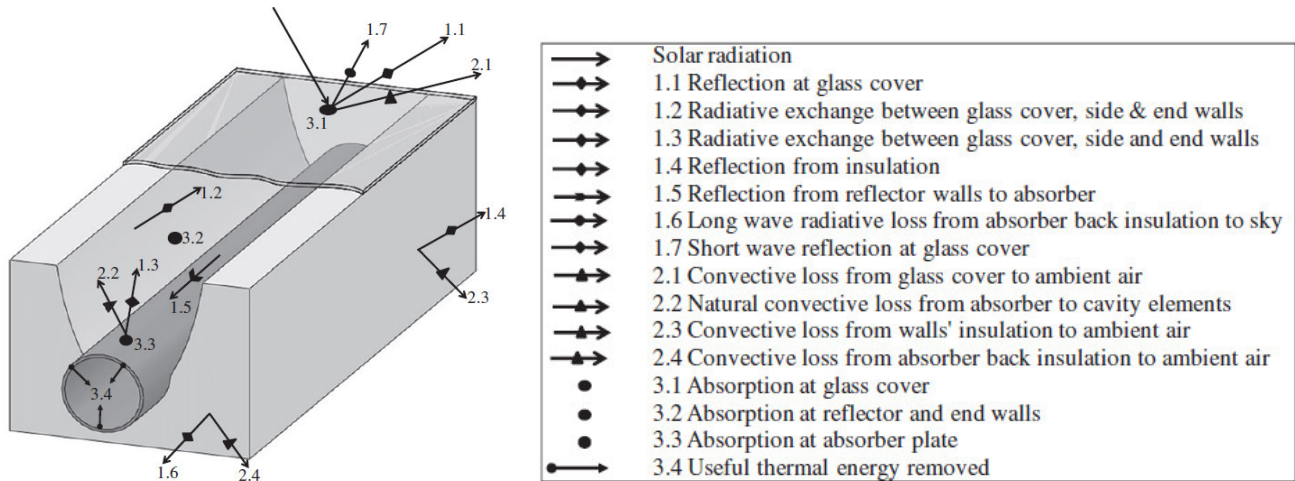


Abbildung 5: Beschreibung der unterschiedlichen Wärmeübergangsphänomene in CPCs (übernommen aus H. Singh, P. C. Eames, A review of natural convective heat transfer correlations in rectangular cross-section cavities and their potential applications to compound parabolic concentrating (CPC) solar collector cavities, Applied Thermal Engineering 31 (2011))

Zunächst wurde die Hydraulik eingehend untersucht. Dazu wurde, gemeinsam mit dem Hersteller (Fa. Flexim), ein nicht-invasives Ultraschalldurchflussmessverfahren für solarthermische Kollektorharfen adaptiert und Messungen an verschiedenen Hydrauliken durchgeführt, welche vom Projektpartner Solarfocus gefertigt wurden (Abbildung 6). Die Messungen dienten einerseits der Validierung der CFD-Simulationen (siehe AP 3) und erlaubten andererseits die Analyse des Strömungszustandes des jetzigen Kollektors bei verschiedenen Durchflüssen, was in weiterer Folge Rückschlüsse über die optimalen Durchflussmengen erlaubte.

Im hydraulischen Teil der Untersuchungen wurde zusätzlich noch der Druckverlust bei verschiedenen Durchflüssen und Fluidtemperaturen ermittelt, sowie der Leckstrom über die sogn. Spaltringentlüftung untersucht und für nicht nennenswert befunden.

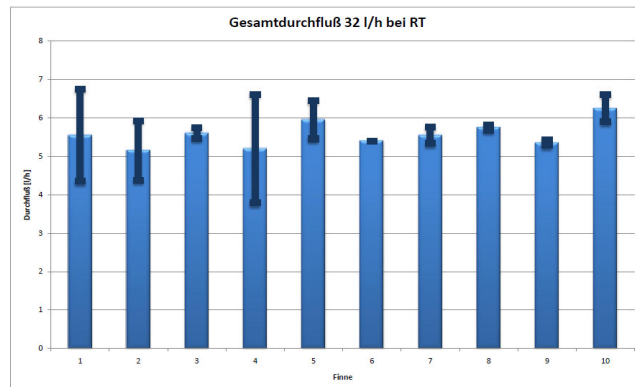
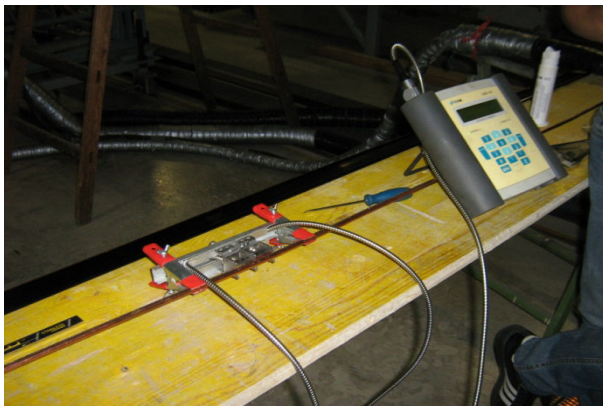


Abbildung 6: Links: nicht-invasive Ultraschalldurchflussmessung an einer Absorberharfe. Rechts: Durchflussaufteilung über die verschiedenen Absorberrohre

Um die konvektiven Verluste zu untersuchen, wird eine Kombination aus experimentellen PIV-Messungen und CFD-Simulationen (AP3) angewandt. Im ersten Versuch wurde ein speziell adaptierter „PIV-Kollektor“ von Solarfocus gefertigt um erste Probemessungen der thermisch getriebenen Strömungsverhältnisse in Kollektoren im Sonnensimulator des AIT durchzuführen (Abbildung 7). Es konnten zwar bereits erste Geschwindigkeitsfelder aufgenommen werden, jedoch wurde klar, dass die Messungen an praktikableren Mini-Versionen (einfachen Kollektorrinnen) besser durchgeführt werden können, weshalb separate Experimente durchgeführt wurden, die im Folgenden beschrieben sind:

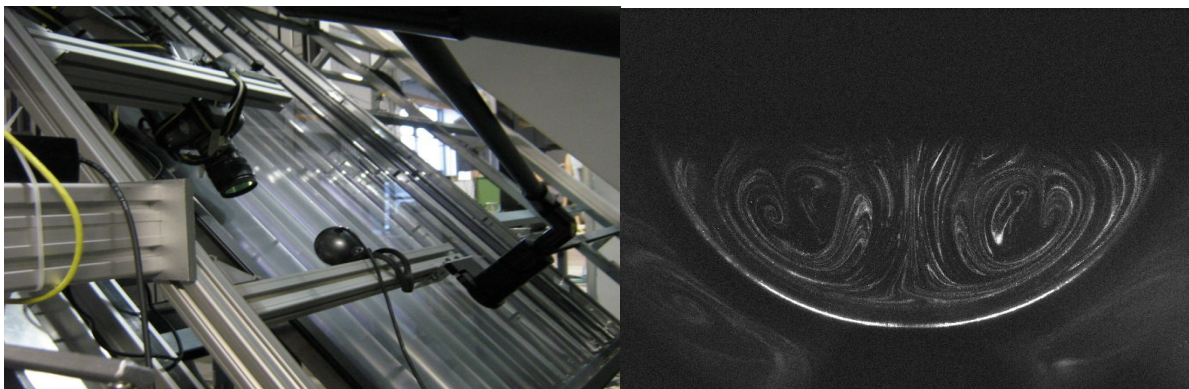


Abbildung 7: Links: PIV-Aufbau mit PIV-Kollektor im Sonnensimulator des AIT. Rechts: Strömungsfeld mit geeignetem Seeding.

Das Ziel der experimentellen Aufbaus war es, wohl definierte Randbedingungen für einen guten Vergleich zwischen den PIV- und Temperaturmessungen am Kollektormodell und den numerischen CFD-Simulationen an der gleichen Geometrie zu erhalten. Deshalb wich das Modell in einigen Punkten von einem realen Kollektor ab. Um eine gute Simulierbarkeit des Experiments zu erreichen, wurde nur eine einzige Rinne gebaut, es wurde keine selektive Beschichtung des Absorbers verwendet (erhöhter Beitrag der Wärmestrahlung) und keine externe Einstrahlung zugelassen (im Labor gibt es keine Lichtquelle, die so parallel wie die Sonnenstrahlung ist).

Eine CAD-Zeichnung des Kollektormodells ist in Abbildung 8 links dargestellt. Das Modell besteht aus einem Aluminium-Rahmen, der Spiegel, Absorber und Isolierung hält. Das ganze Gehäuse kann um 90° gekippt werden, um die Konvektionsströmung gezielt zu verändern. Der optische Zugang mit der

Kamera ist durch eine Glasscheibe an der Front gegeben. An der Rückseite befinden sich Löcher um das Seeding einzublasen. Der Spiegel, der verwendet wurde, ist ein CPC mit einer Involute, der bei einer Höhe von 10 cm abgeschnitten wurde. Der Spiegel wird durch die Isolierung in Position gehalten. Diese besteht aus Polysterolkügelchen, die den gesamten Raum gut ausfüllen können. Weil es zu Ungenauigkeiten in der Fertigung und bei der Installation kommt, wurde die Spiegelgeometrie für die CFD-Rechnungen direkt aus einem Foto des installierten Spiegels übernommen.

Um zusätzlich Informationen über die lokalen Temperaturen zu bekommen, wurden Temperatursensoren am Spiegel und auf der Glasoberseite befestigt. Die Temperaturen werden in der Ebene des Laserlichtschnitts, der in der Mitte des Kollektors liegt, gemessen (siehe Abbildung 8 rechts). Zusätzlich wurden die Umgebungstemperatur (wichtig für die Randbedingungen der CFD-Simulationen) sowie die Ein- und Austrittstemperaturen des Wassers im Absorberrohr aufgezeichnet.

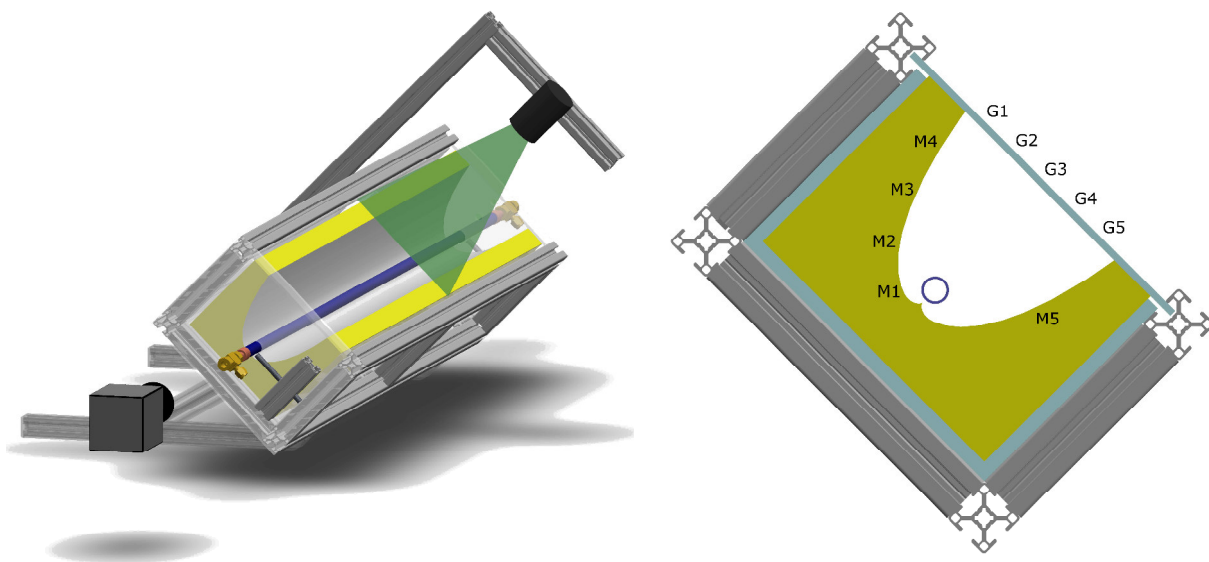


Abbildung 8: Links: CAD-Zeichnung des PIV-Set-ups. Rechts: Verteilung der Temperatursensoren

Der Laserarm wurde auf einem Galgen montiert, um die relative Position zum Kollektor während der Rotation des Gehäuses gleich zu behalten. Die Kamera war auf einem schrittmotorbetriebenen Positioniertisch fixiert und wurde nachgeführt. Aufgrund des konzentrierenden Spiegels gestalteten sich die Messungen schwierig, da es zu starken Reflexionen und zur starken Konzentrationen des Laserlichts kam. Auch die Wahl eines thermisch stabilen Seedings war entscheidend um lange Messzeiten bei hohen Temperaturen (bis zu 80 °C Absorbertemperatur) zu erreichen.

PIV-Messungen:

In den Messserien wurde die Absorbertemperatur schrittweise erhöht. Erst nachdem sich alle Temperaturen stabilisiert hatten, wurden die PIV-Messungen gestartet. Während die Stabilisierung nach einem Temperaturwechsel sehr lange dauert (bis zu einer Stunde), hat eine Winkeländerung einen geringen Einfluss auf die Temperaturverteilung. Deshalb wurden bei konstanter Temperatur mehrere Kippwinkel gemessen und dann die Temperatur geändert. Der Kippwinkel wurde von 4 bis 90° variiert und es wurden Temperaturen zwischen 5 und 80 °C eingestellt.

Obwohl sich bei fast allen Winkeln ein charakteristisches Strömungsprofil einstellte, waren die Konvektionsströme nicht stabil und zeigten zeitliche Schwankungen. Deshalb wurde eine hohe Anzahl

von Einzelmessungen (600) gemacht und statistisch ausgewertet. Dabei wurde eine adaptive Autokorrelation verwendet und ein Median-Filter eingesetzt.

Insgesamt lagen damit eine große Anzahl von Messungen der Konvektionsströmung und der Temperaturverteilung für verschiedenste Randbedingungen (Absorbertemperatur, Kippwinkel des Kollektors, d.h. Richtung der Gravitation relativ zum Kollektor) vor, die einen direkten Vergleich zwischen Experiment und numerischer Simulationen ermöglichten. Mithilfe dieser Messungen gelang es das CFD-Simulationsmodell zu entwickeln und zu verifizieren (siehe Abschnitt Theoretische Methoden).

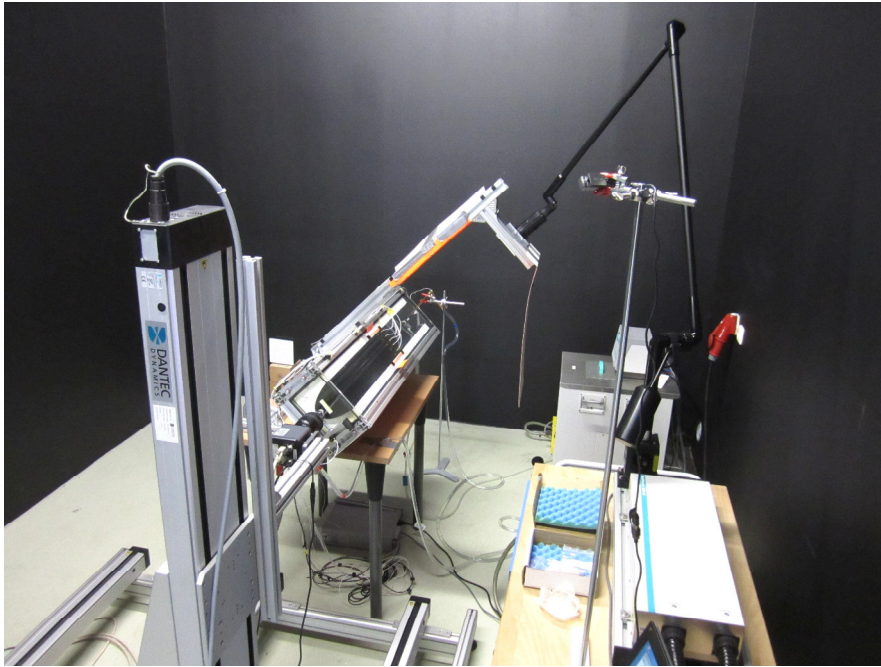


Abbildung 9: Messaufbau des PIV-Set-ups.

F'-Apparatur:

Um den Wärmewiderstand der Finne und des Übergangs von Finne auf den Absorber zu bestimmen, wurde mit einer Messmethode gearbeitet, bei der thermische Energie durch elektrische Beheizung auf der Finne aufgebracht wird und am Absorberrohr durch das Fluid abgeführt wird (siehe Abbildung 10). Um Konvektionsverluste zu vermeiden, ist die Finne in einer Isolierung eingebettet, sodass der gesamte Wärmestrom entlang der Finne fließt. Der Wärmewiderstand der Finne und der zwischen Finne und Absorber kann durch die entstehenden Temperaturgradienten bestimmt (siehe Abbildung 10) und auch mit einem CFD-Modell abgeglichen werden.

Im Laufe der Entwicklung hat sich aber gezeigt, dass ein effektiver CPC-Kollektor überhaupt auf eine Finne verzichten kann, sodass nur das Funktionsprinzip der Messmethode (Wärmestrom durch elektrische Beheizung statt solarer Einstrahlung) demonstriert wurde.

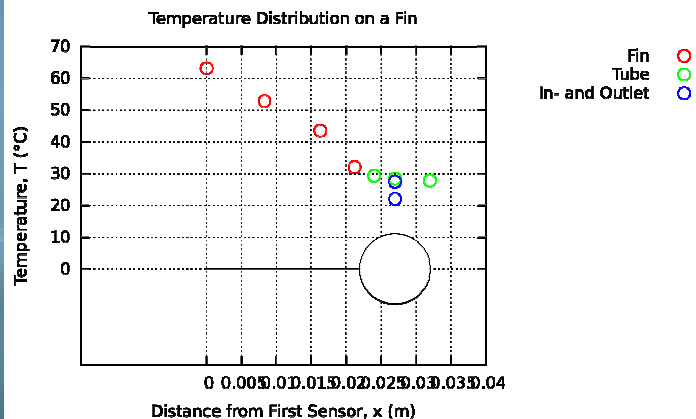
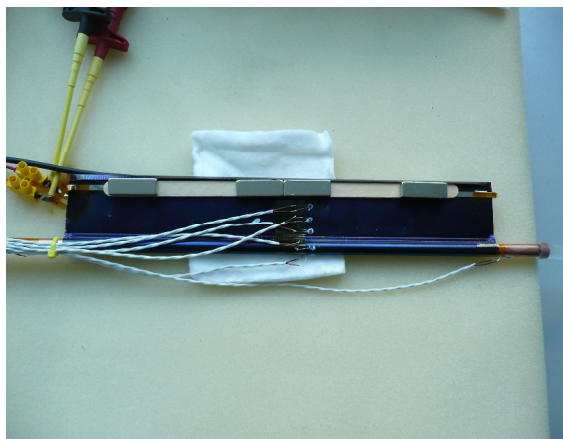


Abbildung 10: F-Messungen an einer CPC-Finne.

Zur vollständigen Analyse der Wärmeverluste und um die thermischen Belastungen für neue, verbesserte Kollektorkomponenten abschätzen zu können (insb. Isolierung, siehe unten), ist zusätzlich die Kenntnis der im Kollektor herrschenden Temperaturverhältnisse notwendig. An speziell präparierten Kollektoren wurden daher an verschiedenen Punkten und während verschiedenen Betriebsbedingungen (Variation der Eintrittstemperatur bis 150°C und Stagnationsfall) Temperaturen aufgezeichnet. Die thermische Analyse wurde durch Thermographieaufnahmen unterstützt (Abbildung 11), welche die Analyse von Wärmebrücken und thermischer Infrarotabstrahlung erlaubt.

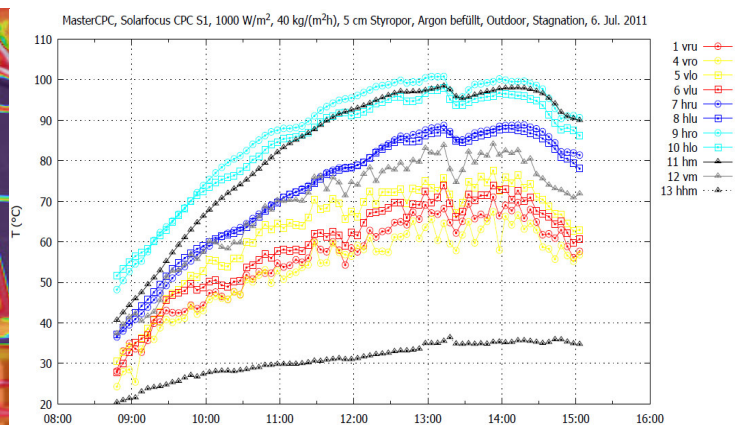
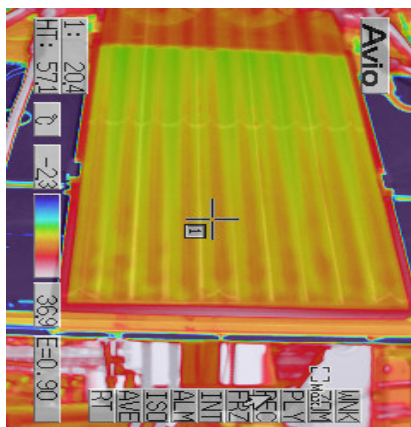


Abbildung 11: Links: Thermographieaufnahme des CPC-Kollektors. Rechts: Temperaturverteilung im Kollektor in Stagnation

AP 2.3: Leistungsmessungen

Die Leistungsvermessungen der Kollektorfunktionsmuster (siehe AP4 unten) wurden an eigens für das Projekt entwickelten Prüfständen durchgeführt. Im Folgenden ist daher der neue Mitteltemperaturprüfstand des AIT beschrieben (welcher nicht über das Projekt finanziert wurde):

Der Mitteltemperaturprüfstand (MTP, Abbildung 12) kann mit Wärmeträgermedien Wasser oder Wasser/Frostschutzgemisch bei einem Durchflussbereich von 20 bis 2000 kg/h betrieben werden. Der

Prüfstand ist mobil und kann für Labormessungen, für Messungen unter natürlichen Umgebungsbedingungen („outdoor“) am AIT oder auch Vorort bei Kundenanlagen eingesetzt werden.



Abbildung 12: Ansicht des Mitteltemperaturprüfstands

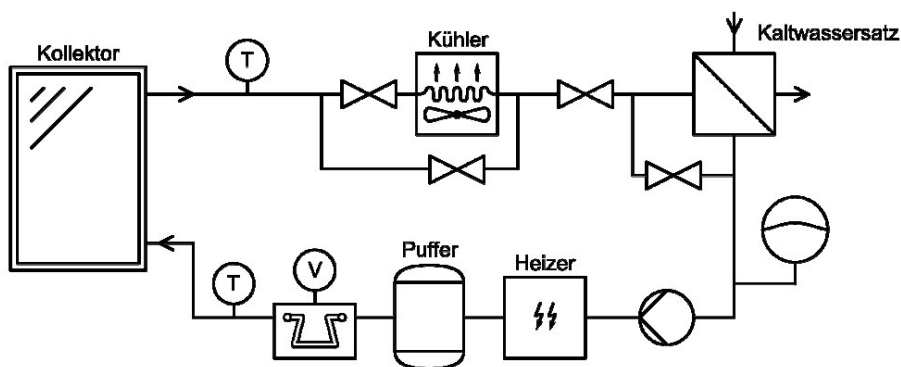


Abbildung 13: Anlagenschema des Mitteltemperaturprüfstands³

Abbildung 13 zeigt das realisierte Anlagenschema des Mitteltemperaturprüfstandes. Aufgrund der hohen Temperaturen und Drücke sind alle Armaturen des Prüfstandes nach PN 40 oder höher ausgeführt und die Verrohrung aus Edelstahl gefertigt. Das Wärmeträgermedium wird elektrisch beheizt und zur Temperaturstabilisierung durch einen Puffer geleitet, bevor es durch den Massenstrommesser (Coriolis-Durchflussmessgeber) in den Kollektoreintritt fließt. Der Durchfluss wird über eine frequenzgesteuerten Pumpe und über die Bypässe in den hydraulischen Kreisen eingestellt. Für die Rückkühlung des vom Kollektor erwärmten Mediums sind zwei verschiedene Betriebsmodi möglich: Es kann mit einem Luftkühler gegen die Umgebungsluft oder über einen an einen Kaltwassersatz angebotenen Wärmeübertrager gekühlt werden. Die Luftkühlung bietet den Vorteil auch ohne Kühlwasser autark

³ Hengstberger et al., 2012: Erste Betriebserfahrungen mit einem neuartigen Mitteltemperaturprüfstand für Kollektorprüfungen über 200°C

Messungen durchführen zu können. Dies ist insbesondere für Vorort-Messungen Kundenanlagen, wo keine entsprechende Infrastruktur vorhanden ist, wichtig.

Der Prüfstand kann sowohl für Messungen unter stationären Bedingungen (EN 12975-2:2006, Kapitel 6.1) als auch unter quasi-dynamischen Bedingungen (EN 12975-2:2006, Kapitel 6.3) verwendet werden.

1.4.2 Theoretische Methoden und Modellentwicklung (AP3)

Im Folgenden werden die durchgeführten Inhalte nach physikalischem Teilgebiet aufgeschlüsselt beschrieben (alle diese Teilbereiche enthalten Inhalte aus AP 3.1 – 3.4):

Vereinfachte theoretische Vorsimulationen zur Grobanalyse der CPC-Leistung und Wärmeverlustverteilung

Mittels dem an der Uni Prag entwickelten Knoten-Kollektorsimulationsprogramm „Kolektor 2.2“, wurden Parameterstudien an Flachkollektorgeometrien durchgeführt (Abbildung 14). Obgleich die Ergebnisse zwar nicht direkt auf CPC-Geometrien übertragbar sind, erlauben diese Analysen jedoch eine Einschätzung und Gewichtung der verschiedenen physikalischen Wärmetransportmechanismen (Wärmeleitung, Konvektion, Wärmestrahlung) bzw. eine relativ schnelle Grobeinschätzung von möglichen Verbesserungen.

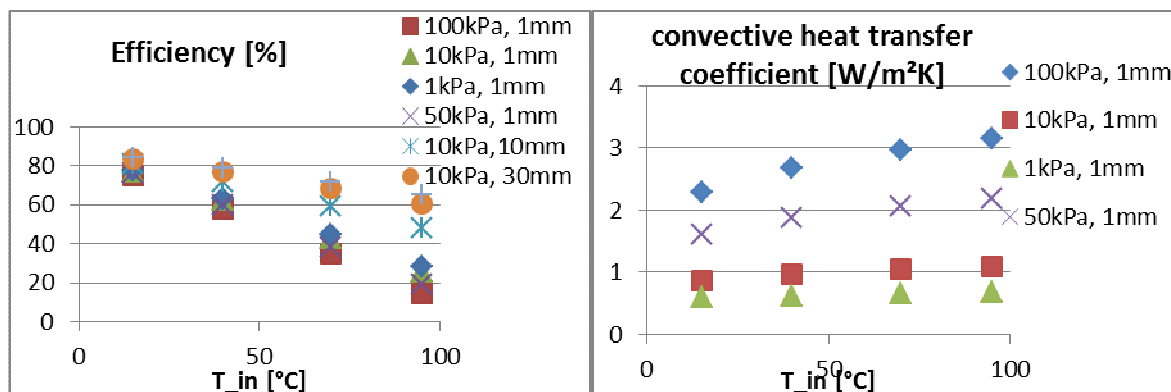


Abbildung 14: Links: Kollektoreffizienz in Abhängigkeit von Isolierung und Kollektorrinnenraumdruck. Rechts: Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit vom Kollektorrinnendruck

Wichtigstes Ergebnis dieser Rechnungen, welches in ähnlicher Form in der Literatur bereits auch in anderen Arbeiten untersucht wurde, ist, dass die konvektiven Wärmeverluste nach vorne den größten Anteil ausmachen. Bei erhöhten Kollektorbetriebstemperaturen und damit Absorbertemperaturen werden allerdings die Strahlungsverluste in zunehmendem Maße wichtiger, was durch die 4. Potenz der Temperatur im bekannten Stefan-Boltzmann-Gesetz ($P \sim \epsilon \sigma T^4$, mit P = abgestrahlte Leistung, ϵ = Emissivität, σ = Stefan-Boltzmann-Konstante, T = Temperatur des abstrahlenden Körpers) begründet ist.

Um in den finalen Kollektorfunktionsmustern eine wesentliche Verbesserung zum jetzigen Serien-CPC-Kollektor erreichen zu können, wurden daher die Verbesserungsaktivitäten insbesondere in diese Richtung getrieben.

Theoretische Methoden zur Analyse der Kollektorhydraulik

Bisherige theoretische Untersuchungen der genauen hydraulischen Verhältnisse in solarthermischen Kollektoren waren auf extrem vereinfachte Berechnungen und Geometrien beschränkt, da die beschreibenden physikalischen Gleichungen nichtlineare partielle Differentialgleichungen (Navier-Stokes-Gleichungen) sind. Die verwendeten Modelle basierten dabei hauptsächlich auf empirischen Relationen (für bestimmte vereinfachte Geometrien) für bestimmte Kennzahlen (Nusselt-, Reynold- oder Rayleigh-Zahl).

Mittlerweile gibt es jedoch genügend Rechenmodelle (CFD = Computational Fluid Dynamics) und -leistung (am AIT gibt es verschiedene Rechencluster) um die Druckverluste und genauen Strömungsverhältnisse in realistischen Kollektorpharfen vollständig in 3-d zu berechnen. Entscheidend für den Wärmeübergang, als auch für den Druckverlust ist der Strömungszustand (laminar – Übergangsbereich – turbulent) des Fluids. In diesem Projekt wurden daher entsprechende Modelle erstellt und Simulationen für beispielhafte Harfengeometrien durchgeführt.

Abbildung 15 zeigt Ergebnisse für die Druckverluste und die genauen Strömungsverhältnisse für eine Harfe, welche eine „Doppelbiegung“ am Kollektoreintritt besitzt. Das dadurch erzeugte Strömungsprofil ist in gewisser Weise „verwunden“, was zu unterschiedlichen Reynoldszahlen und damit letztendlich Wärmeübergangskoeffizienten in verschiedenen Regionen des Kollektors führt.

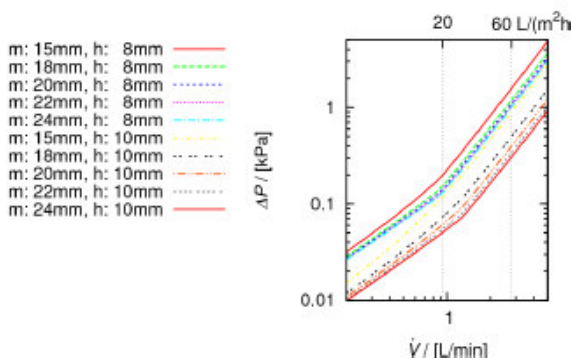


Figure 20: Pressure drop under variation of manifold (m) and harp (h) pipe diameters.

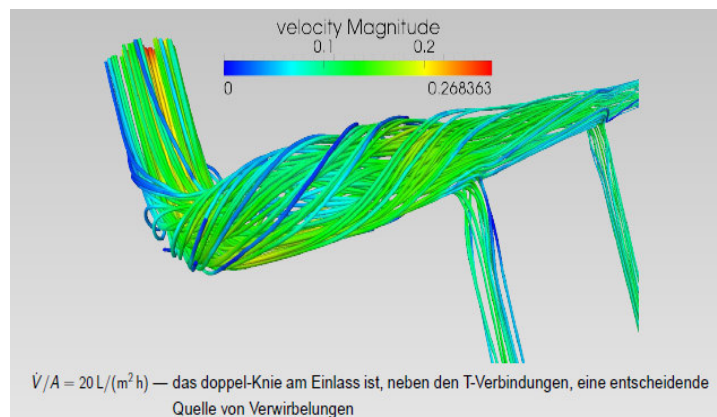


Abbildung 15: Links: Druckverlust als Funktion der Durchflussgeschwindigkeit für verschiedene Sammelrohr/Absorberrohrdurchmesser. Rechts: detaillierte Auflösung der Stromlinien am Kollektoreinlass.

Optische Simulationen mittels Ray-Tracing

Aus den durchgeführten Leistungsmessungen und aus Literaturrecherchen war klar ersichtlich, dass die optischen Verluste des bestehenden CPC-Kollektors um ca. 15-20% zu hoch waren. Der Grund lag dabei einerseits an den schlechten Materialeigenschaften der Spiegel (die gerichtete, solare Reflektivität lag bei nur 80%), und andererseits an der suboptimalen Kollektorgeometrie.

Die entsprechenden Simulationen zur rein optischen Optimierung, wurden mittels hauseigenem Ray-Tracing Programm⁴ durchgeführt. In Abbildung 16 sind erste Ray-Tracing-Ergebnisse zu sehen, welche

⁴ B. Kubicek, M. Popovac, A. Frohner, M. Rudolph, R. Teppner:

"Fluent als Plattform: z-f Turbulenzmodellierung und spectrales Path/Raytracing";

Vortrag: ANSYS Conference & CADFEM Austria Users` Meeting, Wien, Österreich; 22.04.2010 - 23.04.2010; in: "www.usersmeeting.at", CADFEM Austria, (2010).

M. Popovac, B. Kubicek, A. Frohner, B. Semlitsch:

"Path-tracing Approach for Solar Radiation Modeling in CFD";

für die Optimierung der Geometrie weiterverwendet werden. In den Beschreibungen zu AP4 finden sich weitere Berechnungen.

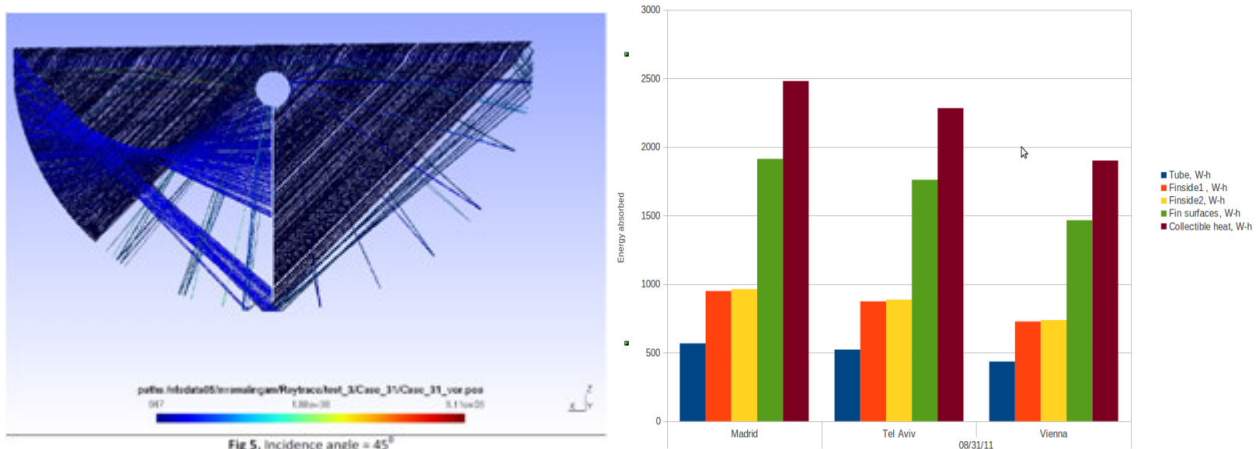


Abbildung 16: Links: Visualisierung der Ray-Tracing-Ergebnisse für 45° Einfallswinkel. Rechts: Integrierte, maximal absorbierbare Energie (durch die verschiedenen Komponenten des Kollektors) für 3 Standorte (Madrid, Tel Aviv, Wien) für den 31.8.

Jahresertragssimulation (TRNSYS)

In Werbebroschüren oder technischen Informationen von vielen Kollektorherstellern findet man leider noch immer nur, wenn überhaupt, die Kollektorwirkungsgradkurve (Kennlinie). Entscheidend für die Auswahl eines bestimmten Kollektors sollte jedoch eine Art des tatsächlichen Wärmeertrages, für einen bestimmten Standort, eine gewisse Zeitspanne und definierte Randbedingungen (idealerweise anwendungsbezogene Temperaturen), sein. Insb. für Anwendungen der solaren Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung hat sich die Branche auf bestimmte Berechnungsmodalitäten einigen können. Mittels ScenoCalc vom SP Technical Research Institute of Sweden⁵ ist es möglich verschiedene Erträge für unterschiedliche Situationen zu berechnen; zum Zeitpunkt des Endberichts ist ScenoCalc allerdings noch nicht vollständig „fit“ für CPC-Kollektoren.

U.a. daher wurden in diesem Projekt Jahresertragssimulationen mittels TRNSYS durchgeführt und ein „einfaches Berechnungsszenario“ vorbereitet. Im Wesentlichen werden alle Kollektorerträge aufsummiert, sobald die Einstrahlung einen bestimmten Schwellenwert überschreitet. In Abbildung 17 sind für eine Kollektoreintrittstemperatur von 25°C und einen Schwellenwert von 200 W/m² in der Kollektorebene (diffus + direkt) die Ergebnisse für unterschiedliche Kollektorneigungswinkel und Nord-Süd bzw. Ost-West-Ausrichtung dargestellt. Eine Erweiterung des Models auf komplexere Anwendungen ist relativ problemlos möglich.

Poster: EuroSun 2010 - International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings, Graz, Österreich; 28.09.2010 - 01.10.2010; in: "Proceedings EuroSun 2010 - International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings", (2010), Paper-Nr. 148.

⁵ <http://www.sp.se/en/index/services/solar/ScenoCalc/Sidor/default.aspx>

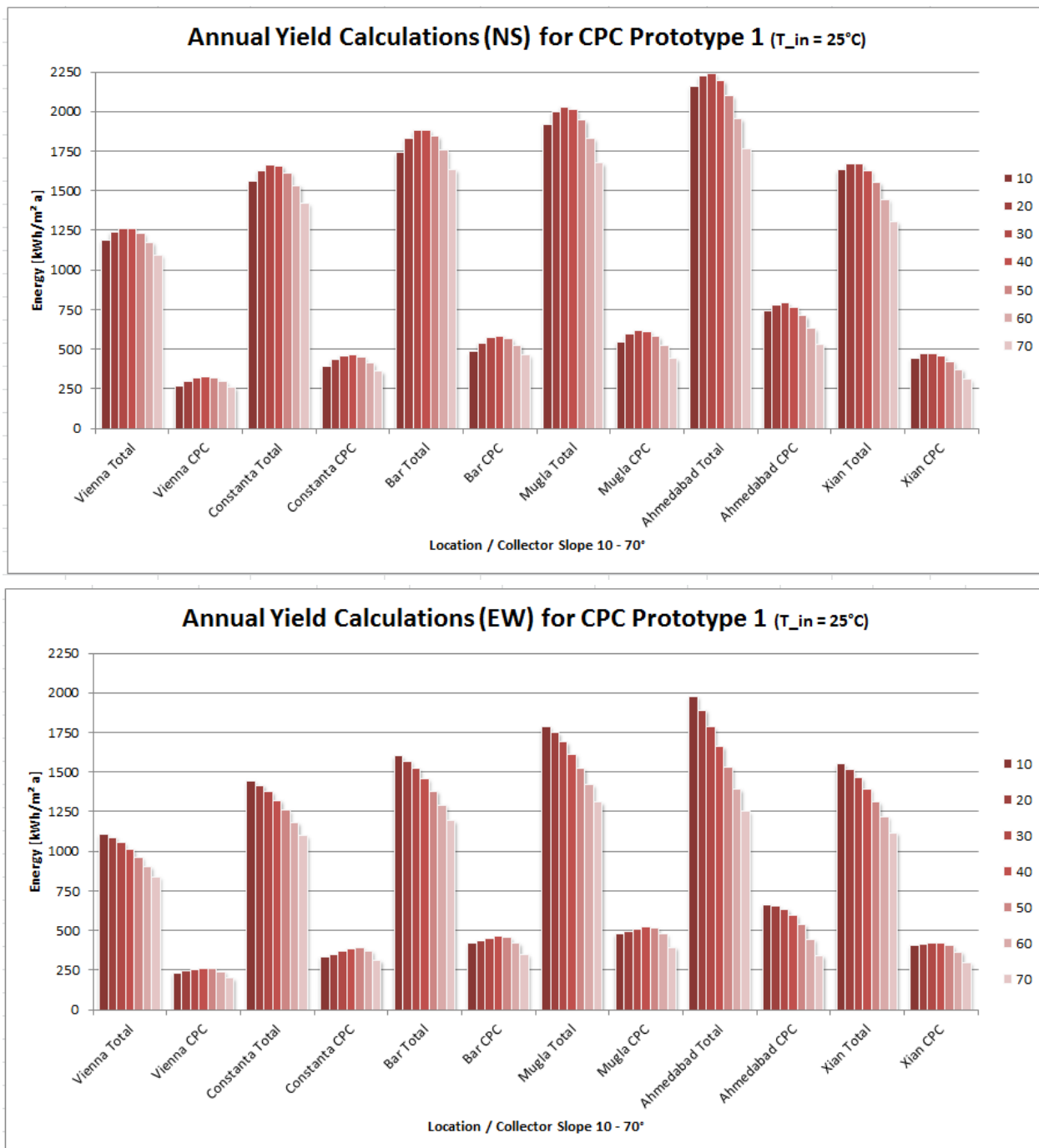


Abbildung 17: Jahresertragssimulationen für verschiedene Standorte und Kollektorneigungswinkel; „Ort X Total“ bezeichnet dabei die Globalstrahlung, „Ort X CPC“ den Kollektorjahresertrag für best. im Text spezifizierte Bedingungen.

3d-CFD-Simulationen:

Aufgrund der nicht-plan(parallelen) Geometrie von CPC-Kollektoren findet ein äußerst komplexes Zusammenspiel verschiedener Wärmeübertragungsphänomenen im Kollektor statt. Neben der Wärmeleitung ist insbesondere der Strahlungsaustausch und die konvektive Wärmeübertragung von zentraler Bedeutung und kann letztendlich nur mehr mit Hilfe von Simulationen berechnet werden (Knotenmodelle basierend auf empirischen Korrelationen sind zu ungenau, da letztere nur für Trivialgeometrien und nicht für realistische Geometrien bekannt sind).

In diesem Projekt wurden daher Modelle in ANSYS Fluent implementiert, mit denen es möglich ist alle relevanten Wärmeübertragungsmechanismen vollständig in 3d abzubilden und zu berechnen. Viele bisherige, vergleichbare Arbeiten beschränkten sich auf 2d Simulationen, was aufgrund von Symetrieüberlegungen auf den ersten Blick gerechtfertigt zu sein scheint. Zusätzlich wurden meist nur die stationären Gleichungen gelöst. In unserer Arbeit wurden systematisch 2d und 3d Varianten sowohl stationär als auch transient berechnet und verglichen.

In Abbildung 18 sind exemplarische Simulationsergebnisse der Strömungsgeschwindigkeiten zusammen mit den experimentellen Messergebnissen der PIV-Messungen dargestellt. Wesentliche Erkenntnis dabei ist, dass 2d Simulationen das realistische Strömungsprofil weder im stationären, noch im instationären Fall wiedergeben können und daher eine unzulässige Vereinfachung darstellen.

Die 3d stationären Simulationen kommen dem realen Bild zwar schon näher und können, aus Gründen der Zeitersparnis etwa, bereits zu bestimmten Abschätzungen/Auslegungen verwendet werden. Die größte Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation ergeben jedoch vollständig transiente 3d-Simulationen, wie aus der Abbildung ersichtlich ist.

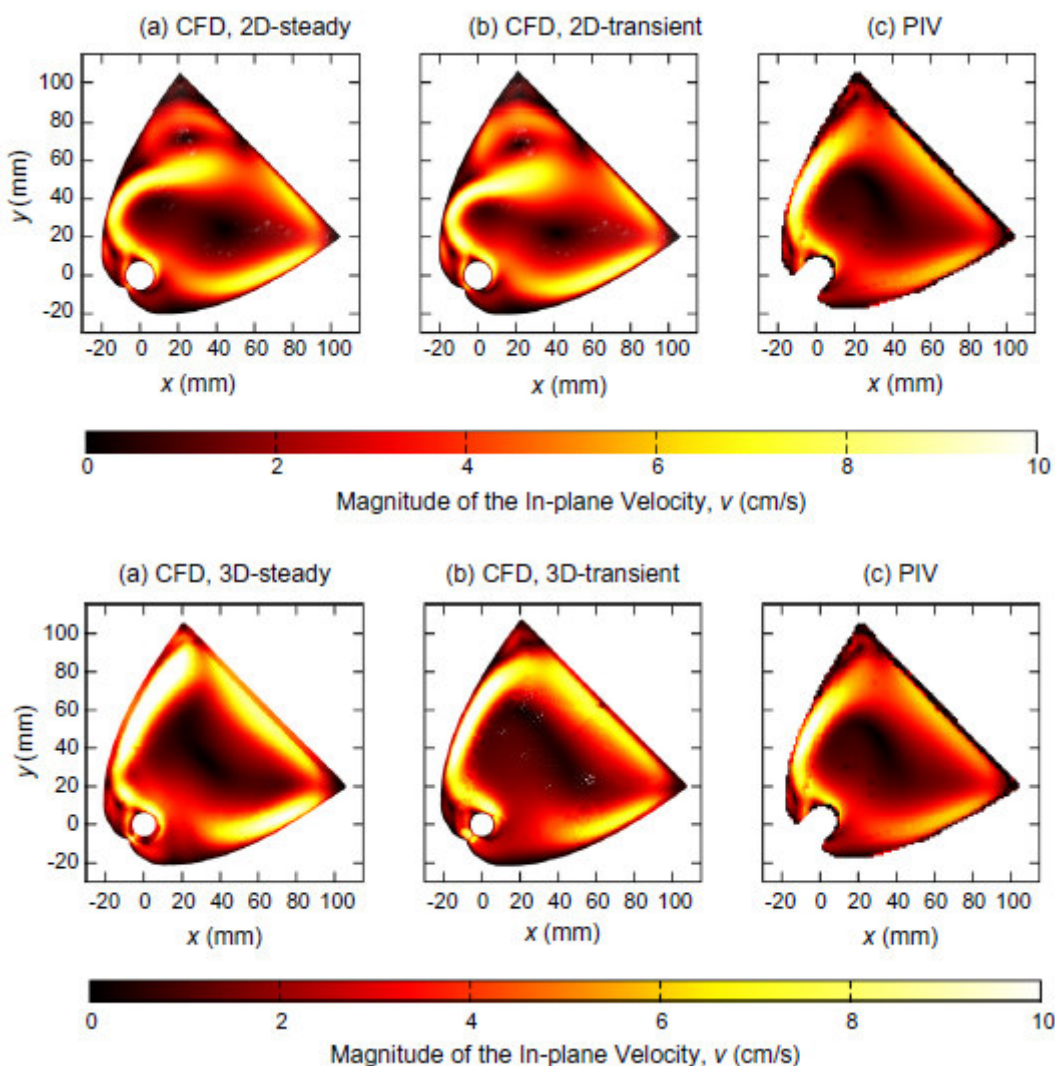


Abbildung 18: Vergleich der simulierten und gemessenen (PIV) Strömungsverhältnisse in einer speziellen CPC-Geometrie

Bekannterweise sind die Wärmeverluste in einem Kollektor abhängig von der Temperaturdifferenz aus Kollektor und Umgebung. In Abbildung 19 ist diese Abhängigkeit für verschiedene Szenarien dargestellt (um auf den Kollektorstandsgrad zu kommen, müsste diese Effizienz noch mit der optischen Effizienz multipliziert werden). Insbesondere eine Füllung mit Edelgas oder ein geringes Vakuum (10 mbar) reduziert die Wärmeverluste beträchtlich. Erstere Variante wurde auch in Form einer mit Argon befüllten Isolierglasscheibe im finalen Funktionsmuster PT2013 (siehe Abschnitt AP5) umgesetzt.

Der Wirkungsgrad eines CPC-Kollektors kann durch unterschiedliche Maßnahmen erhöht werden. Im Vorhinein ist jedoch oft unklar, welche Maßnahme die größte Auswirkung haben wird (z.B.: Welchen Effekt hat eine bessere selektive Beschichtung von Absorber und/oder Abdeckung? Welchen Effekt hat eine Edelgasfüllung auf die Konvektionsverluste im Vergleich zu einem geringen Vakuum? Wieviel Isolierung ist sinnvoll?). Daher ist eine genauere Analyse der Wärmeverluste sowohl nach der Art der Wärmeübertragung (Strahlung, Konvektion, Leitung) als auch im Bezug auf unterschiedliche Kollektorbezugsflächen (Abdeckung, Seitenwand, Rückwand) unbedingt notwendig. In diesem Projekt wurde daher erstmals die nötige Simulationsumgebung entwickelt, um alle möglichen Geometrien und Wärmeübertragungsphänomene in ausreichender physikalischer Genauigkeit berechnen zu können. Abbildung 20 zeigt exemplarisch die Ergebnisse einer solchen Simulation, aus der neben Temperaturverteilungen (die insb. auch Rückschlüsse auf die Materialanforderungen geben) die verschiedenen Wärmeflüsse dargestellt sind.

Dieses Simulationsmodell diente als Grundlage für das Design des finalen Kollektorstandsmusters (siehe Abschnitt unten).

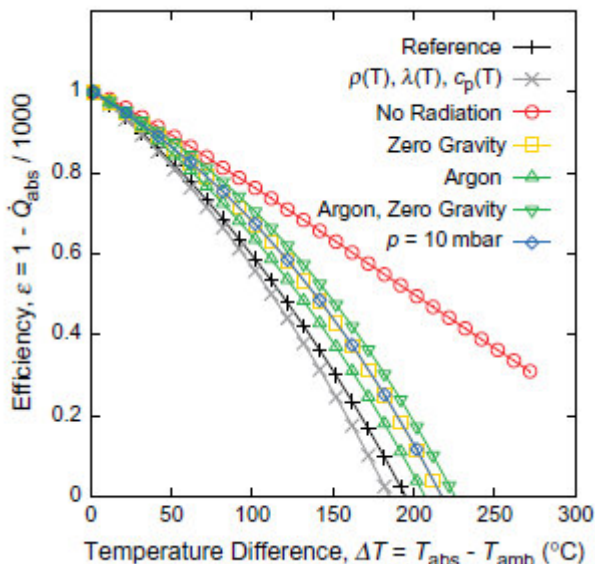


Abbildung 19: Simulationsergebnisse der Wärmeverluste für verschiedene Szenarien.

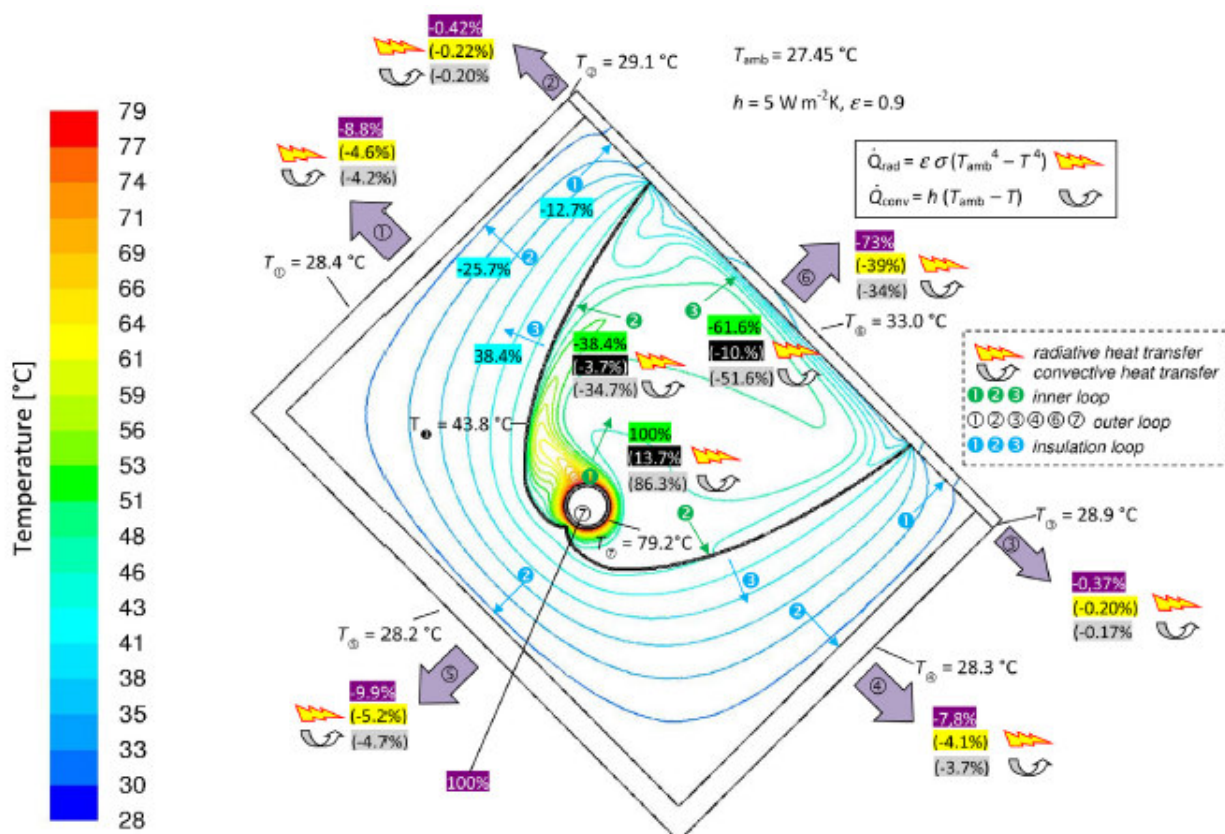


Abbildung 20: Analyse der unterschiedlichen Wärmeverluste gegliedert nach Wärmeübertragungsart (Strahlung, Konvektion + Wärmeleitung) und unterschiedlichen Kollektorflächen.

1.4.3 Assemblierung von Mitteltemperatur-CPC-Funktionsmustern (AP4)

Der Projektpartner Solarfocus fertigte für die unterschiedlichen Experimente verschiedene, maßgeschneiderte Kollektoren und Kollektorteile, welche im Folgenden aufgelistet sind:

- Serienkollektor für die Erhebung des State-of-the-Art
- Verschiedene, speziell präparierte Hydraulik-Harfen zur Vermessung des Durchflusses
- Spezielle Hydraulikstücke für die Spaltring-Leckstromversuche
- Speziell für PIV-Versuche adaptierter Kollektor
- Kollektorwannen, Spiegel, Absorberfinnen, Absorberrohmaterial, Kollektorharfen, Glas, Dichtungen zur optischen und thermophysikalischen Materialcharakterisierung

Zusätzlich wurden im Laufe des Projekts 3 verschiedene Versuchskollektoren designt, gebaut und vermessen. Sukzessive flossen in diese ersten Mitteltemperatur-CPC-Funktionsmuster die Erkenntnisse aus den theoretischen und experimentellen Arbeiten und den vorangegangenen Kollektoren ein.

Im Folgenden werden die jeweiligen Kollektoren und ihre Komponenten beschrieben:

Funktionsmuster 1 – „CPC S1 092011“:

Das erste Funktionsmuster wurde an den Serienkollektor angelehnt. Die Spiegel- und Absorbergeometrie wurde dabei, aus Gründen der Praktikabilität und Einfachheit, nicht verändert, sondern 3 andere Verbesserungen realisiert:

- Spiegelbeschichtung
- Argonfüllung
- Isolierung

Im Serienkollektor wird keine eigentliche CPC-Form verwendet, sondern eine Mischung aus Kreisform und angeschlossenen Tangenten. Als Absorber dient ein Rohr mit umwickelter Finne. Aus den Flächenverhältnissen im Kollektor ergibt sich ein sehr geringer Konzentrationsfaktor von weniger als 1,3.

Spiegelbeschichtung:

Aus den Vermessungen der Materialeigenschaften und den Leistungsmessungen am Serienkollektor wurde ersichtlich, dass die Reflexivität der Spiegel mit ca. 80% unter jener von marktverfügbaren Beschichtungen liegt. Daher wurde eine Spiegelbeschichtung mit solarer Reflexion von 95% verwendet.

Argonfüllung:

Die größten Wärmeverluste treten nach vorne hin auf. Konvektive Wärmeübertragung sowie Gaswärmeleitung im Kollektorinnenraum transportiert Energie vom Absorber zum Glas und führt zur Erwärmung von letzterem. In weiterer Folge wird Energie über Wärmeleitung, Konvektion (Umgebungsluft) und Wärmeabstrahlung an die Umgebung abtransportiert, was sich als Wärmeverlust widerspiegelt.

Aus der Literatur und ersten Berechnungen wurden 3 verschiedene Möglichkeiten identifiziert um die Wärmeverluste nach vorne hin zu verringern:

- Evakuierung des Kollektorinnenraumes
- Konvektionsblockierende Zusatzelemente (Folien, Transparent Insulation Materials)
- Füllung des Kollektorinnenraumes mit einem anderem Gas als Luft

Den größten Effekt sollte theoretisch eine Evakuierung des Kollektorinnenraumes haben. Buttinger⁶ hat am ZAE einen evakuierten CPC realisiert und die Machbarkeit der Idee demonstriert. Obwohl technisch prinzipiell möglich und in anderen Branchen erprobt, wurde sich aus unterschiedlichen Gründen (insb. Kosten, Fertigung, Wartung) gegen diese Lösung entschieden.

Mittlerweile gibt es drei, den Autoren bekannte Anbieter, welche einen evakuierten Flachkollektor in unterschiedlichen Varianten anbieten (Thermosolar, SRB Energy, TVP Solar).

Konvektionsblockierende Zusatzelemente, im einfachsten Fall Folien, sind mittlerweile ebenfalls in manchen Produkten verbreitet (den Autoren ist bekannt: Arcon Solar, Ökotech) und wurden ebenfalls

⁶ Dissertation Frank J. Buttinger, Entwicklung eines konzentrierenden Vakuum-Flachkollektors zur Prozesswärmeerzeugung, TU München (2009)

bereits in einem Vorprojekt⁷ vom Projektpartner Solarfocus getestet. Ebenfalls aus unterschiedlichen Gründen (insb. erschwerte Konstruktion, Dauerbeständigkeit der Folie) wurde sich auch gegen diese Variante entschieden.

Es ist bekannt, dass die unterschiedlichen Eigenschaften von verschiedenen Gasen große Auswirkungen auf das Verhältnis von Gaswärmeleitung zu Konvektion haben. In Abbildung 21 sind charakteristische Kennzahlen für unterschiedliche Gase sowie beispielhafte U-Wert-Berechnungen für einfache planparallele Geometrie dargestellt. Beachtet man noch die wirtschaftliche Komponente, so kommt man zur Erkenntnis, dass Argon eine vielversprechende Option für die Füllung des Kollektorinnenraumes ist.

U.a. da die Ergebnisse für planparallele Geometrien leider nicht direkt für die komplexen CPC-Geometrien übertragbar sind, wurde sich entschlossen das erste Kollektorfunktionsmuster mit Argon zu befüllen, um einen ersten Hinweis auf eine mögliche Reduktion der Wärmeverluste in CPCs zu gewinnen.

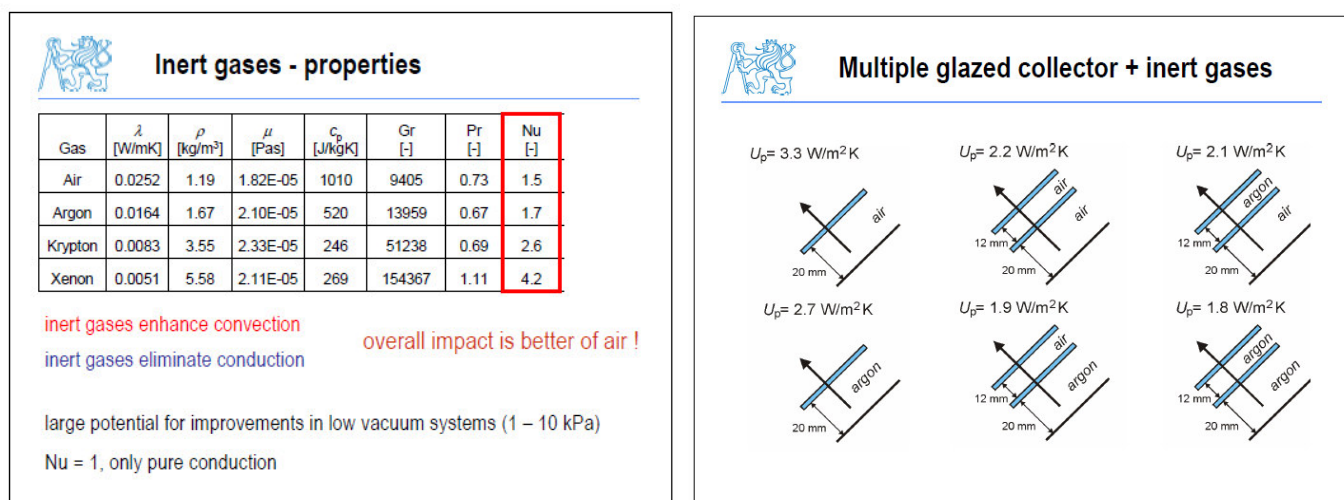


Abbildung 21: Links: Eigenschaften unterschiedlicher Gase und deren Einfluss auf unterschiedliche Kennzahlen für konvektive Wärmeübertragung und Wärmeleitung. Rechts: Auswirkung unterschiedlicher Gasfüllungen auf die Wärmeverluste unterschiedlicher Konfigurationen (aus Tomas Matuska (Univ. Prag), SOLNET PhD Trainingskurs 2010 in Prag)

Isolierung:

Im Serien-CPC liegen die Spiegel direkt auf der Kollektorwanne auf. Eine Rück- und Seitenwandisolierung ist nicht vorhanden. Grobe Berechnungen sowie Thermographieaufnahmen des Serienkollektors zeigten, dass insb. bei verminderten Verlusten über die Kollekturvorderseite auch die Wärmeverluste nach hinten und über die Seitenwände, vor allem bei höheren Temperaturen, größer werden. Um nicht den durch „Argon gewonnenen“ positiven Effekt sofort wieder zu verlieren, wurde eine

⁷ EU FP6-SME Projekt SoCold, Projektreferenz: 508462,
http://cordis.europa.eu/result/brief/rcn/8150_de.html

Isolierung im Kollektor eingebracht. In Hinblick auf spätere Kollektordesigns (siehe unten), wurde ein spezieller Polyurethan-Schaum von der Fa. Eurofoam (Greiner Gruppe) verwendet.

Abbildung 22 zeigt das erste verbesserte Kollektorfunktionsmuster auf einem Solar-Prüfstand des AIT, auf welchem der Kollektor vermessen wurde (Ergebnisse siehe Beschreibung des nächsten Arbeitspakets).

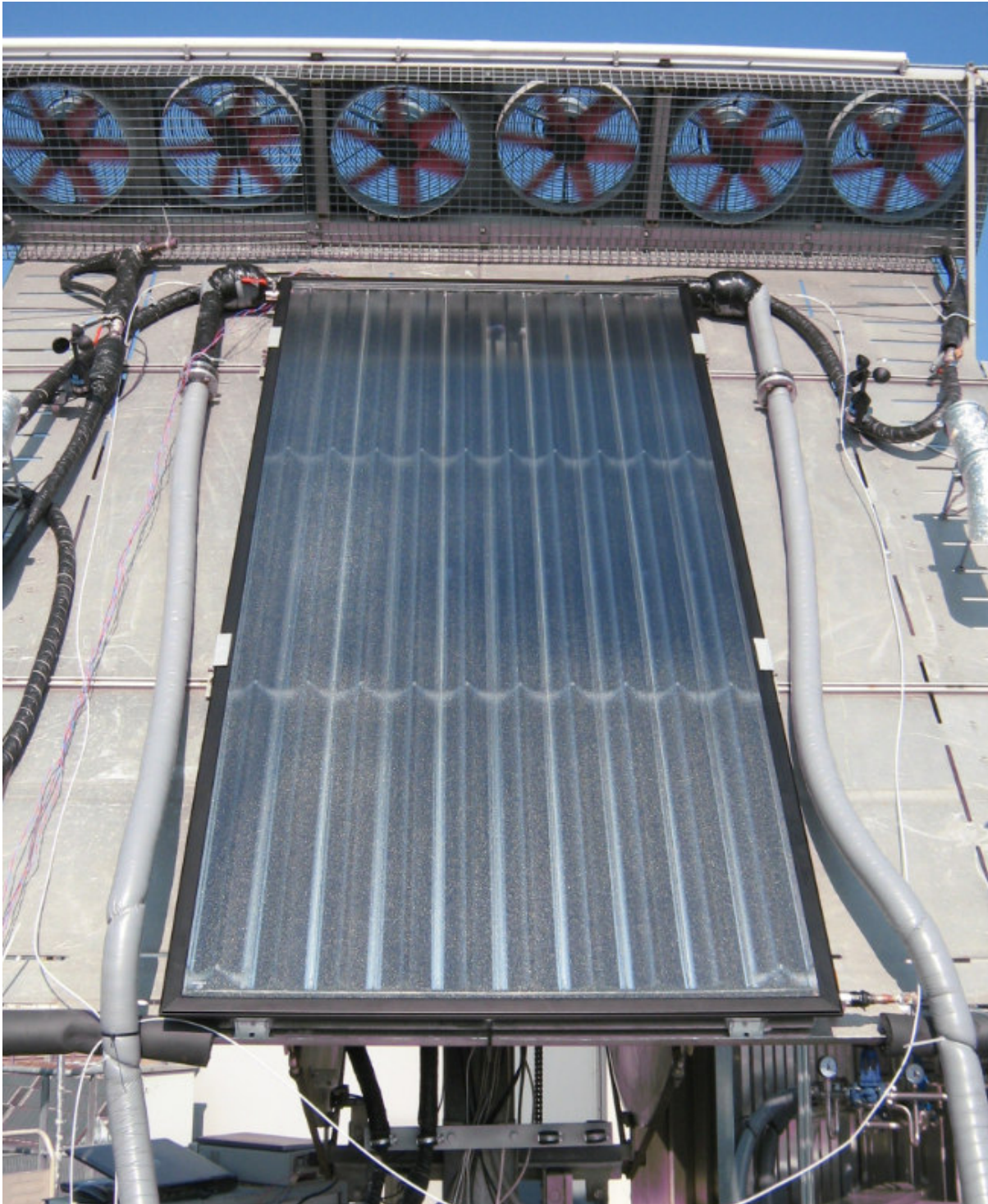


Abbildung 22: Funktionsmuster 1 – „CPC S1 092011“ auf dem Tracker zur Vermessung des Wirkungsgrades.

Funktionsmuster 2 – „PT1 (2012)“:

Aus den Leistungsmessungen des Funktionsmusters 1, den ersten Simulationen sowie eingehendem Literaturstudium wurde klar, dass mit der Geometrie des Serienkollektors kein Mitteltemperaturkollektor möglich ist. Insbesondere muss der Konzentrationsfaktor erhöht werden. Positiv bei den Leistungsmessungen von Funktionsmuster 1 waren jedoch die reduzierten Wärmeverluste (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) zu bemerken, weshalb der Ansatz mit „Argonfüllung + Isolierung“ weiterverfolgt wurde.

Folgende Änderungen wurden daher im Funktionsmuster 2 umgesetzt:

- Spiegelgeometrie und -material
- Absorbergeometrie, -material und –beschichtung
- Argonfüllung
- Isolierung
- Glasabdeckung

Spiegel:

Um einen entsprechenden optischen Wirkungsgrad erzielen zu können, wurde erneut die Spiegelbeschichtung mit der solaren Reflexion von 95% verwendet.

Aus der CPC-Literatur ist bekannt⁸, dass für einen Mitteltemperaturkollektor ein höherer Konzentrationsfaktor als jener des Serienkollektors notwendig ist. Für den PT1 wurde sich für eine Geometrie entschieden (siehe Bild in Abbildung 23), die einen Halb-Akzeptanzwinkel von 20° und eine „truncation“ von 50% (d.h. halbe volle CPC-Spiegelhöhe) aufweist. Damit wird ein Konzentrationsfaktor von 2,5 erreicht. Zudem ist durch den Akzeptanzwinkel von 20° gewährleistet, dass bei Ost-West-Ausrichtung der Spiegelrinnen („liegend“) und einem Aufstellwinkel von ca. 40° für einen Standort in Südeuropa (geographische Breite ca. 40°), im Winter als auch im Sommer praktisch die gesamte direkte Sonneneinstrahlung aufgefangen werden kann (bei niedrigem Sonnenstand im Winter liegt zu Mittag die „flache“ Einstrahlung am unteren Rand des möglichen Auffangbereichs, bei höherem Sonnenstand im Sommer am oberen Rand; da sich der Eintrittswinkel der Sonnenstrahlung natürlich auch über den Tagesgang stark ändert, muss letztendlich eine Jahressimulation durchgeführt werden, um einen tatsächlichen Solarertrag zu erhalten. Abbildung 17 zeigt Ergebnisse für den PT1).

Absorber:

Im Serien-CPC findet sich ein Absorber aus Kupfer, bestehend aus Kupferharfe und selektiv beschichteten Absorberfinnen. Da in einem angestrebten Mitteltemperaturkollektor vor allem in Stagnation sehr hohe Temperaturen und Drücke auftreten können, wurde beschlossen auf Stahl umzusteigen.

Aufgrund der neuen Geometrie ist zudem keine Finne mehr notwendig, da ohnehin das Absorberrohr bereits den Großteil der Einstrahlung einsammelt. Bei senkrechter Einstrahlung können in diesem Design ca. 80% der eintreffenden Strahlen absorbiert werden. Die meisten Lichtstrahlen der restlichen

⁸ Z.Bsp.: A. Rabl, Comparison of Solar Concentrators, Solar Energy 18 (1976)

20% passieren den Spalt zwischen Spiegel und Absorber und werden wieder aus dem Kollektor herausreflektiert. Um die „Fertigungsrobustheit“ der Konstruktion zu testen, wurden ebenfalls Ray-Tracing Simulationen bei unterschiedlichen Absorberpositionen (und damit Spaltabstände Spiegel-Absorber) berechnet (Abbildung 23).

Selektive Beschichtungen sind bereits Industrie-Standard für flache Absorber als auch Receiver in großen Parabolrinnen für Solarkraftwerke. Für die hier benötigten Anforderungen war es im Projekt allerdings sehr schwierig Hersteller zu finden, die Stahlrohre mit den benötigten Abmessungen (insb. Länge, Durchmesser) und thermischen Anforderungen (selektive Flachkollektorbeschichtungen halten den hier auftretenden Stagnationstemperaturen auf Dauer nicht Stand und haben zudem bei den höheren Einsatztemperaturen bereits eine Emissivität von oft mehr als 0,15) selektiv beschichten können. Vorgespräche und –versuche mit verschiedenen Anbietern verliefen leider ergebnislos, weshalb auf eine alternative Beschichtung mit geringerer Selektivität (Energie Solaire) zugegriffen werden musste. Ebenso konnten aus produktionstechnischen Gründen die Sammelrohre nicht beschichtet werden. Abbildung 24 zeigt die im PT1 verwendete Absorberharfe, welche aus 8 parallelen Absorbern besteht, die in U-Konfiguration durchströmt werden.

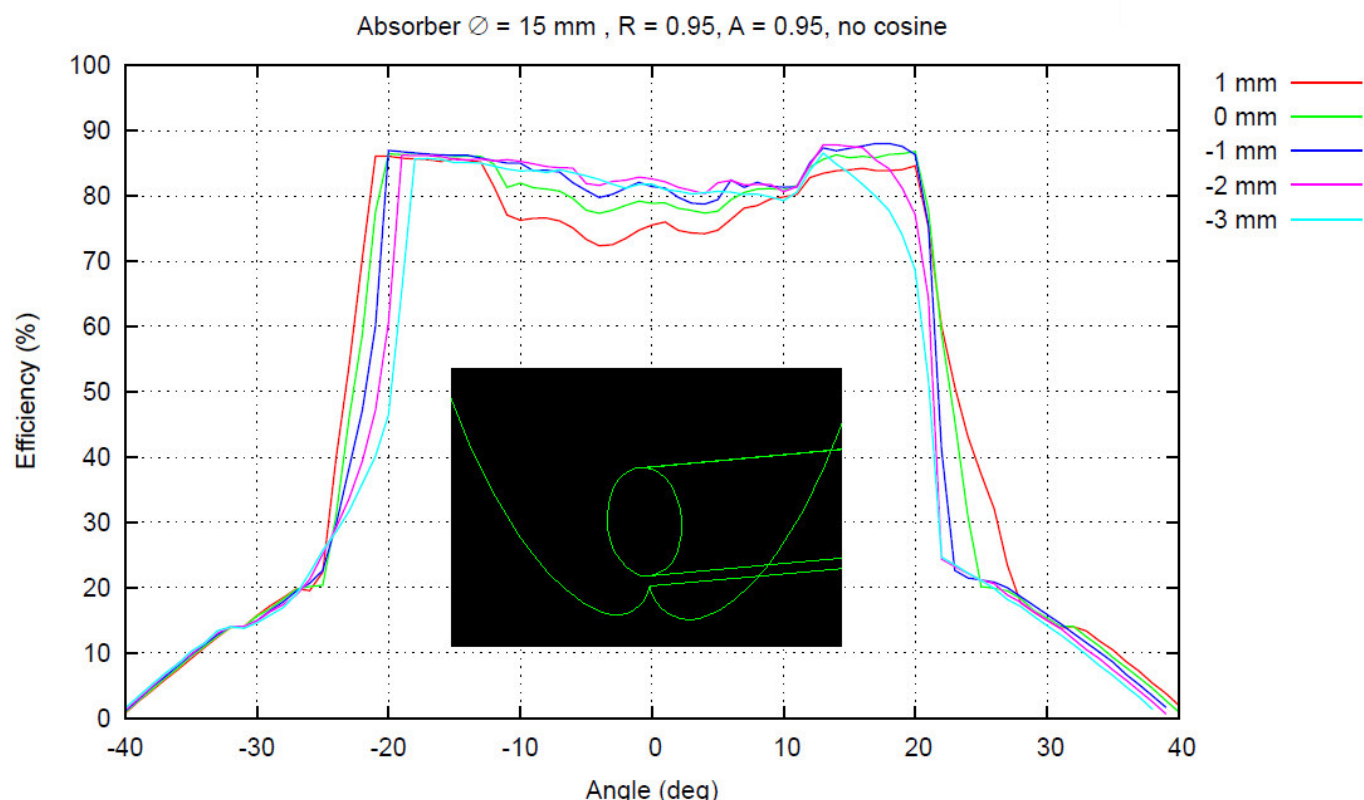


Abbildung 23: Ray-Tracing Ergebnisse für die Geometrie des PT1 für unterschiedliche Positionen des Absorberrohres (0 mm entspricht der idealen Position, +/- x mm bedeutet eine Verschiebung um x mm nach unten oder oben) (Bemerkung: um die Rechenzeit zu beschleunigen, wurde mit „relativ“ wenigen Strahlen gerechnet, weshalb „wellenartige, teil asymmetrische“ Kurven resultieren).

Argonfüllung:

Da die Leistungsmessungen des vorangegangenen Funktionsmusters durchaus positive Effekte bei Argonfüllung zeigten, wurde das in diesem Prototyp beibehalten. Mittels Ventil war es möglich den

Kollektor auch nach dem Zusammenbau mit Argon zu füllen, weshalb Kennlinien sowohl mit Luft- als auch Argonfüllung aufgenommen werden konnten (Ergebnisse siehe Leistungskennlinien in der Beschreibung von AP5 unten).

Isolierung:

Es gibt bestimmte Schaumstoffisolierungen, die ebenfalls andere Gase als Luft in deren Zellen beinhalten (dies kann durch spezielle Schaumstoffgrundchemikalien erreicht werden). Dadurch lassen sich bessere Dämmeigenschaften als mit Luft gefüllten Schaumstoffen erreichen⁹. Für den PT1 wurde ein solcher Schaumstoff (von puren GmbH) verwendet, der zusätzlich eine gewisse Temperaturstabilität aufweisen sollte. Thermogravimetriemessungen zeigten dass ein signifikanter Materialabbau erst ab über 200-220°C auftreten sollte. Die Kollektorrückwand und die Kollektorseitenwände wurden mit dieser Isolierung ausgekleidet (Abbildung 25 links).

Glasabdeckung:

Im Serien-CPC wird das in der Branche übliche eisenarme Solarglas eingesetzt. Die solare Transmission solcher Gläser liegt typischerweise bei ca. 90-92%. Reflexionverluste aufgrund der unterschiedlichen Brechungsindizes von Glas und der umgebenden Luft können durch eine Antireflexschicht vermindert werden. Typischerweise kann je Reflexionschicht (beide Glasseiten können natürlich getrennt beschichtet werden) ca. 2% solare Transmission gewonnen werden. Für den PT1 wurde sich (u.a. aus kosten- und verarbeitungstechnischen Gründen) für eine einseitige Antireflexbeschichtung entschieden, wodurch die solare Transmission bei 94% lag.

Abbildung 26 zeigt das zweite Funktionsmuster PT1 direkt nach dem Zusammenbau. Der Kollektor wurde in weiterer Folge am AIT vermessen (Ergebnisse der Leistungsmessungen siehe nächster Abschnitt).

⁹ Die Überlegungen bzgl. geeigneter Isoliermaterialien im Projekt MasterCPC gaben mitunter den Anstoß für eine andere Projekteinreichung, bei dem systematisch nach neuen Isolierungen für Solarkollektoren und Wärmespeicher gesucht wurde: das Projekt ISolar ist ein anderes, am AIT bis 30.9.2014 laufendes FFG-Projekt.



Abbildung 24: Harfe aus Stahl mit beschichteten Absorberrohren.

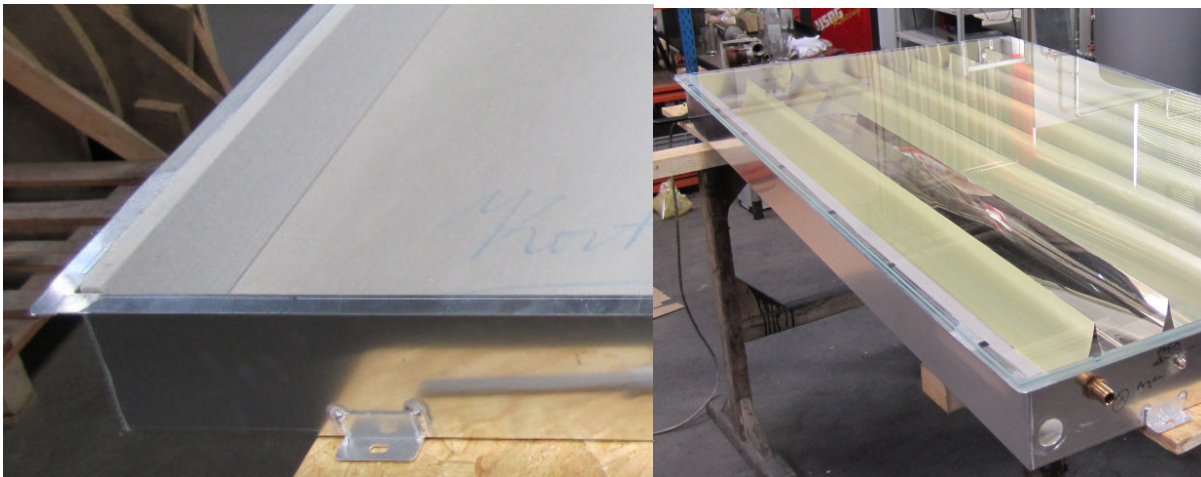


Abbildung 25: Links: Wanne mit Spezialschaumstoffisolierung. Rechts: Zwischenstufe im Kollektorzusammenbau.

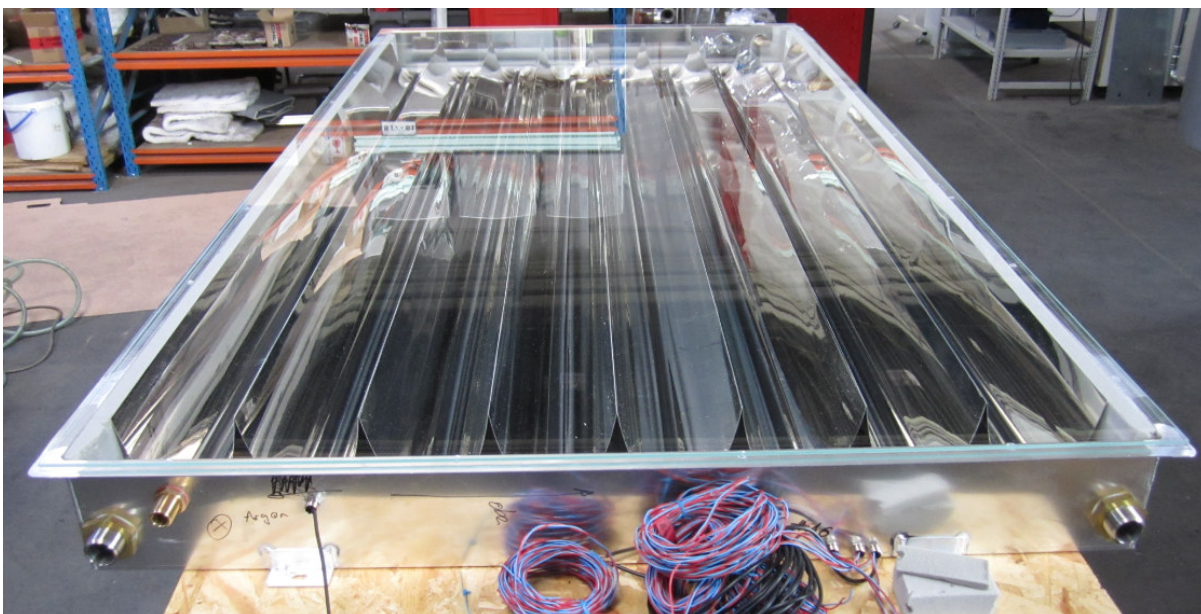


Abbildung 26: Zweites Funktionsmuster im Projekt (PT1) direkt nach dem Zusammenbau.

Funktionsmuster 3 – „PT 2013“:

Aus den Erfahrungen der Vermessungen des Funktionsmusters 2, eingehenderen Ray-Tracing und CFD-Simulationen sowie erneutem Literaturstudium wurde schließlich ein drittes, finales Funktionsmuster, der „PT2013“ designt, gebaut und vermessen.

Folgende Änderungen wurden im Funktionsmuster 3 umgesetzt:

- Spiegelgeometrie und -material
- Absorbergeometrie, -material und –beschichtung (10 statt 8 parallele Rohre)
- Argonfüllung + Glasabdeckung
- Isolierung

Spiegel:

Um einen entsprechenden optischen Wirkungsgrad erzielen zu können, wurde erneut die Spiegelbeschichtung mit 95% solarer Reflexion gewählt.

Zusätzlich wurde die Geometrie im Bereich des Absorberrohres dahingehend optimiert, dass die optischen Verluste aufgrund von „wieder aus dem CPC reflektierten Strahlen“ minimiert werden. In Abbildung 27 sind 3 verschiedene Varianten dargestellt (in dieser Version für den „untruncated“ Spiegel; u.a. um Bauhöhe zu sparen, wurde im PT2013 wieder auf 50% „truncated“; die entstehenden optischen Verluste sind gering, wie sich leicht berechnen lässt), wobei die Version „Sicke2“ als die vielversprechendste Variante gefunden wurden. Fertigungstechnisch sind der Formung von Spiegeln Grenzen gesetzt, Sicke 2 ist hier noch eine relativ einfache Variante was zusätzlich für diese Version sprach. In Abbildung 28 sind die fertigten Spiegel zu sehen.

Absorber:

Es wurde erneut Stahl als Rohrmaterial verwendet und diesmal 10 Rohre, in U-Konfiguration durchströmt, gebaut.

Obwohl sowohl aus den Messungen von PT1, als auch den Simulationen bereits bekannt, dass eine selektive Beschichtung tatsächlich die Wärmeverluste durch Abstrahlung „um einiges“ verringern kann, war es leider auch im PT2013 nicht möglich einen Absorber entsprechend beschichten lassen zu können. Es wurden erneut verschiedene Gespräche mit unterschiedlichen Firmen geführt, und sogar bereits Muster geliefert und untersucht, bis zum Projektende konnte aber trotzdem kein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht werden. Daher wurde erneut auf die Energie Solaire Beschichtung zurückgegriffen.

In Abbildung 29 und Abbildung 30 ist die Konstruktion und spätere Ausführung dargestellt.

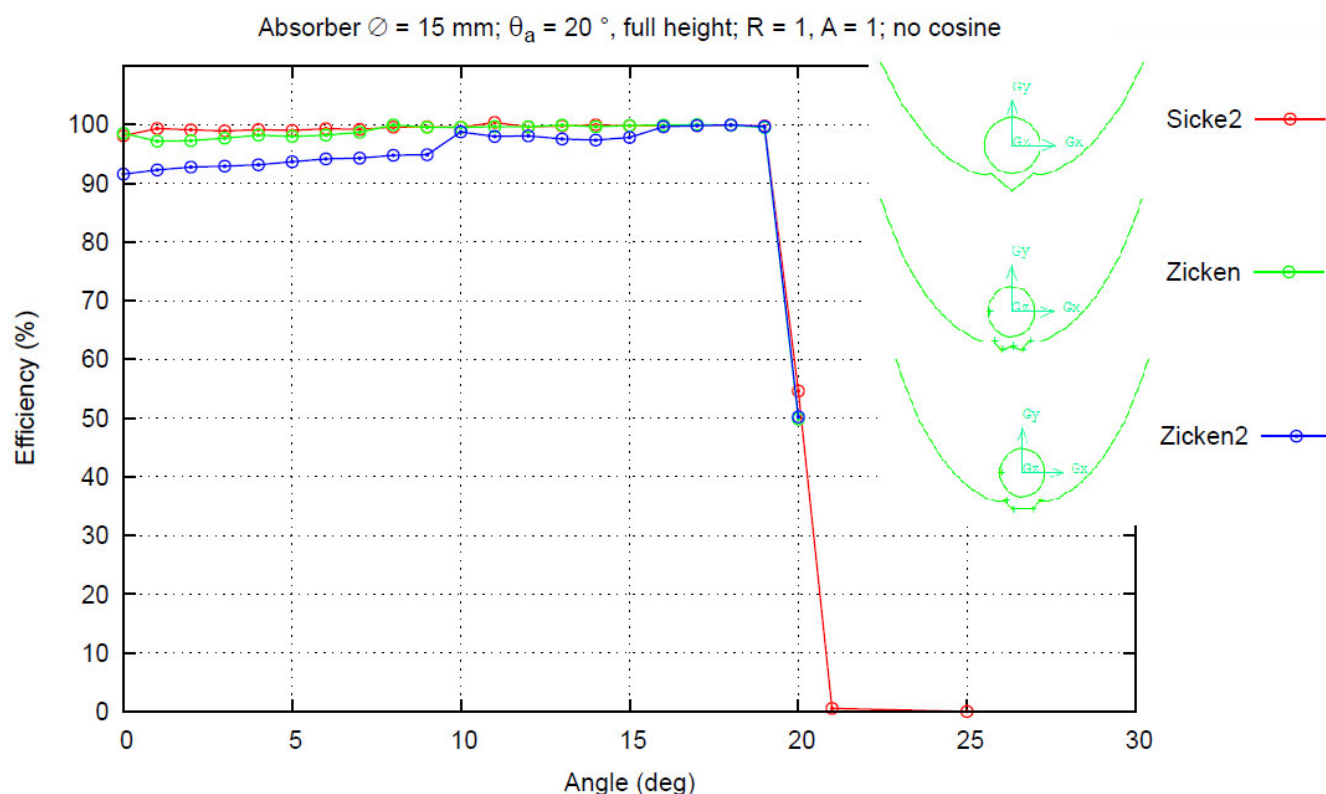


Abbildung 27: Ray-Tracing Ergebnisse für verschiedene Varianten des PT2013 (hier für den Fall eines „untruncated“ Spiegel).

Isolierung:

Bei den Leistungsvermessungen des PT1 konnten drei wesentliche Mängel bzgl. Isolierung festgestellt werden:

- Die Seitenwandisolierung war zu dünn, weshalb zu hohe Wärmeverluste über die Seitenwand auftraten.
- Speziell da die Sammelrohre nicht selektiv beschichtet waren, strahlten diese sehr viel Wärme ab (Abbildung 32).
- Die Zellen des Isolierschaumstoffes wurden einerseits durch UV-Licht und andererseits durch thermische Belastung zerstört. Die Folge davon ist ein kontinuierlicher Abbau („zerbröseln“) des Schaumstoffes und eine Verschlechterung der guten Wärmeisolierung¹⁰ (Abbildung 31).

Insbesondere aus letzterem Grund wurde beim PT2013 wieder auf den PU-Schaumstoff der Fa. Eurofoam zurückgegriffen, der um UV-Schädigung zu verhindern, mit Vlies kaschiert wurde. Es wurde eine dickere Seitenwandisolierung verwendet und zusätzlich der Schaumstoff in „Spiegelform“ geschnitten. Dadurch erreicht man eine bessere Wärmedämmung und zusätzlich einen fertigungstechnisch positiven Effekt, da die Isolierung nun die Spiegel positioniert. Ebenso wurden die Sammler mit einer Kombination aus ausgasungsarmer Glaswolle und Schaumstoff isoliert.

¹⁰ Im Projekt ISOLAR wurden detaillierte Untersuchungen durchgeführt, die diese Schlussfolgerungen untermauern.

Argonfüllung und Glasabdeckung:

Zur Minimierung der Wärmeverluste nach vorne, wurde im PT2013 ein Ansatz mit Doppelabdeckung gewählt:

Die einfache Glasabdeckung des PT1 wurde durch einen Isolierglasverbund mit speziellen Beschichtungen ersetzt. Dieser besteht aus 2 parallelen Glasscheiben mit einem optimierten Abstand, die dicht verklebt sind. Der Zwischenraum ist mit Argon gefüllt. Die Glasscheiben selbst sind beschichtet, wobei 2 Varianten untersucht wurden (Variante 1: Antireflexschicht auf allen 4 Glasflächen; Variante 2: auf 3 Glasflächen Antireflexschicht, auf der vierten Glasfläche eine sogn. „low-e-Schicht“, welche sich durch besonders niedrige Infrarotemissivität auszeichnet).

Abbildung 33 und Abbildung 34 zeigen den Kollektor ohne Glasabdeckung sowie das finale Funktionsmuster, wie es im Anschluss am AIT quasi-dynamisch vermessen wurde.



Abbildung 28: Spiegel und angepasste Isolierung des PT2013.

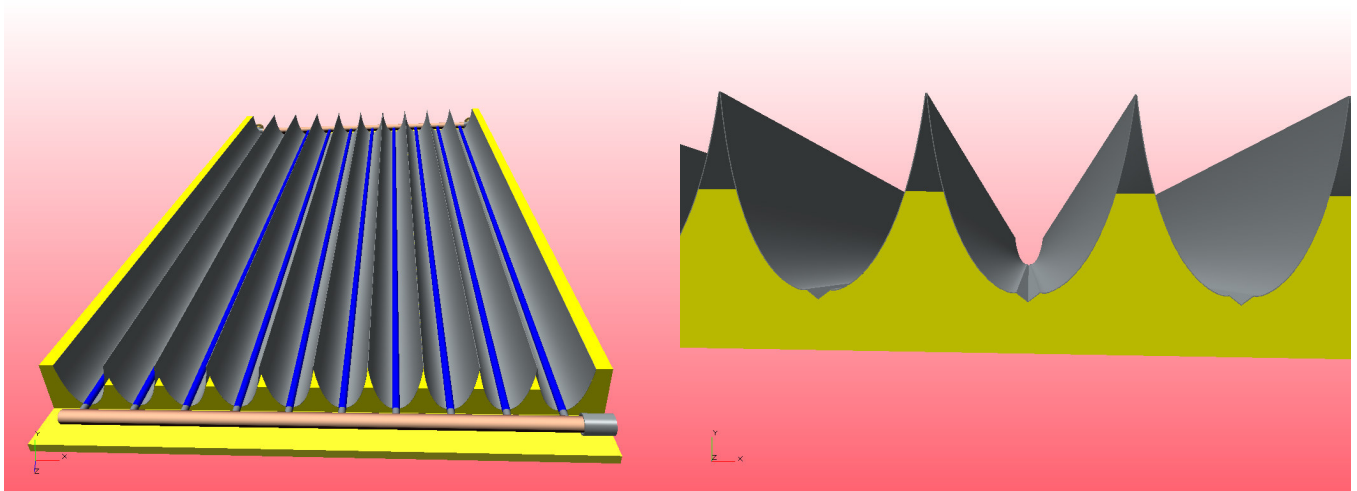


Abbildung 29: Konstruktionszeichnungen des PT2013.

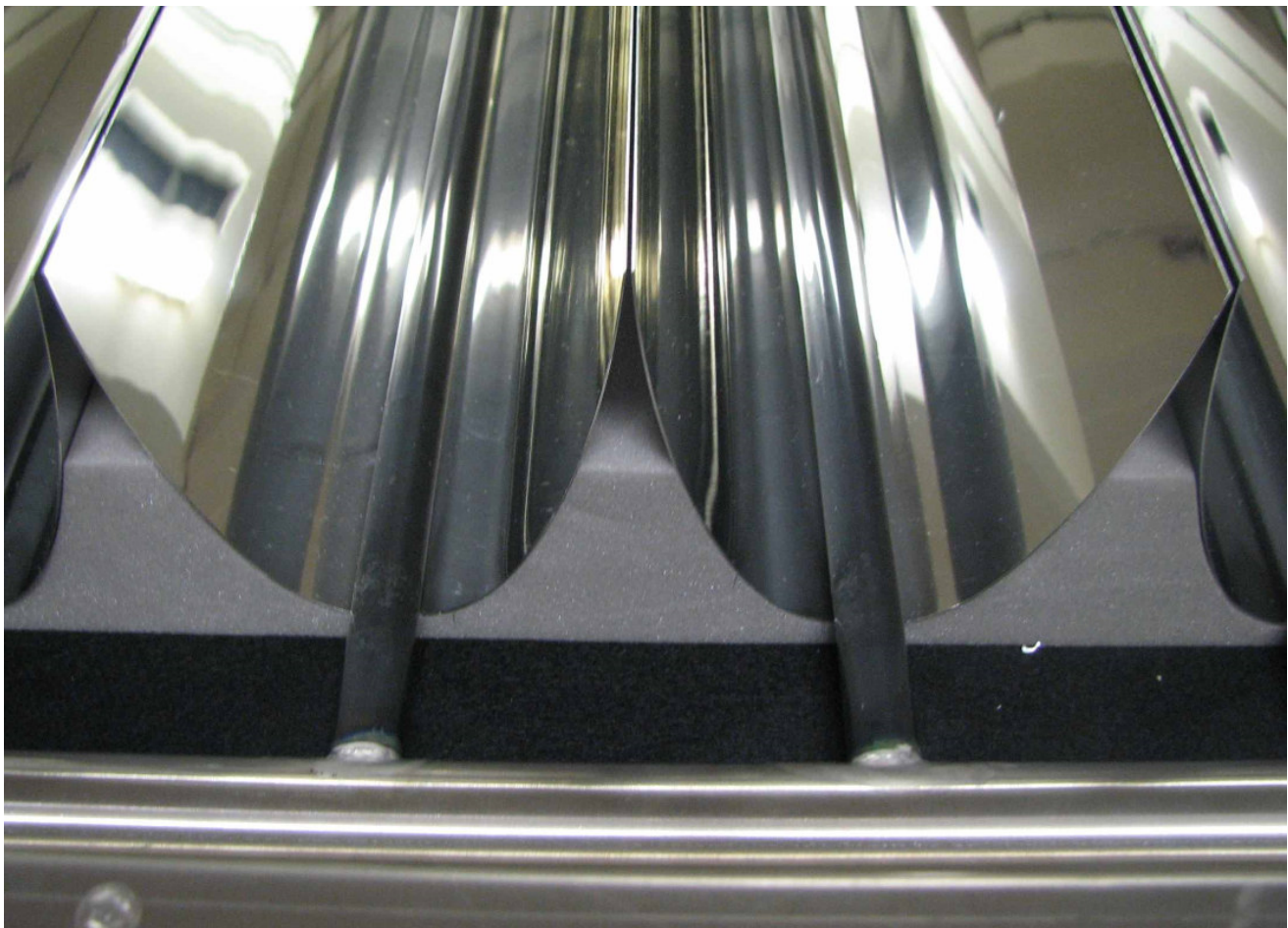


Abbildung 30: Harfe, Spiegel und Isolierung des PT 2013.



Abbildung 31: Detailaufnahme der Isolierung des PT1 nach der Vermessung.

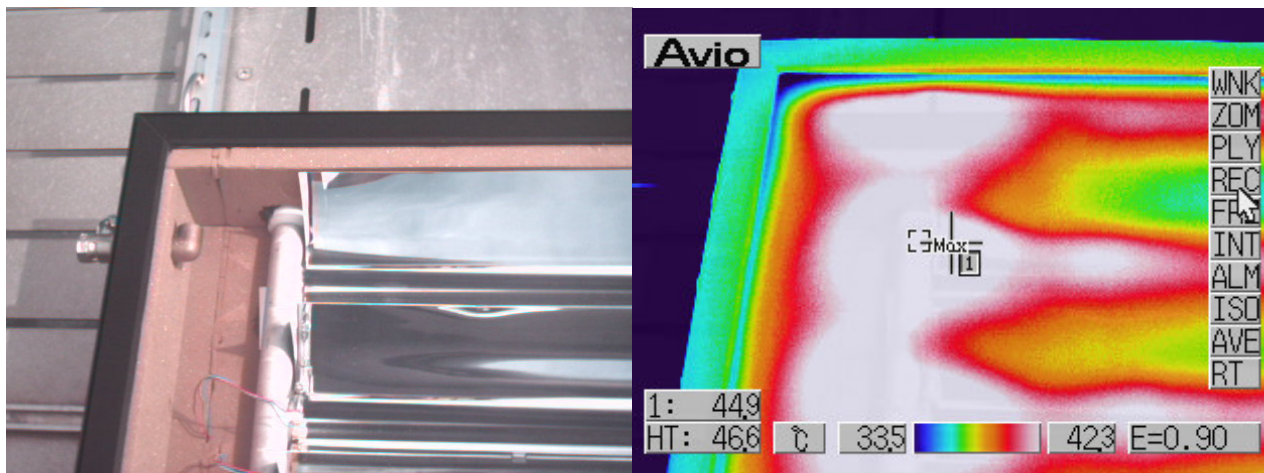


Abbildung 32: Thermographieaufnahmen des PT1 während des Betriebs.

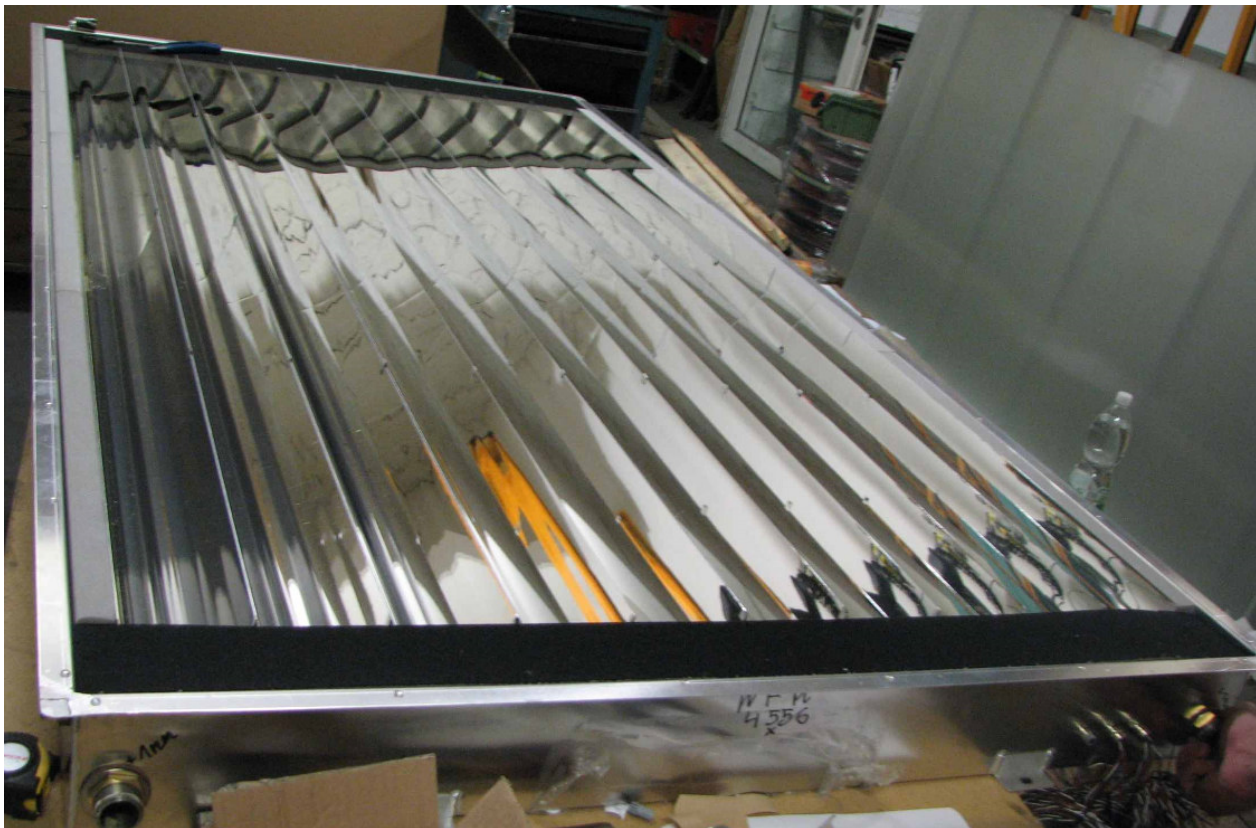


Abbildung 33: PT2013 ohne Doppelglasabdeckung.

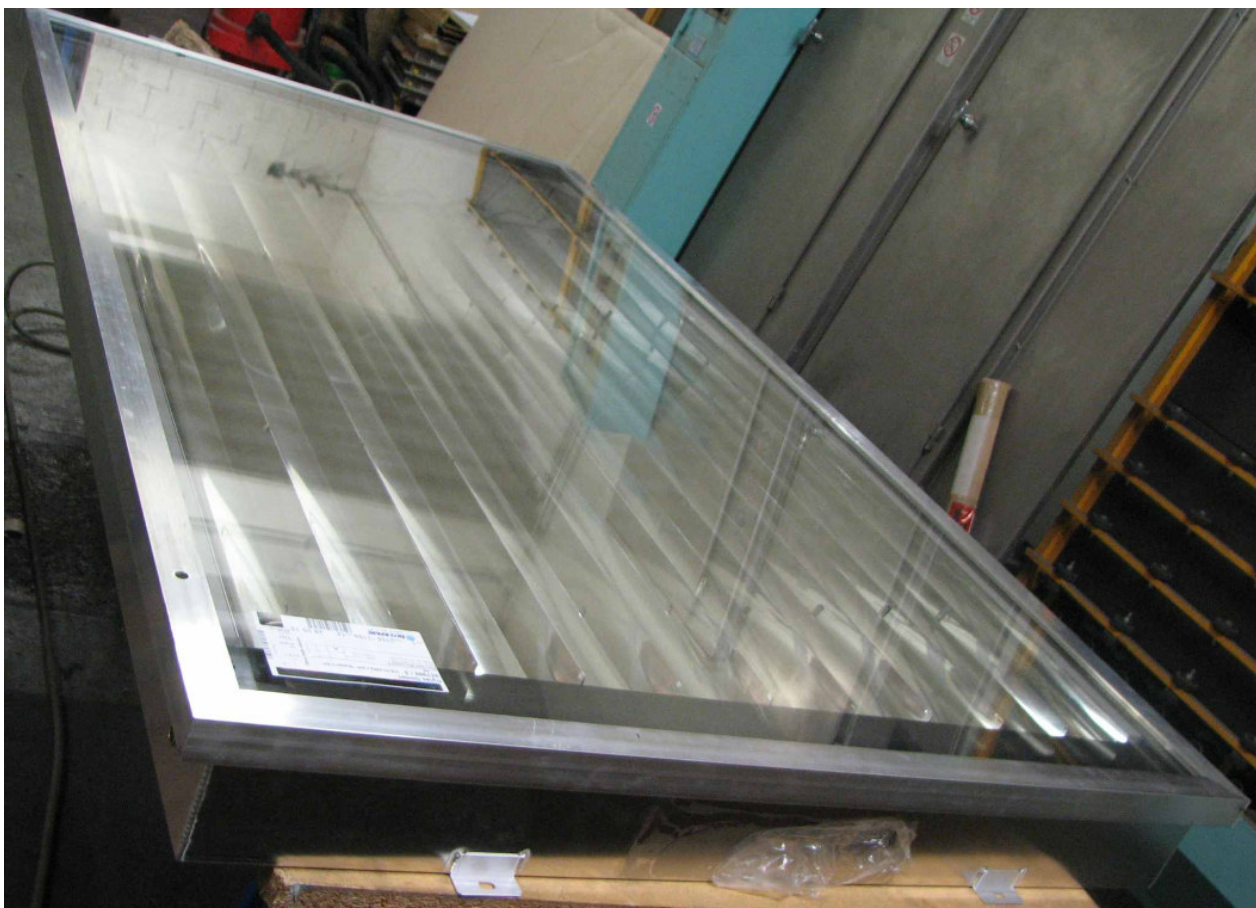


Abbildung 34: finaler PT2013 der am AIT quasi-dynamisch vermessen wurde.

1.4.4 Analyse der Mitteltemperaturfunktionsmuster (AP5)

Alle gebauten Funktionsmuster wurden am AIT verschiedenen Messungen unterzogen. Neben Leistungsmessungen am Tracker, wurden u.a. Druckverlust- und Stagnationuntersuchungen durchgeführt.

Abbildung 35 zeigt die Ergebnisse der Druckverlustmessung am PT1. Aufgrund der großen Rohrquerschnitte ist der Druckverlust sehr gering, was eine hohe Anzahl an seriell verschalteten Kollektoren in realen Anlagen ermöglicht.

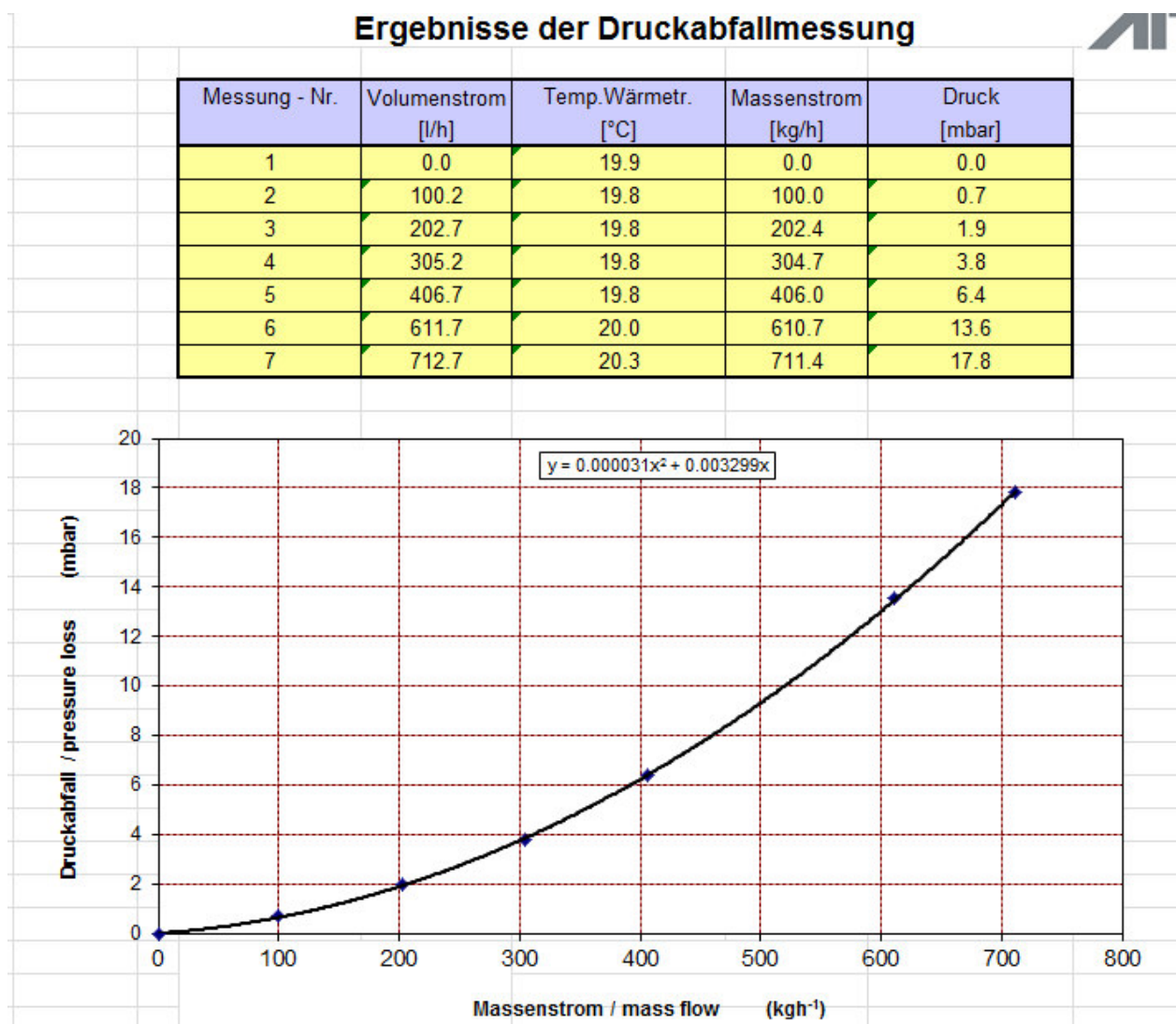


Abbildung 35: Ergebnis der Druckverlustmessungen am PT1.

Alle Funktionsmuster sind „möglichst dicht“ konstruiert, um die zu gewährleisten, dass die Argonfüllung möglichst lange im Kollektor erhalten verbleibt. Vor allem in Stagnation führt das, aufgrund entsprechender Volumsausdehnung des eingeschlossenen Gases, mitunter zu erheblichen Belastungen

für die Rahmenkonstruktion, insb. für die Glasabdeckung. Daher wurden verschiedene Stagnationstests durchgeführt, um die Belastbarkeit der Konstruktion zu testen (Bsp. PT1: Abbildung 36).

Positives Ergebnis war, dass alle getesteten Kollektoren den üblichen Stagnationsbedingungen Stand gehalten haben und dass insbesondere die Spiegel- und Absorbergeometrie durch den Stagnationsfall nicht gestört wurde.



Abbildung 36: Stagnationstest des PT1 auf dem Tracker. Die Volumsausdehnung der Argonfüllung führt zum „Aufblähen“ des Kollektors.

Die Leistungsvermessung der beiden Funktionsmuster PT1 und PT2013 erfolgte auf dem Mitteltemperaturprüfstand mittel quasidynamischer Messmethode (QDT):

Das bei der QDT angewendete Kollektormodell unterscheidet sich von dem bei der stationären Methode verwendeten Modell in der Form, dass es um mehrere Korrekturglieder erweitert wird. Diese Korrekturglieder berücksichtigen die Kollektorleistungs-Abhängigkeit von der

- direkten und diffusen Bestrahlungsstärke,
- des Strahlungs-Einfallswinkels,
- der langwelligen Strahlung,
- der Umgebungs-Windgeschwindigkeit und
- der Wärmekapazität des Kollektors.

Dies hat den Vorteil, dass man eine umfassende Abbildung des Verhaltens eines solarthermischen Kollektors bei unterschiedlichen Umgebungs- bzw. Strahlungsbedingungen erhält. Nachfolgend ist die QDT Kollektormodellgleichung ersichtlich:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = F'(\tau\alpha)_{en} K_{\theta b}(\theta) G_b + F'(\tau\alpha)_{en} K_{\theta d} G_d - c_6 u G^* - c_1 (t_m - t_a) - c_2 (t_m - t_a)^2 - c_3 u (t_m - t_a) + c_4 (E_L - \sigma T_a^4) - c_5 \frac{dt_m}{dt}$$

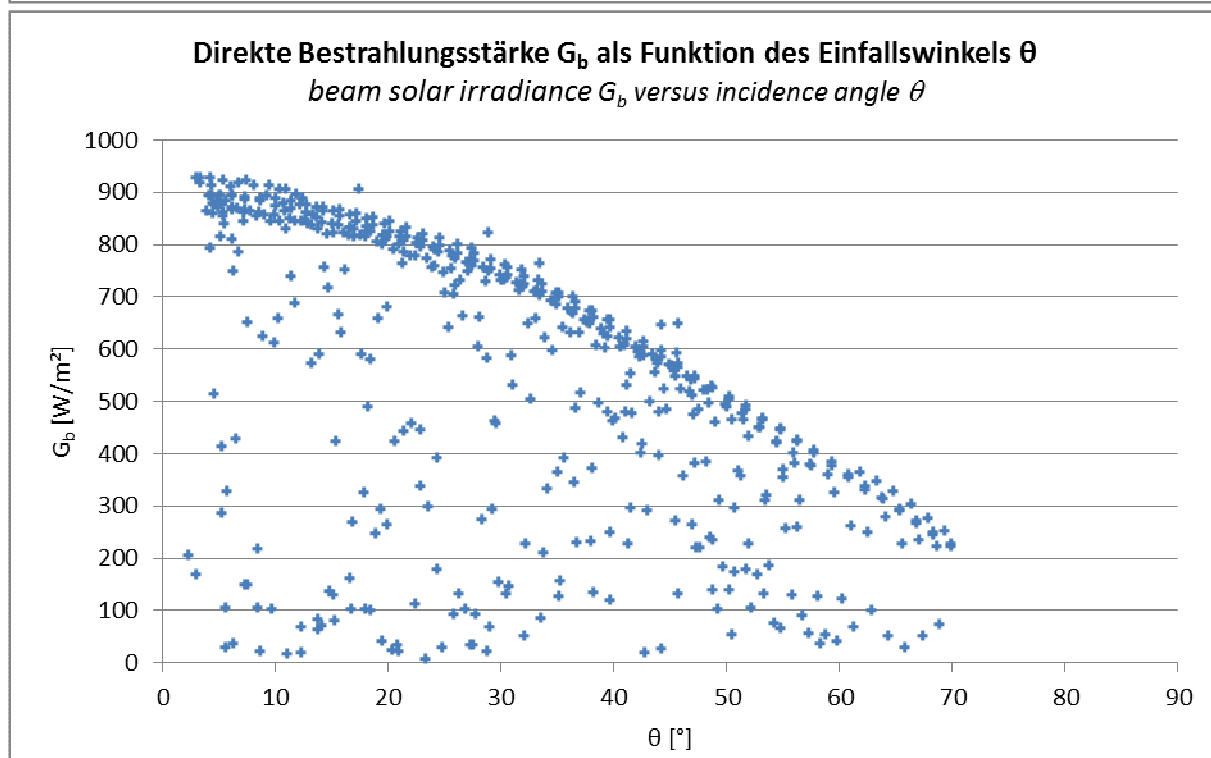
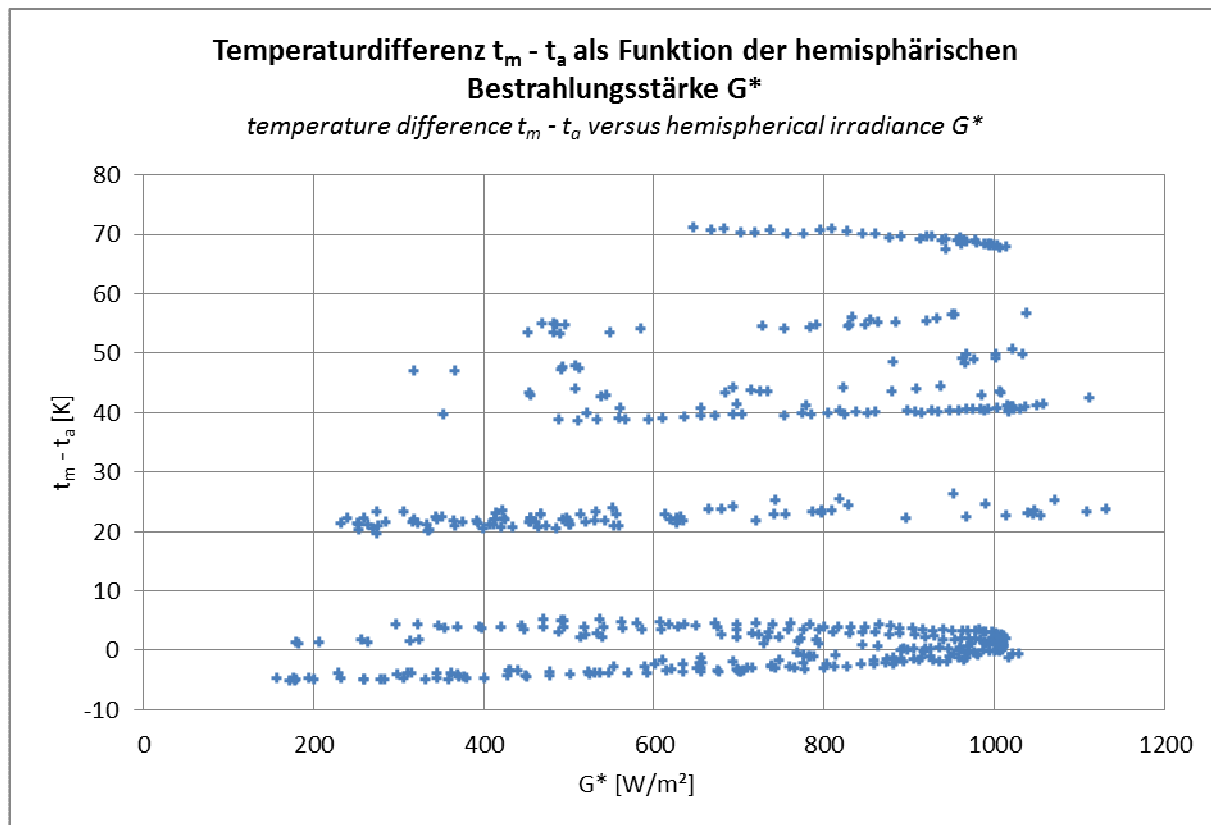
Nomenklatur

A	Bezugsfläche des Kollektors	m^2
c_{eff}	effektive Wärmekapazität des gesamten Kollektors	JK^{-1}
c_1	Wärmedurchgangskoeffizient	$Wm^{-2}K^{-1}$
c_2	temperaturabhängiger Wärmedurchgangskoeffizient	$Wm^{-2}K^{-2}$
c_3	Windgeschwindigkeit abhängiger Wärmedurchgangskoeffizient	$Jm^{-3}K$
c_4	Himmelstemperatur abhängiger Wärmedurchgangskoeffizient	-
c_5	flächenbezogene Wärmekapazität	$Jm^{-2}K^{-1}$
c_6	Windgeschwindigkeit abhängiger Koeffizient des Konversionsfaktors	sm^{-1}
$F'(\tau\alpha)_{en}$	Konversionsfaktor der direkten Bestrahlungsstärke	-
G_b	direkte Bestrahlungsstärke	Wm^{-2}
G_d	diffuse Bestrahlungsstärke	Wm^{-2}
$K_{\theta b}(\theta)$	Einfallswinkelkorrekturfaktor der direkten Bestrahlungsstärke	-
$K_{\theta d}$	Einfallswinkelkorrekturfaktor der diffusen Bestrahlungsstärke	-
$\dot{Q}$	Nutzleistung des Kollektors	W
t	Zeit	s
t_a	Umgebungslufttemperatur	$^{\circ}C$
t_m	mittlere Temperatur des Wärmeträgers im Kollektor	$^{\circ}C$
u	Umgebungsluftgeschwindigkeit	ms^{-1}
θ	Einfallswinkel der direkten Bestrahlungsstärke	$^{\circ}$

Bei einer QDT-Messung ist es erforderlich, dass eine ausreichende Anzahl an Messpunkten bei allen, auf die Kollektorleistung ausschlaggebenden, Bedingungen aufgenommen wird. Es bedarf daher einer Variation der Kollektor-Betriebstemperatur sowie der Umgebungs- und Strahlungsbedingungen. Je nach Kollektortyp und den während der Kollektorvermessung vorherrschenden Umgebungsbedingungen kann der dafür erforderliche Zeitaufwand bis zu zwei Wochen betragen. Die einzelnen Korrekturfaktoren der QDT-Modellgleichung werden im Anschluss zur Messung unter Verwendung der „Multiple lineare Regression“ bestimmt.

Zur Beurteilung der Qualität und Aussagekraft der bereits aufgenommenen Messpunkte werden unterschiedliche Diagramme verwendet (Abbildung 37).

Abbildung 38 zeigt das finale Funktionsmuster PT2013 auf dem Tracker, wie es letztendlich vermessen wurde.



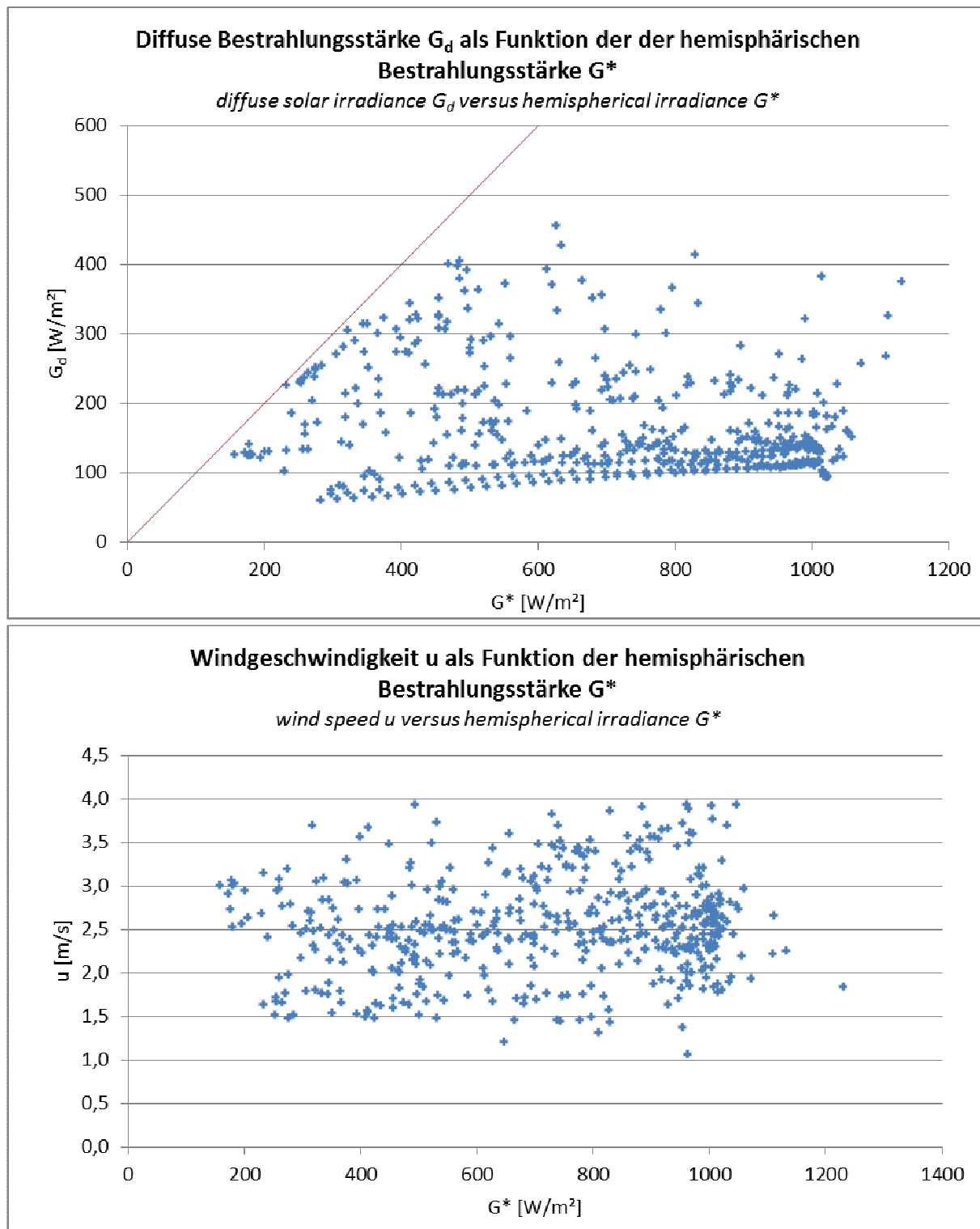


Abbildung 37: Verschiedene Diagramme, die die unterschiedlichen Prüfbedingungen während der quasi-dynamischen Kollektorvermessung darstellen.

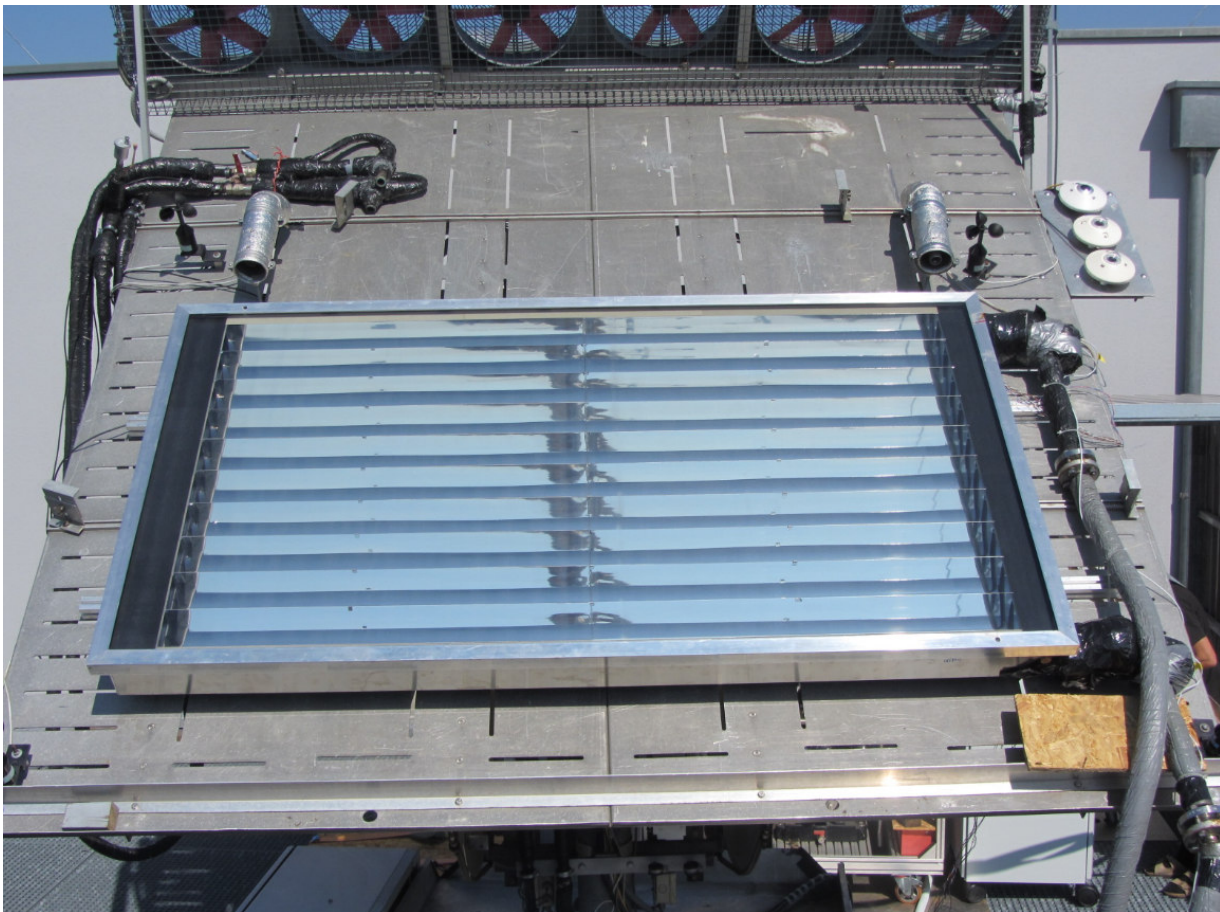


Abbildung 38: PT2013 auf dem Tracker zur quasi-dynamischen Leistungsvermessung.

Alle (relevanten) vermessenen Kennlinien der Kollektorfunktionsmuster sind in Abbildung 39 dargestellt. In üblichen Darstellungen wird oft auf Aperturfläche referenziert, bei realen Kollektorinstallationen ist ohnehin die Kollektorbruttofläche relevant. Um insb. die Eigenschaften der mit CPC-Spiegel versehenen Fläche analysieren zu können, sind die Kennlinien im Diagramm aber auf Spiegelfläche normiert.

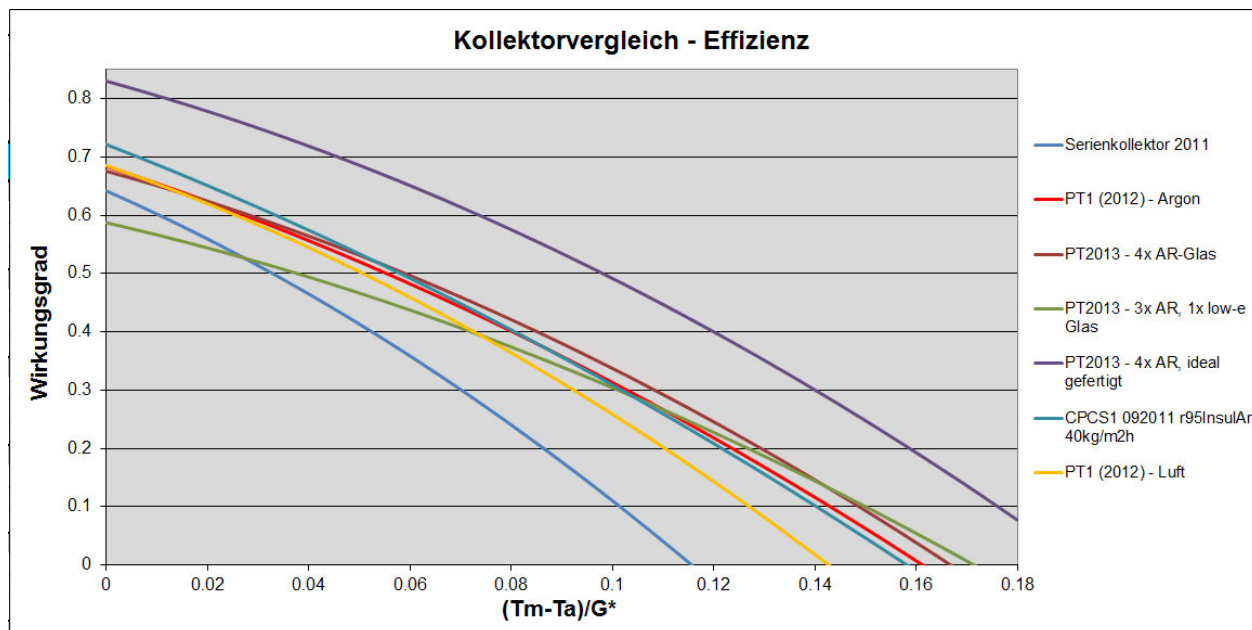


Abbildung 39: Vergleich der Wirkungsgradkennlinien verschiedener Kollektoren (T_m = mittlere Fluidtemperatur, T_a = Umgebungstemperatur, G^* = Einstrahlung)

In Abbildung 40 sind alle Parameter der quasi-dynamischen Kollektorgleichung für die beiden Varianten des PT2013 dargestellt (die Varianten unterscheiden sich durch die Beschichtung der Doppelglasabdeckung wie in AP4 beschrieben).

Quasi-dynamische Parameter		
Parameter	PT2013 (3x AR, 1x low-e)	PT2013 (4x AR)
$F'(\tau\alpha)_{en}$	0.5740	0.6668
b_0	0.4253	0.2908
$K_{ob(50^\circ)}$	0.7636	0.8384
K_{ed}	0.6017	0.5822
c_1	1.9992	2.3858
c_2	0.0083	0.0100
c_3	0	0
c_4	-0.5481	-0.5060
c_5	12949	14266
c_6	0	0

Abbildung 40: Zusammenfassung der quasi-dynamischen Parameter für die beiden Varianten des PT2013.

Ergebnisse und Erfahrungen des PT2013:

An dieser Stelle sei noch einmal erwähnt, dass das Ziel dieses Projektes keine Produktentwicklung war. Die beantragte Förderschiene „Industrielle Forschung“ erlaubt nur den Bau von Funktionsmustern und

zielt vielmehr auf Methodenentwicklung ab. Vor diesem Hintergrund sind grundsätzlich auch die Ergebnisse des Funktionsmusterbaus zu bewerten.

Generelle Performance:

Wie aus den Leistungskurven Abbildung 39 ersichtlich ist, war die Performance von allen gebauten Funktionsmustern im angestrebten Anwendungsbereich (gewünschte Kollektoraustrittstemperaturen von $> 80^{\circ}\text{C}$) wesentlich besser als jene des Serien-CPCs.

Positiv ist ebenfalls, dass die Wärmeverluste durch die verschiedenen getroffenen Maßnahmen wesentlich verringert werden konnten. Die flachste Kurve hatte dabei der PT2013 mit 3x Antireflex- und 1x low-e – Beschichtung.

Leider negativ ist allerdings zu bemerken, dass die optischen Verluste viel höher als erwartet ausgefallen sind. Dies ist aus den Effizienz-Werten bei $T_m = T_a$ ersichtlich („ η_0 “), da hier (theoretisch) keine Wärmeverluste auftreten. Am besten hat hier der nur durch bessere Spiegel verbesserte Serienkollektor CPCS1 092011 abgeschnitten.

Der PT1 und PT2013 4x Antireflex sind ein paar Prozent darunter ungefähr gleich schlecht. Dieses Ergebnis war allerdings nicht überraschend, und konnte leider schon beim Zusammenbau erwartet werden, wie im Folgenden für den PT2013 detaillierter erklärt wird:

Spiegel:

Die Spiegelgeometrien, welche für die neuen CPCs designt wurden, sind leider relativ schwierig zu fertigen. Letztendlich wurde nur eine Firma gefunden, die überhaupt zufriedenstellende Muster liefern konnte. Die maximale Spiegellänge ist dabei auf ca. 1m begrenzt, weshalb in den Kollektorfunktionsmustern je CPC-Rinne 2 Spiegeln hintereinander verwendet werden mussten. Hauptsächlicher Grund für die Fertigungsschwierigkeiten sind Verspannungen, welche sich im Spiegelmaterial beim Biegevorgang bilden und den Spiegel letztendlich aus der gedachten Form „verwinden“. In Abbildung 41 ist eine maßgetreue Schablone an verschiedenen Stellen in eine Spiegelrinne gelegt. Die Unzulänglichkeiten sind leider ganz offensichtlich.

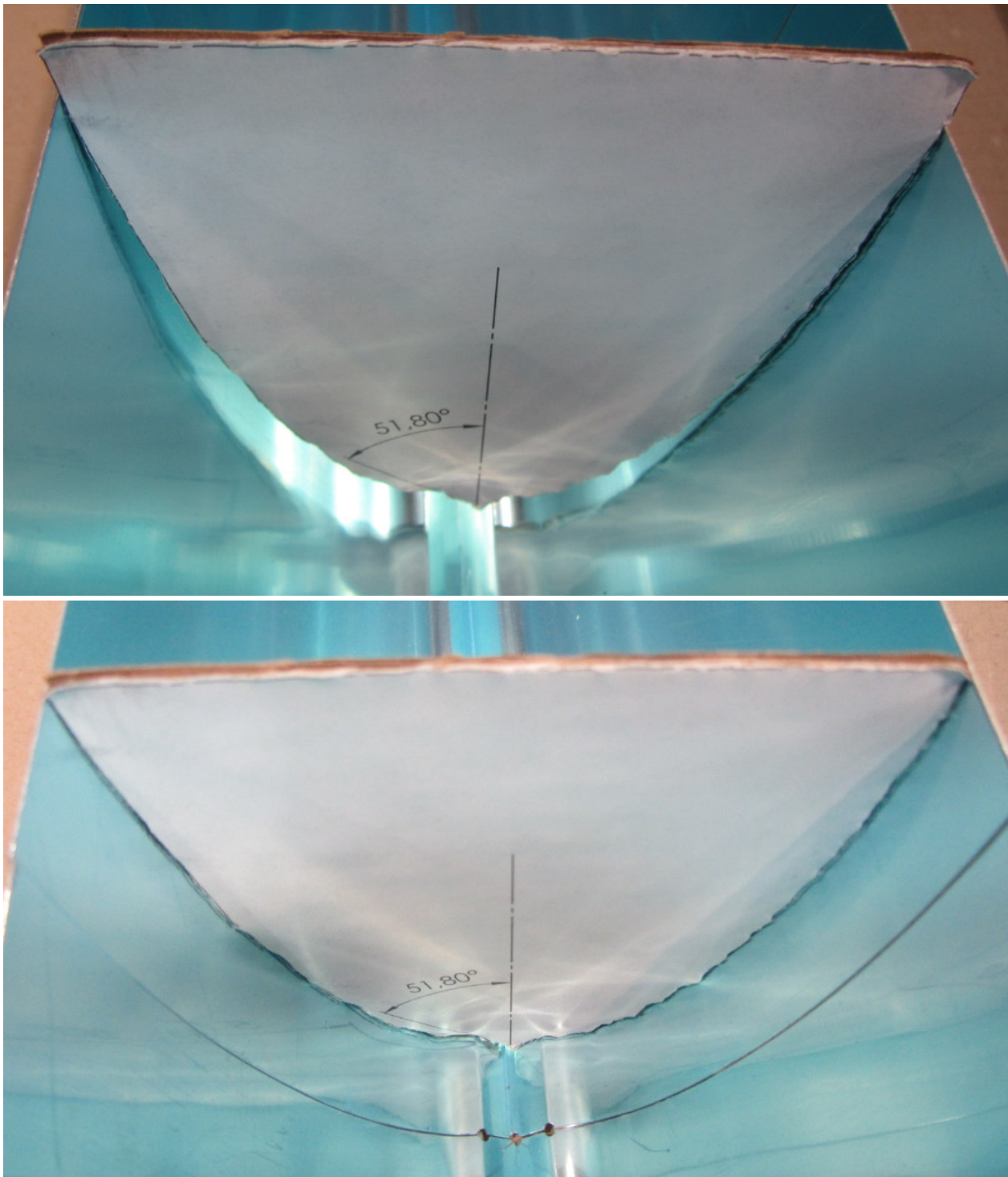


Abbildung 41: Schablone in 2 verschiedenen Positionen des PT2013.

Absorber:

Schon beim PT1 war die Qualität der Absorberrohre leider in Hinblick auf Geradheit leider sehr schlecht. Für den PT2013 wurden daher Gespräche mit verschiedenen Unternehmen bzgl. nahtlosen Präzisionsstahlrohren geführt, die eine gewünschte Geradheit aufweisen sollten. Lt. Spezifikationen sollte die Abweichung der Rohraußenwand vom Rohrzentrum nicht mehr als 1mm je Meter sein, was noch zu vernachlässigbaren optischen Verlusten geführt hätte. Die Rohre wurden beschichtet und

anschließend zu einer Harfe verschweißt. Leider musste allerdings am Ende festgestellt werden, dass sowohl die Geradheit der Rohre, als auch die Symmetrie der Harfe völlig unzulänglich war:

In Abbildung 42 links wurde zur Veranschaulichung eine gerade Metalleiste bündig an die rechte Ober- und Unterseite eines Absorberrohres angelegt und in die Abweichung in der Rohrmitte fotografiert. Die Dicke des Spaltes beträgt ca. 5 mm und ist zudem für jedes Absorberrohr völlig unterschiedlich, sowohl in Ausmaß, als auch in Richtung.

In Abbildung 42 rechts ist die Harfe bereits in den Kollektor eingebaut. Bei richtiger Fertigung ist die Harfe völlig symmetrisch und lässt sich nahtlos an beiden Sammelrohr-Durchgängen an die Kollektorseitenwand anschmiegen (die Kollektorwanne hatte die gewünschte Qualität). Wie auf dem Foto erkennbar, war die Qualität der Harfe leider ebenfalls sehr schlecht, wodurch letztendlich eine geplante Positionierung der Absorberrohre im Fokus der Spiegel im ganzen Kollektor nicht möglich war.

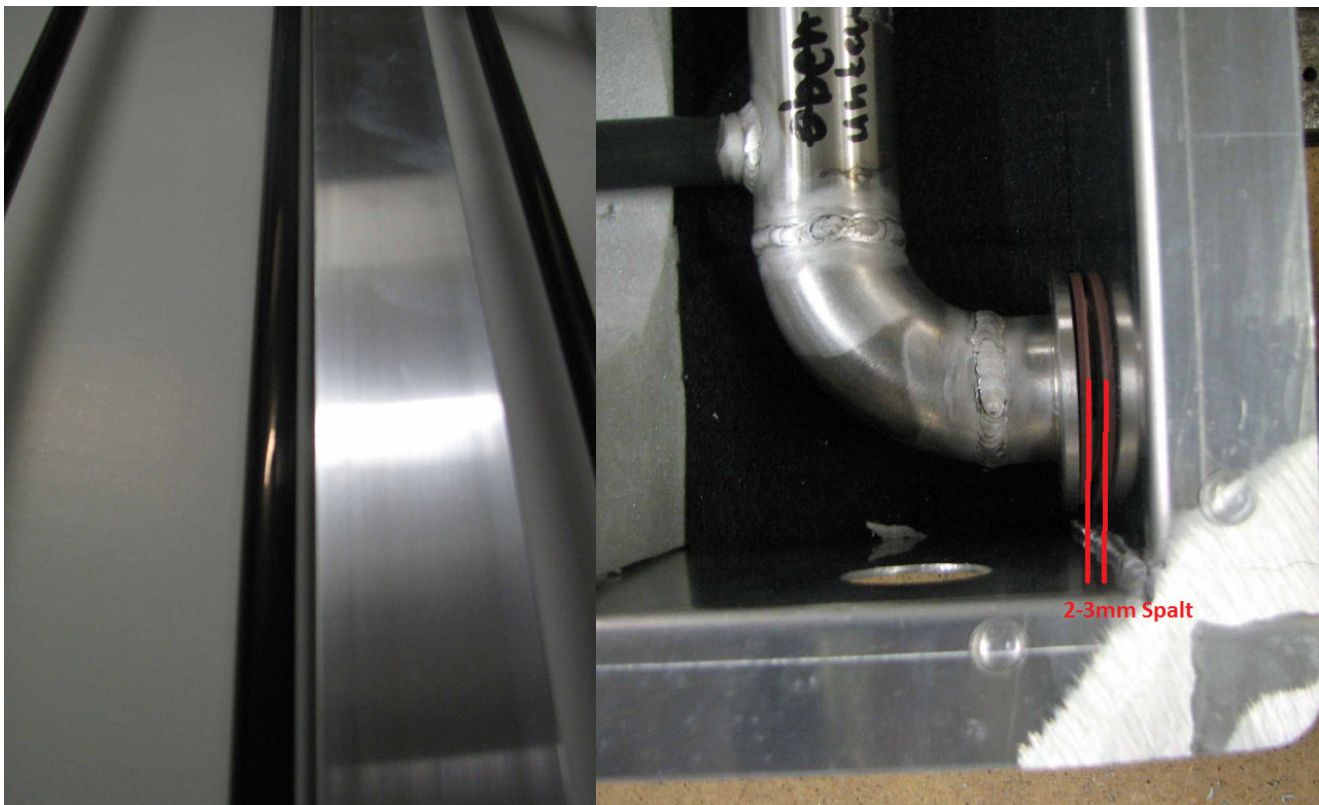


Abbildung 42: Links: Ausbuchtung der Absorberrohre. Rechts: Verwindung der Harfe erlaubt keine präzise Harfenpositionierung.

Glasabdeckung:

Eine der beiden Varianten der Glasabdeckung des PT2013 war ebenfalls nicht zur vollen Zufriedenheit geliefert werden. In Abbildung 43 ist die „3x Antiflex + 1x low-e“ Doppelisolierglasscheibe bereits im eingebauten Zustand abgebildet. Es sind dabei deutliche Schlieren zu erkennen, was sich ebenfalls negativ auf die optische Kollektorperformance ausgewirkt hat. Der um ca. 10% geringe η_0 Wert dieser Variante im Vergleich zur 4x Antireflex-Variante erklärt sich allerdings hauptsächlich hauptsächlich durch die geringere solare Transmission der low-e Beschichtung. Angesichts der Schlieren ist dieser Wert sogar noch relativ hoch.



Abbildung 43: Schlieren auf der Doppelisolierglasscheibe mit 3x Antireflex und 1x low-e Beschichtung.

2 Publikationen

C. Reichl, F. Hengstberger, C. Zauner, B. Kubicek, *Compound parabolic collector heat transfer investigated by numerical and experimental techniques*, submitted to Gleisdorf Solar 2014, Internationale Konferenz für solares Heizen und Kühlen, 25.-27. Juni 2014, Gleisdorf, Austria

C. Reichl, F. Hengstberger, C. Zauner, B. Kubicek, *Numerical and experimental approaches for the characterization of heat transfer mechanisms in compound parabolic concentrators*, submitted to EUROSUN 2014, September 16-19, 2014, Aix-les-Bains, France

C. Reichl, F. Hengstberger, C. Zauner:

"Heat transfer mechanisms in a compound parabolic concentrator: Comparison of computational fluid dynamics simulations to particle image velocimetry and local temperature measurements"; Solar Energy, Volume 97, November 2013 (2013), S. 436 - 446.

C. Reichl, F. Hengstberger, C. Zauner:

"Numerical and experimental analysis of heat transfer mechanisms in a compound parabolic collector";

Vortrag: 18th ERCOFTAC ADA PC meeting, Budapest University of Technology and Economics, Hungary; 15.11.2013.

C. Zauner, F. Hengstberger, W. Hohenauer, C. Reichl, A. Simetzberger, G. Gleiss:

"Methods for Medium Temperature Collector Development Applied to a CPC Collector"; Energy Procedia, **30** (2012), S. 187 - 197.

S. Fischer, C. Zauner, P. Papillon, A. Bohren, S. Brunhold, R. Hausner:

"Obstacles for the Application of Current Standards";

in: *"Polymeric Materials for Solar Thermal Applications"*, Wiley-VCH Verlag, Germany, 2012, ISBN: 978-3527332465, S. 359 - 370.

F. Hengstberger, T. Fleckl, C. Zauner, F. Helminger, P. Lampersberger:

"Erste Betriebserfahrungen mit einem neuartigen Mitteltemperaturprüfstand für Kollektorprüfungen über 200 °C";

in: *"22. Symposium 'Thermische Solarenergie'"*, OTTI Regensburg Germany (Hrg.); Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), Regensburg, 2012, ISBN: 978-3-941785-89-2.

C. Zauner:

"Simulation, Entwicklung und Prüfung von Mitteltemperaturkollektoren";

Vortrag: Gleisdorf Solar 2012, Gleisdorf; 12.09.2012 - 14.09.2012; in: *"Proceedings Gleisdorf Solar 2012"*, Gleisdorf (2012), 9 S.

C. Zauner, F. Hengstberger, W. Hohenauer, C. Reichl, A. Simetzberger, G. Gerald:
"Methods for Medium Temperature Collector Development Applied to a CPC Collector";
 Vortrag: International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, San Francisco, USA; 09.07.2012 - 11.07.2012; in: *"SHC Conference 2012"*,
<http://cms.shc2012.org/proceedings> (2012).

C. Zauner, W. Hohenauer, D. Lager, I. Mohsin, B. Windholz, F. Helminger, P. Lampersberger, F. Karall, P. Petschovitsch, M. Monsberger:
"Insulations for solar thermal applications: types and characteristics";
 Vortrag: SMETThermal 2011 - Solar Thermal Materials, Equipment and Technology Conference, Berlin, Deutschland; 10.02.2011; in: *"SMETThermal 2011 - Presentations"*, (2011).

C. Zauner, W. Hohenauer:
"Thermophysikalische und Spektroskopische Methoden zur Analyse von Isolationsmaterialien für Solarthermische Anwendungen";
 Poster: 21. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein; 11.05.2011 - 13.05.2011; in:
"21. Symposium Thermische Solarenergie", C. Zauner (Hrg.); OTTI, Regensburg (2011), ISBN: 978-3-941785-57-1; S. 92 - 96.

G. Pauschenwein, C. Zauner, G. Schmid, C. Reichl, M. Monsberger:
"Kollektorhydraulik - Ultraschall und CFD";
 Poster: 21. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein; 11.05.2011 - 13.05.2011; in:
"Proceedings 21. Symposium Thermische Solarenergie", C. Zauner, G. Pauschenwein, G. Schmid, C. Reichl, M. Monsberger (Hrg.); OTTI, Regensburg, (2011), ISBN: 978-3-941785-57-1; S. 79 - 84.

C. Zauner, W. Hohenauer:
"Thermophysical and Spectroscopical Characterization of New Materials for Solar Thermal Applications";
 Poster: ISES Solar World Congress 2011, Kassel; 28.08.2011 - 02.09.2011; in: *"Proceedings of ISES Solar World Congress 2011"*, C. Zauner, W. Hohenauer (Hrg.); (2011).

G. Pauschenwein, C. Reichl, C. Zauner, M. Monsberger:
"Pressure Drop, Flow Distribution and Turbulence in Collector Hydraulics";
 Vortrag: ISES Solar World Congress 2011, Kassel; 28.08.2011 - 02.09.2011; in: *"Proceedings of ISES Solar World Congress 2011"*, G. Pauschenwein, C. Reichl (Hrg.); ISES, 01/2011 (2011).

Des Weiteren ermöglichte das Projekt die Einbringung von Know-How in die IEA SHC Tasks 39, 43 und 49.

Zusätzlich konnten Ergebnisse des Projekts, insbesondere die entwickelten Methoden, auf der internationalen Fachmesse Intersolar in München einem breiten Industriepublikum präsentiert und angeboten werden.

Die Erfahrungen aus den Leistungsmessungen mündeten ebenfalls in die Erstellung der Erweiterung der bisherigen Kollektorprüfnorm EN12975 auch auf Mitteltemperaturkollektoren, welche 2012 in Kraft

getreten ist (EN12975:2012, ISO 9806). Dadurch wird in weiterer Folge sichergestellt, dass auch diese Klasse von Kollektoren wissenschaftlich abgesichert geprüft und zertifiziert werden kann.

3 Ausblick

Die Methodenentwicklung zu Mitteltemperaturkollektoren wurde am AIT in jenem Maße entwickelt, dass eine Anwendung auf weiterführende Kollektorentwicklung aus jetziger Sicht möglich ist. Falls natürlich in Zukunft bestimmte Materialien, Komponenten, Designs etc. möglich werden, müssen diese Methoden natürlich entsprechend weiterentwickelt werden.

Im nächsten Schritt sind Überlegungen und Forschungen für ganze Kollektorfelder notwendig. Insbesondere Themen wie Verschaltung, Stagnation, Ertragskontrolle, Abnahmemessungen etc.

Ebenso müssen systematisch mehrere der Mitteltemperaturkollektoranwendungen erschlossen werden. Insbesondere Richtung Prozesswärme und Fernwärmeanwendungen.

Solare Mitteltemperatursysteme (insb. mit hohen solaren Deckungsgraden) benötigen zudem entsprechende Wärmespeicher. Auf diesem Gebiet gibt es am AIT bereits entsprechende Forschungsprojekte, die Technologien stecken jedoch noch in den Kinderschuhen.

In Bezug auf reine CPC-Kollektorentwicklung müssen Ansätze und Lösungen gefunden werden, damit die Fertigung robuster wird, im Sinne von „kleine Fehler beim Zusammenbau dürfen sich nicht signifikant auf die Kollektorperformance auswirken“. Zudem sind, wie bei jedem Produkt, billigere Materialien, Designs und Produktionsmöglichkeiten zu entwickeln.

IMPRESSUM

Verfasser

AIT Austrian Institute of Technology GmbH
Christoph Zauner
Donau-City-Straße 1, 1220
E-Mail: [office\(at\)ait.ac.at](mailto:office(at)ait.ac.at)
Web: www.ait.ac.at

Projektpartner

SOLARFOCUS GmbH
Werkstraße 1, 4451 St. Ulrich / Steyr
Telefon: +43-7252-50002-0
Fax: +43-7252-50002-10
E-Mail: office@solarfocus.at
Web: www.solarfocus.eu

Autoren

Christoph Zauner, Florian Hengstberger,
Christoph Reichl, Paul Lampersberger,
Franz Helminger, Gernot Pauschenwein,
Bernhard Kubicek, Daniel Lager, Wolfgang
Hohenauer, Gerwin Schmid, Peter
Petschovitsch, Franz Karall, Annemarie
Schneeberger, Thomas Fleckl, Michael
Monsberger, Andreas Simetzberger, Gerald
Gleiss

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
office@klimafonds.gv.at
www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige
Verantwortung für den Inhalt dieses
Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise
die Meinung des Klima- und Energiefonds
wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die
Weiternutzung der hier enthaltenen
Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH