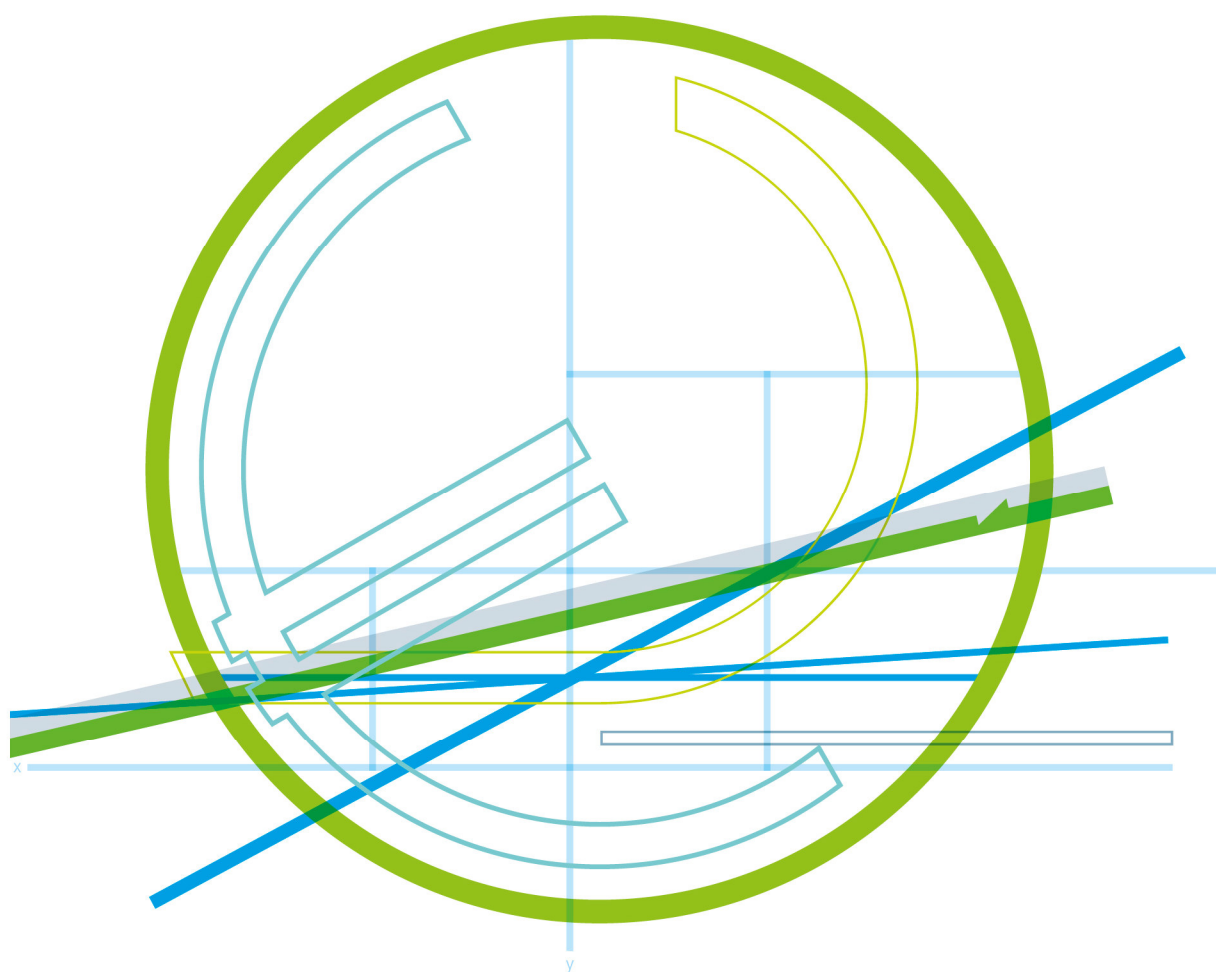


innoLUK0

## Untersuchung innovativer Luftkollektoren und Luftkollektorfelder



Christoph Reichl et al.

## 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](http://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 stylized, handwritten signature in black ink.

Ingmar Höbarth  
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink that reads 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel  
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

# innoLUKO

Untersuchung innovativer Luftkollektoren und Luftkollektorfelder

**AutorInnen:**

**Christoph Reichl**  
(AIT Austrian Institute of Technology)

**Korbinian Kramer, Christoph Thoma**  
(Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.)

**Johanna Astecker, Georg Hubmer**  
(CONA Entwicklungs- und Handelsgesellschaft m.b.H.)

## 1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis .....	4
2	Einleitung .....	5
3	Inhaltliche Darstellung .....	8
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....	24
5	Ausblick und Empfehlungen .....	26
6	Literaturverzeichnis .....	27
7	Anhang .....	30
8	Kontakt Daten .....	32

## 2 Einleitung

### Aufgabenstellung

Luftkollektoren weisen im Vergleich zu den wasserdurchströmten Kollektoren **einige wesentliche Vorteile** auf (keine Frostgefährdung, keine Gesundheits- und Umweltgefährdung durch Leckagen) und sind zudem vergleichsweise kostengünstig in der Anschaffung und wartungsarm im Betrieb. Ihr primärer Einsatzbereich liegt in der **industriellen Prozesstechnik** (z.B. Trocknung). Die **Beheizung von Arbeits- und Wohnbereichen**, in denen **kontrollierte Lüftungssysteme** installiert sind (Hallen, Bürogebäuden,...), findet aber zunehmend Beachtung.

Forschungen, die auf dem Gebiet der wasserdurchströmten Kollektoren durchgeführt wurden und werden sind nicht ohne weiteres auf das breite Anwendungsfeld der **Luftkollektoren** übertragbar. Insbesondere die notwendigen höheren Übergabequerschnitte und die erreichbaren Temperaturspreizungen für das Wärmeträgermedium Luft erfordern innovative Lösungen für die Nutzung dieser **komplementären Technologie**.

Das Konsortium entwickelt daher durch die **Kombination** aus **Simulationen** und **experimentellen Arbeiten** hoher Detailtiefe am Kollektor die grundlegende Methodik für zukünftige Arbeiten auf dem Gebiet der Luftkollektortechnologie.

Neben den Untersuchungen an einem einzelnen **Luftkollektor** liegt ein zweiter Schwerpunkt des Projektes auf deren **Verschaltung zu Kollektorfeldern**. Dazu wird im Rahmen des Projektes ein individuell verschaltbares Kollektorfeld aufgebaut, das in **Langzeitmessungen**, bestehend aus Wetter- und Solardaten, Kollektorfeldperformance und Verbraucherparameter, eine breite Datenbasis für die **Evaluierung von Simulationsmodellen** liefert.

Das Konsortium setzt sich im Forschungsprojekt zum Ziel, **eindimensionale Modelle** sowie hochaufgelöste **dreidimensionale Strömungssimulationen** unter Berücksichtigung aller wichtigen Wärmetransportmechanismen für Luftkollektoren zu erarbeiten und deren Performanz mit experimentellen Daten zu evaluieren. Für die experimentelle Datenbasis wird hierbei eine **verfeinerte lokale Messtechnik** entwickelt und eingesetzt werden.

Die Arbeiten beinhalten die **konsequente Weiterentwicklung der Luftkollektortechnik**, um für verschiedene Anwendungen **gezielt unterschiedliche Temperaturbereiche** zur Verfügung stellen zu können.

## Schwerpunkte des Projektes

Die folgende Liste gibt einen Überblick über die wesentlichen Schwerpunkte des Projektes „innoLUKO“. Zentrale Punkte waren der Bau von Kollektorvarianten und variabel verschaltbaren Kollektorfeldern, die Vermessung der Kollektoren und die Erstellung von 1D und 3D Simulationsrechnungen des Luftkollektors sowie der Vergleich der experimentellen mit den numerischen Daten.

Literaturrecherche, Zusammenführung bisheriger Untersuchungen

- Analyse und Clustering der **Luftkollektoranwendungen** / Technologieübersicht
- Anforderungsprofile und **Pflichtenhefte** für Luftkollektoren
- Gegenüberstellung der charakterisierenden Parameter für Wasser- und Luftkollektoren
- Abgrenzung der Luftkollektortechnologie zur Wasserkollektortechnologie

Prüfling und Randbedingungen

- Design und Bau des **Luftkollektorprüflings** mit der Möglichkeit zur Variantenbildung (geometrische Veränderungen) für die Vermessung am Fraunhofer ISE
- Vorbereitung der **Instrumentierung des Luftkollektorprüflings**
- Auswahl der **notwendigen Meßtechnik** für den Luftkollektor
- Festlegung der **Randbedingungen Luftkollektor**
- Design und **Bau des Luftkollektorfeldes**, das unterschiedlich verschaltet werden kann
- Vorbereitung der **Instrumentierung des Luftkollektorfeldes** und der Messtechnik für die Vermessung des Luftkollektorfeldes
- Auswahl der **Parameter für die Luftkollektorfeldmessung** und die dazugehörige Messtechnik
- Festlegung der **Verschaltungsszenarien** des Kollektorfeldes
- Aufbau der **Luftkollektorfeldmesstechnik**
- Datengenerierung und Datenanalyse

Experimentelle Arbeiten Luftkollektor

- Bestimmung der **Leistungsfähigkeit des Kollektors** in verschiedenen technologischen Varianten zur Vorbereitung und Überprüfung von Optimierungsstrategien.
- **Vollständige Charakterisierung** mittels Parametrisierung für die Simulationen zur Anlagenauslegung und Jahresertragsabschätzung.
- Analyse der **thermo- und strömungsdynamischen Abläufe** innerhalb des Kollektors
- **Thermophysikalische und thermographische Analysen** der im Luftkollektor verwendeten Materialien

Simulation

- **1D EXCEL** und **TRNSYS Modell eines Luftkollektors** (Black-Box)
- **3D CFD Modell eines Luftkollektors**
- **1D EXCEL, TRNSYS und 3D CFD Simulationsergebnisse** für den **Luftkollektor** zum Vergleich mit den experimentellen Daten

Vergleich und Validierung

- **Evaluierte Luftkollektormodelle** durch Vergleich von 1D und 3D Simulationen des Luftkollektors mit den experimentellen Daten am Luftkollektorprüfstand
- **Datenanalyse** und **Datenaufbereitung** der Luftkollektordaten in Hinblick auf den Vergleich mit Simulationsarbeiten
- **Konferenzteilnahmen** und **Publikationstätigkeiten**

## Einordnung in das Programm

Das Projekt behandelt den **Schwerpunkt** 3.3 Erneuerbare Energieträger - **Subschwerpunkt**: 3.3.1 Solarthermie - *alternative Kollektortechnologien (Luftkollektoren etc.)* der 5. Ausschreibung des Programms Neue Energien 2020.

Im Rahmen des Projekts „InnoLUKO“ werden Grundlagenarbeiten der Kategorie „Industrielle Forschung“ für zukünftige Forschungsarbeiten an Luftkollektoren sowie Luftkollektorsystemen durchgeführt. Luftkollektoren weisen im Vergleich mit den wasserdurchströmten Kollektoren viele Vorteile (keine Frostgefährdung, keine Gesundheits- und Umweltgefährdung durch Leckagen, etc.) auf und sind zudem vergleichsweise kostengünstig in der Anschaffung und wartungsarm im Betrieb. Neben dem Einsatz zur Beheizung von Hallen und Bürogebäuden oder für industrielle Prozesse (z.B. solaren Trocknung) in der Landwirtschaft gewinnen sie zunehmend auch an Bedeutung als Heizungstechnologie für Wohngebäude, nachdem diese vermehrt die für den Einsatz von Luftkollektoren notwendigen Zu- und Abluftsysteme (Stichwort: kontrollierte Wohnraumlüftung) installiert haben.

## Verwendete Methoden

Im Projekt „innoLUKO“ kamen neben Literaturrecherchen, experimentelle und numerische Methoden zum Einsatz. Die numerischen Arbeiten nutzten für die 1D Abbildung des Kollektors und von einfachen Kollektorserienschalungen EXCEL, für kompliziertere Kollektorfeldkonstellationen und die Berechnung von Jahreserträgen das Tool TRNSYS. Die 3D Simulationen wurden mit ANSYS FLUENT bzw. OpenFoam durchgeführt. Zur Messung der Kollektoren kam am ISE der Luftkollektorprüfstand zum Einsatz, bei CONA wurde eine Messwerterfassung mit Temperatur, Geschwindigkeits- und Luftfeuchtesensoren installiert. Die Kanalströmung wurde zusätzlich mit optischer Strömungsmesstechnik (PIV) analysiert und visualisiert. Konstruktion und Bau der Kollektoren und des variabel verschaltbaren Kollektorfeldes wurde in den Werkstätten der Fa. CONA realisiert.

## Aufbau der Arbeit

Nach der Literaturrecherche und einer wesentlichen Abstimmungsperiode konnten die experimentellen und numerischen Arbeiten zunächst gut parallel und unabhängig durchgeführt werden. Im Kapitel 3 ist im Detail gezeigt, welche Resultate mit Hilfe der verwendeten Methoden erzielt werden konnten. Zunächst wurden die 3D Simulation genutzt, um die Anzahl der Varianten für die Messungen am ISE Prüfstand einzuschränken. Als die ersten experimentellen Resultate des ISE Luftkollektorprüfstandes vorlagen, konnten auch erste Vergleiche mit den numerischen 3D CFD Berechnungen durchgeführt werden. Für den abschließenden Vergleich wurden Messungen im ISE Indoor-Prüfstand gewählt – diese Ergebnisse sind zur Publikation in Solar Energy eingereicht (erwartetes Publikationsdaten Herbst 2015). Die 1D Simulationsarbeiten wurden am ISE (EXCEL) und AIT (TRNSYS) durchgeführt und jeweils mit den Daten der Messungen parametrisiert. Schließlich wurden die TRNSYS Kollektormodelle genutzt, um repräsentative Kollektorfelder zu berechnen.

### 3 Inhaltliche Darstellung

#### Literaturrecherche, Zusammenführung bisheriger Untersuchungen

Das Fraunhofer Institut beschäftigt sich seit über 10 Jahren mit der Luftkollektortechnologie. In regelmäßigen Abständen werden Literaturrecherchen durchgeführt, um den Überblick über die laufenden Tätigkeiten im Bereich der Luftkollektoren zu behalten. Die Ergebnisse der Recherchen werden in einer Literaturdatenbank gepflegt. Im Rahmen dieses Projektes wurden die Literatursammlungen von den Partnern mit dieser Datenbank abgeglichen und ergänzt. Es wurde eine Literatursammlung mit 20 projektrelevanten Beiträgen zu den abgedeckten Luftkollektoren dem Konsortium bereitgestellt. Die Literaturrecherche ist abgeschlossen. Die bisherigen Testergebnisse des Standard-Kollektors (CCS – interner Cona Collector Standard – der bis vor Projektstart entwickelte und standardmässig eingesetzte Luftkollektor), der im Rahmen des Luko-E Projektes vermessen wurde, wurden aufgearbeitet und dem Konsortium bereitgestellt. Die Ausgangssituation und der IST-Zustand der Kollektoren sind nun allen Projektpartnern bekannt. Zu diesen Daten gehören die gemessenen Wirkungsgradkennlinien WKLs, Druckverlustwerte und Verteilung der Durchströmung in den einzelnen Absorberkanälen bei der Messung. Für das Projekt wurde eine Reihenschaltung von 5 Standard-Kollektoren als „kleines Kollektorfeld“ gerechnet (siehe Abbildung 1). Für das „kleine Kollektorfeld“ lassen sich die Parameter wie (a) Ein- und Austrittstemperaturen des jeweiligen in Reihe geschalteten Kollektors; (b) Druckverlust des Feldes; (c) Leistung des jeweiligen Kollektors; (d) Gesamtdruckverlust des Feldes; (e) Wirkungsgrad des jeweiligen Kollektors; (f) Gesamtwirkungsgrad des Feldes in Abhängigkeit von dem Durchfluss, der Einstrahlung und der Umgebungstemperatur errechnen. Diese Daten dienen auch als Abgleich und zur Validierung von der 3D-Simulation und der Messung. In den beiden folgenden Abbildungen sind die berechneten Wirkungsgrade sowie die Temperaturen der jeweiligen Kollektoren als Beispiel abgebildet.

Es wurde ein Dokument mit einer **Technologieübersicht** angefertigt. Hierin sind die Luftkollektoren umfassend beschrieben. Die typischen Bauarten von Luftkollektoren werden mit ihren Vor- und Nachteilen genannt und die Unterschiede aufgezeigt. Je nach Bauart der Kollektoren können sich unterschiedliche Einsatzgebiete ergeben. Die Anforderungen der Kollektoren an die jeweilige Anwendung werden aufgezeigt und die physikalischen Kenngrößen werden beschrieben. Die Unterschiede zwischen Wasser- und Luftkollektoren sind aufgeführt. Abschließend ist eine Übersicht mit den Luftkollektoren, die zurzeit auf dem Markt verfügbar sind, zusammengefasst worden.

In einem **Pflichtenheft** wurde die Ausgangssituation mit den Messergebnissen des Standardkollektors festgehalten (siehe Abbildung 1). Hier werden auch die Betriebsbedingungen der unterschiedlichen Anwendungen (z.B. Trocknung, Raumheizung, Hallenheizung, Gebäudetrocknung, usw.) definiert und die Betriebsbedingungen (Temperaturen, Betriebsvolumenströme und Anlagenregelung) speziell auf den Prozess der Trocknung von Hackgut abgeleitet. Die angedachten Prototypen mit ihren Spezifikationen und den Messergebnissen werden hier dokumentiert. Aus den Einzelergebnissen der Messungen kann anschließend ein „bester“ Kollektor, der sogenannte TOP-Kollektor zusammengesetzt werden. Die Referenz ist die erneute Messung des Standard Kollektors (CCS – interner Cona Collector Standard –



der bis vor Projektstart entwickelte und standardmässig eingesetzte Luftkollektor) mit den abgeleiteten und definierten Betriebsvolumenströmen.

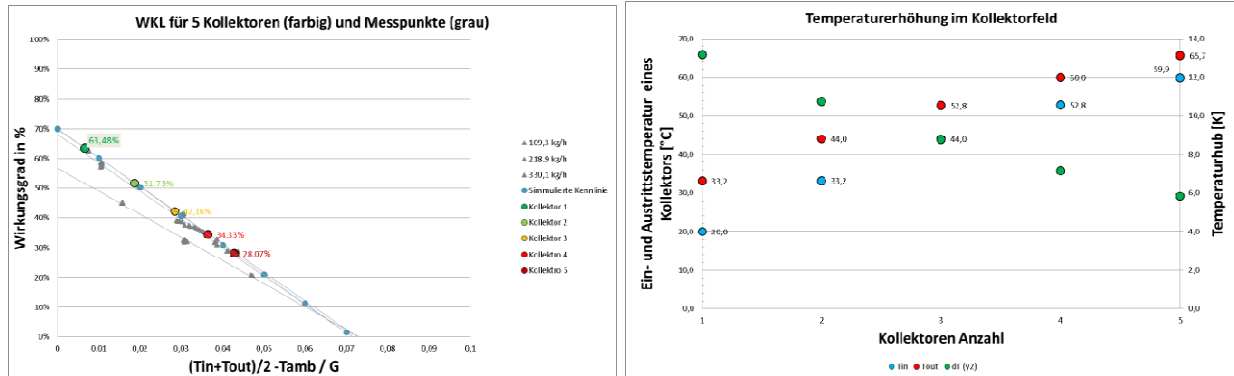


Abbildung 1 (links): Messergebnisse des Standardkollektors; (rechts) Resultate für aus den Messungen 1 errechnete Kollektoren in Serienschaltung

## Prüfling und Randbedingungen

### Luftkollektorprüfling

Es wurde eine Reihe von unterschiedlichen Prüflingen hergestellt. Anhand der Simulationsrechnungen wurde ein klarer Einbruch der Leistung im Kollektor durch die der Halterung dienenden Holzleisten festgestellt, daher wurden alternative Lösungen gesucht. An das Thema Glas werden viele unterschiedliche Anforderungen gestellt. Letztendlich wurden drei unterschiedliche Gläser ausgewählt und getestet. zwei Standardgläser von unterschiedlichen Herstellern und ein antireflex beschichtetes Glas welches auf beiden Seiten getestet wurde. Außerdem wurden Isolierungen montiert.

### Konsolendesign für die Messungen am Luftkollektorprüfstand und Testmatrix

Für den Anschluss der Kollektoren an den Luftkollektorteststand wurden Konsolen von CONA in Absprache mit dem ISE konstruiert und gebaut und an das ISE geliefert.

### Luftführung und Messkonzept für Kollektorfeldmessungen

Abbildung 2 zeigt die Luftführung der Trocknungsanlage. Zwei Luftkollektorfelder werden parallel durchströmt, wobei die vom Hauptventilator angesaugte Außenluft erwärmt und in einen Sammelkanal geführt wird. Zehn Lufttemperatursensoren, fünf Messgeräte für relative Luftfeuchtigkeit, vier Luftgeschwindigkeitssensoren, drei Strahlungsmessgeräte sowie eine Wetterstation mit zwölf Ausgangsgrößen bilden die gesamte messtechnische Bestückung.

# Neue Energien 2020 - 5. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

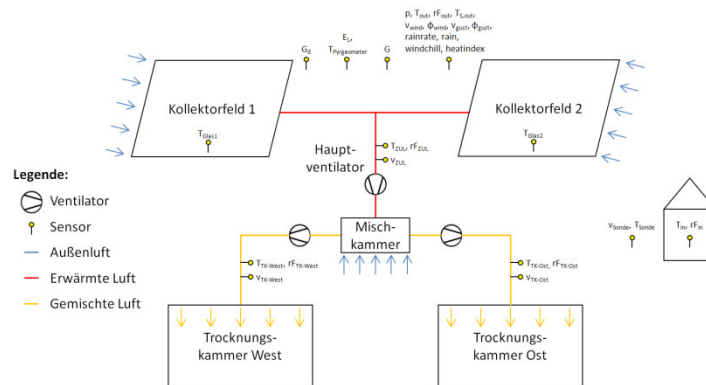


Abbildung 2: Luftführung und Messkonzept

Die Messdaten der an den Industrie-PC angeschlossenen Messgeräte werden lokal gespeichert und in regelmäßigen Abständen über eine Internet-Verbindung automatisch auf den AIT-Monitoring-Server kopiert. Dort werden die Daten in einer Datenbank abgelegt, die eine Weiterverarbeitung und Analyse ermöglicht. Um dem Projektteam die Möglichkeit zu geben, die Daten auch ohne eigene Auswertungssoftware sichten und vorab analysieren zu können, wurde eine Website aufgebaut, die die Daten aufbereitet und daraus automatisch Diagramme für verschiedene Zeiträume (letzte Stunde, letzter Tag, letzte Woche, letztes Monat) erstellt. Abbildung 3 zeigt hierzu beispielhaft die Verläufe der Temperaturen und Geschwindigkeiten der Luft im Sammelkanal und vor der Trocknungskammer Ost sowie die Außentemperatur an zwei Schönewettertagen Anfang März (Die Trocknungskammer West war nicht in Betrieb).

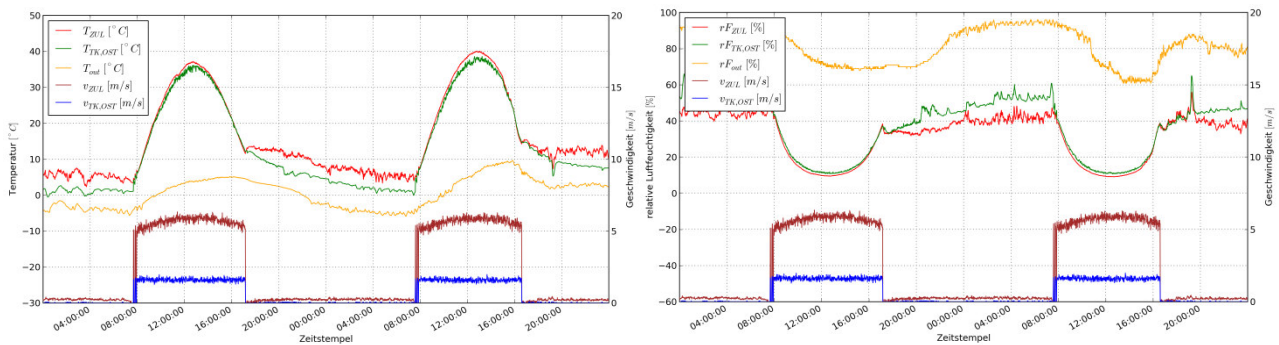


Abbildung 3 (links): Beispielhafte Temperaturen und Geschwindigkeiten der Luft im Sammelkanal und vor der Trocknungskammer Ost sowie Außentemperatur (Zeitraum: 4.-5.3.2013); (rechts): Beispielhafte relative Luftfeuchtigkeiten im Sammelkanal und vor der Trocknungskammer Ost sowie Außenluftfeuchtigkeit (Zeitraum: 4.-5.3.2013)



Abbildung 4 (links): altes Solarfeld; (mitte): Messtechnik zur Vorabprüfung der Messergebnisse - Mess-Station Outdoor; (rechts): Neues Kollektorfeld zur Realisierung unterschiedlicher Verschaltungskonzepte bei der Firma CONA

Im Oktober 2013 erfolgt der Abbau des alten Kollektorfeldes direkt gefolgt vom Aufbau der neuen, deutlich größeren und verschaltbaren Anlage (siehe Abbildung 4). Die Mess-Station wurde wieder in Betrieb genommen, sodass ein Vergleichsjahr zur alten Solaranlage möglich ist. Ende März 2014 wurde der Luftschacht im finalen Design realisiert. Die Arbeiten zur Steuerung wurden weitergeführt. Für die Meßkampagne am ISE wurden Umbauten am Kollektor vorgenommen.

### **Festlegung der unterschiedlichen Verschaltungszenarien und Aufbau von Verschaltung, Steuerung und Regelung**

Beim Konsortialtreffen in Freiburg wurden die Szenarien, die praktisch getestet und vermessen werden sollen, gemeinsam im Team beschlossen. Technisch sind deutlich mehr Szenarien möglich und realisierbar, letztendlich musste eine sinnvolle Auswahl getroffen werden, um ausreichend Messtage für die verschiedenen Szenarien zur Verfügung zu haben. Messungen wurden für symmetrische Verschaltungen bei 8m x 3m Kollektorfeld und 12m x 2m (jeweils halbe und volle Drehzahl des Ventilators) und asymmetrische Verschaltung 10m x 3m und 14m x 2m (jeweils halbe und volle Drehzahl) durchgeführt.

### **Aufbau eines Strömungskanals zur Untersuchung typischer Luftumlenkkonfiguration im Absaugbereich von Luftkollektorfeldern**

Für die optischen Strömungsmessungen wurde ein modulares Windkanalsystem aufgebaut, in dem unterschiedliche Umlenkungen getestet werden können. Das Design dieser Umlenkungen ist wesentlich für die sich in den Luftkollektorfeldern einstellenden Strömungsverhältnisse und die Größe des sich ergebenden Druckverlusts des Systems. PIV Messungen (Particle Image Velocimetry) zur Quantifizierung und Visualisierung der Strömungsverhältnisse wurden durchgeführt.

### **Experimentelle Arbeiten Luftkollektor**

#### **Messungen Kollektor am Luftkollektorprüfstand ISE**

Für die Vermessung der Kollektoren am Sonnensimulator des Fraunhofer ISE wurde eine Konsole erarbeitet, um den Luftkollektorteststand an die Kollektoren anzuschließen (siehe Abbildung 5 mitte). Diese Konsole bildet den Übergang zwischen dem rechteckigen Strömungskanal der Kollektoren und dem runden Anschluss des Teststandes mit 200 mm Durchmesser (siehe Abbildung 5 links). Im Sonnensimulator des Fraunhofer ISE (siehe Abbildung 5 mitte) wurden alle fünf Kollektoren, die für die Vergleichsmessung gebaut und geliefert wurden, mit dem stationären Messverfahren vermessen. Anhand dieser fünf Kollektoren lassen sich insgesamt neun Variationen testen. Es wurde bei dieser Messreihe bei jedem Kollektor die Änderung der Leistungsfähigkeit aufgrund der baulichen Änderung geprüft. Hier ist der Vergleich (siehe Abbildung 6) des besten Kollektors (TOP Kollektor) und des Standardkollektors in während einer Parallelmessung (Abbildung 5 rechts) gezeigt.

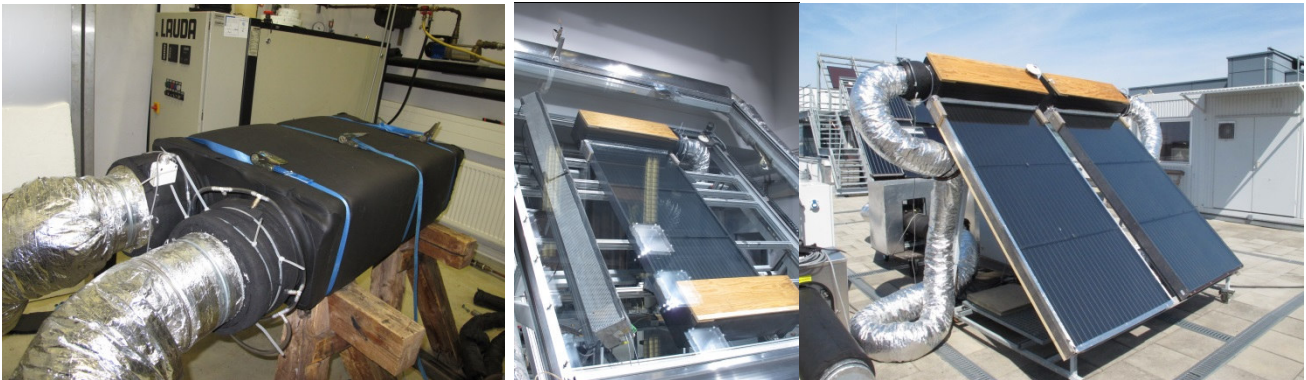


Abbildung 5: (links-mitte) Details zum Luftkollektorprüfstand; (rechts) Foto der beiden Kollektoren bei der quasidynamischen Vermessung. Links der Top-Kollektor mit Aluleiste, Wärmedämmung und Solarglas. Rechts ist der Standard Kollektor dargestellt.

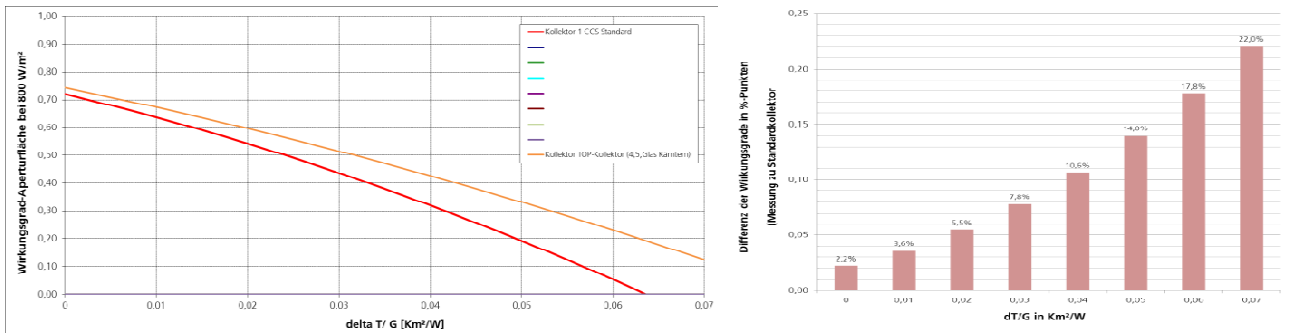


Abbildung 6: (links) Vergleich der Wirkungsgradkennlinie des Top- und des Standardkollektors; (rechts) Wirkungsgradsteigerung in %-Punkten über  $dT/G$  dargestellt

## Thermographische Analysen

Neben der kalorischen Vermessung der Kollektoren wurde auch mit Hilfe der Thermografie eine Auswertung der Glastemperaturen der beiden Kollektoren durchgeführt. Durch die Verwendung der Thermographie können großflächig Temperaturen und Temperaturverteilungen von Oberflächen bestimmt werden. Bei dieser Messreihe wurden beide Kollektoren unter gleichen Bedingungen betrieben. Die Kollektoren wurden unter einem Aufstellwinkel von  $45^\circ$  Richtung Süd ausgerichtet und bei gleichem Durchfluss betrieben. Die Einstrahlung während der Messung betrug  $914,5 \text{ W/m}^2$ , die mittlere Umgebungslufttemperatur  $29,0^\circ \text{C}$ . In Abbildung 7 sind die Oberflächentemperatur der beiden Kollektoren (rechts: Standard Kollektor, links: Top-Kollektor) dargestellt. Deutlich zeichnen sich beim Standardkollektor die Buchenleisten, die über den Absorber gespannt sind ab. Die Oberfläche lässt sich bei diesem Kollektor in 3 Teilbereiche einteilen. Beim Top-Kollektor lässt sich die Oberfläche in eine Fläche einteilen. Nur die 2 Stützen auf denen sich die Glasscheibe auflegt zeichnen sich ab. Die mittlere Temperatur beim Standard Kollektor beträgt  $44,2^\circ \text{C}$  die mittlere Oberflächentemperatur des Top-Kollektors beträgt  $42,8^\circ \text{C}$  und ist demnach um  $1,4 \text{ K}$  geringer als beim Standardkollektor.



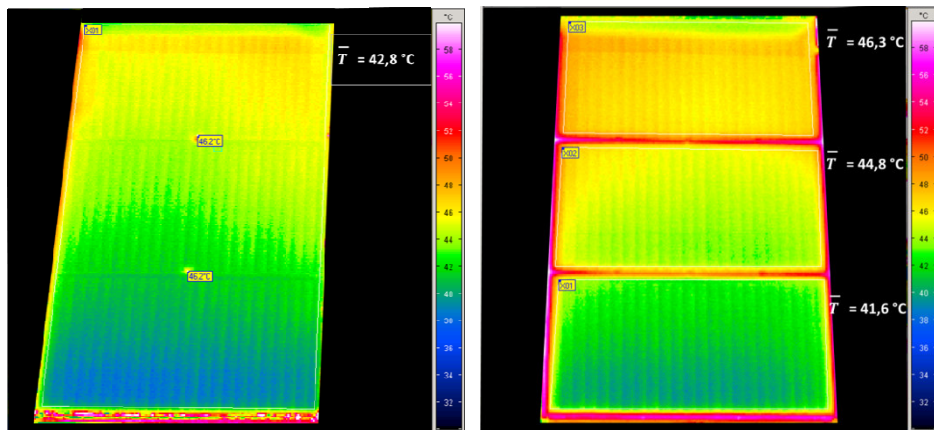


Abbildung 7: Links: Thermografieaufnahme des Standardkollektors, rechts: Thermografieaufnahme des Top-Kollektors

## Untersuchung von unterschiedlichen Designs von Umlenken in Sammelhächten von Luftkollektorfeldern mittels PIV

In Abbildung 8 ist der für diese Untersuchungen konstruierte Strömungskanal in Umlaufbauweise abgebildet. Die Umlenkungen im Ekelement (siehe Abbildung 8 rechts) können unterschiedlich gestaltet werden, wobei eckige und runde Randelemente sowie drei Leitblechpositionen vorgesehen wurden. Die Strömungsgeschwindigkeit sowie die Turbulenz wurden für unterschiedliche Kombinationen dieser Einbauten und Ausformungen in unterschiedlichen Höhen und bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten jeweils unmittelbar hinter dem Ekelement vermessen (siehe Abbildung 9). Typische Strömungsgeschwindigkeiten sind in Abbildung 10 für verschiedene Konfigurationen dargestellt. Die ausgleichende Wirkung der Umlenkbleche (vergleiche 90g00090g [keine Umlenkbleche, 90° Ecken] und B111B [3 Umlenkbleche, Abrundungen]) ist deutlich zu sehen



Abbildung 8 (links): Strömungskanal mit Umlenkung und Messfenster (links hinten); (rechts): Umlenkelement (B111B) mit Ventilator

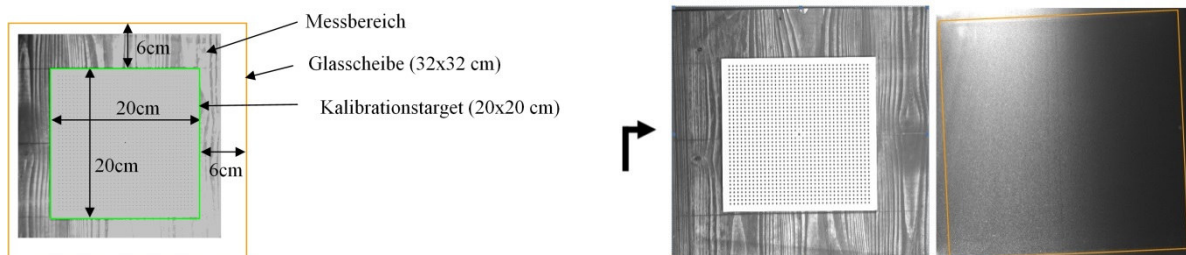


Abbildung 9: Messbereich im Strömungskanal. In der rechten Abbildung ist das Kalibrationstarget deutlich zu erkennen. Der Strömungsverlauf ist mit einem schwarzen Pfeil gekennzeichnet. Links ist Setup 1, rechts Setup 2 zu sehen.

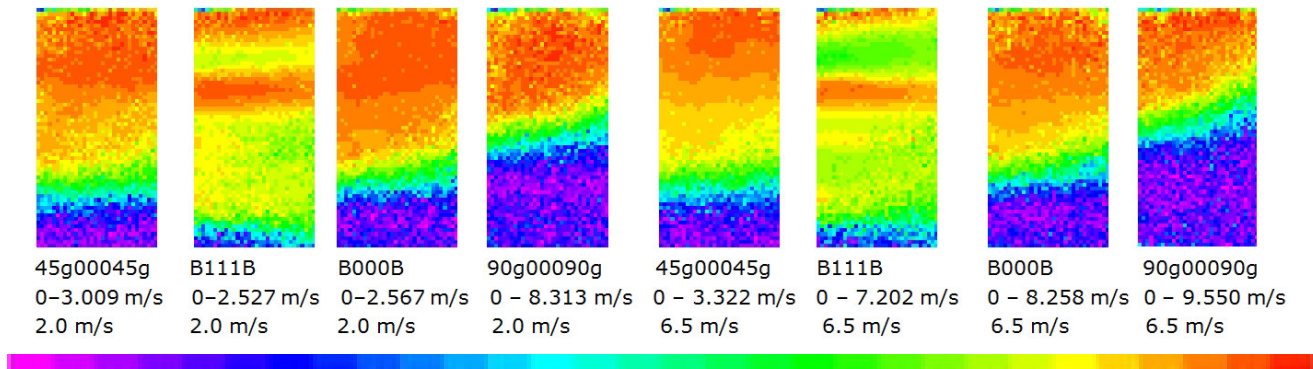


Abbildung 10: Strömungsvisualisierungen in der Symmetrieebene mit einer globalen mittleren Strömungsgeschwindigkeit von 2 m/s bzw. 6.5 m/s. (3. Infozeile). Die teils starke Abweichungen von einem gleichförmigen Strömungsfeld ergeben sich durch die unterschiedliche Ausformung der sich vor der Messstrecke befindlichen Umlenkung (siehe auch Abbildung D9 (gelber Pfeil) im Anhang D). Die Kamera befindet sich im Setup 2. Infozeile 1 enthält den linken und rechten Wert der Farbskala.

## Simulation

Im Rahmen der Simulationen wurden 1D und 3D Methoden entwickelt und validiert.

### 3D CFD Kollektor Simulationen

Im Rahmen der Arbeiten zum 3D-Simulationsmodell des Kollektors wurden Detailsimulationen für unterschiedliche Absorberflächenverhältnisse (Geometrie und Rechennetz siehe Abbildung 11 rechts durchgeführt. Ausserdem wurden die Temperatur- und Strömungsverhältnisse an einem kompletten Luftkollektor (Geometrie siehe Abbildung 11 links) simuliert.

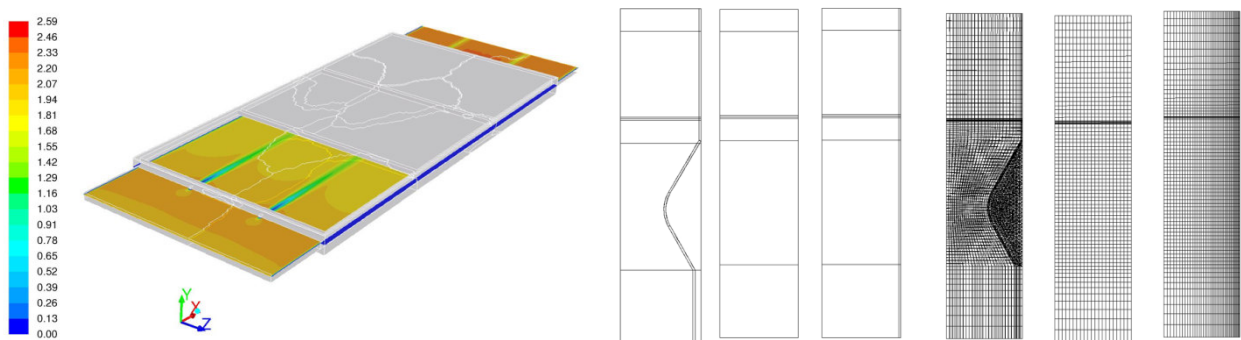


Abbildung 11 (links): Strömungsgeschwindigkeit im Luftkollektor – Deutlich ist der Einfluss der Befestigungen bei 1/3 und 2/3 der Kollektorbreite im Luftkanal zu erkennen; (rechts) Geometrien unterschiedlicher Absorberflächenverhältnisse zwischen direkter sonnenzugewandter Seite und Luftseite (ohne und mit Rechennetz).

Abbildung 12 zeigt eine Zusammenstellung unterschiedlicher Simulationsläufe. Für die Emissivität des Absorbers wurden zwei Werte verwendet:  $\varepsilon_{abs} = 0.2$  (Simulationen d,e,n,o) und 0.9 (a,b,c,f,g,h,i,j,k,l,m,j).

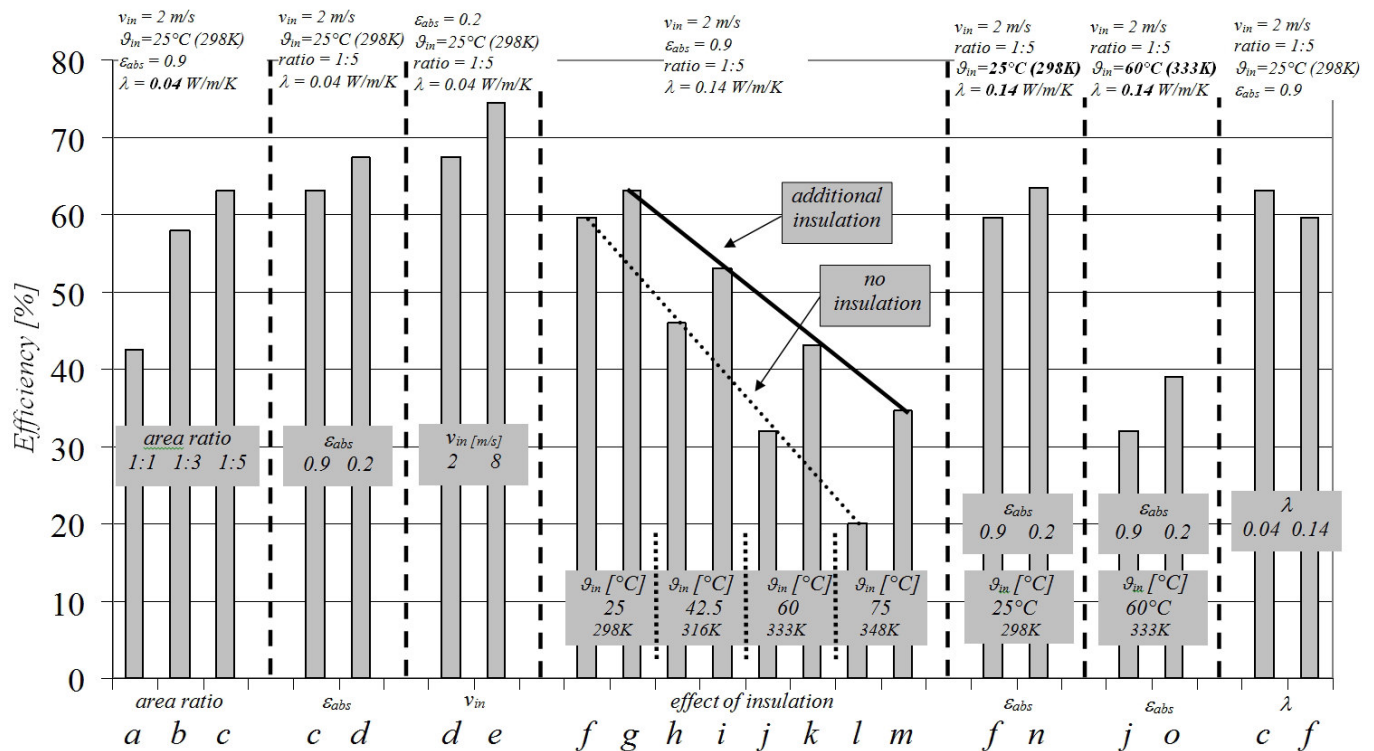


Abbildung 12: Effizienz (relative zur Sonneneinstrahlung) für unterschiedliche Szenarien). Mehrere Parameter wurden bei den Simulationen verändert: die Eintrittsgeschwindigkeit  $v_{in} = 2 \mid 8 \text{ m/s}$ ; die Emissivität des Absorbers  $\varepsilon_{abs} = 0.9 \mid 0.2$ ; die Eintrittstemperatur  $T_{in} = 25 \mid 42.5 \mid 60 \mid 75^\circ\text{C}$ . Ausserdem wurde eine rückseitige Isolierung eingefügt.

Wenn die Emissivität auf 0.2 reduziert wird (durch spezielle Beschichtungen des Absorbers), steigt die Effizienz der Kollektoren da weniger Strahlung vom Absorber zum Glas zurückgestrahlt wird. Abbildung 12 a-c vergleicht die Effizienzen bei einer Geschwindigkeit von 0.2 m/s für die verschiedenen Oberflächenverhältnisse des Absorbers. Abbildung 12 f-m vergleicht Berechnungen mit einer zusätzlichen Isolierung (g,i,k,m) an der Rückwand des Kollektors für verschiedene Einlasstemperaturen  $T_{in} = 25^\circ\text{C}$ ;  $42.5^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$  und  $75^\circ\text{C}$  mit einem konventionellen Absorber mit einer Emissivität von 0.9. Dies kann mit Rechnungen ohne thermischer Isolierung bei gleicher Einlasstemperatur verglichen werden (f,h,j,l). Die Erniedrigung der Effizienz bei höheren Temperaturen (gepunktete Linie) kann mit der Isolierung vermindert werden (dicke Linie). Der Effekt ist bei höheren Temperaturen stärker ausgeprägt. Ein Vergleich von Abbildung 12 (d) und 12 (e) zeigt den Anstieg in der Effizienz bei Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit von  $v_{in} = 2 \text{ m/s}$  auf  $8 \text{ m/s}$ . Die Verbesserung stammt von einer erhöhten treibenden Temperaturdifferenz des heißen Absorbers in die „getriebene“ Luft.

## 1D-Simulationsrechnungen mit EXCEL – 1D Kalkulationstool

Bei der Darstellung der Wirkungsgrade von Wasser- / Luft-Kollektoren wird als Bezugsachse (x-Achse) die reduzierte Temperaturdifferenz<sup>1</sup>  $dT/G$  gewählt. Hiermit lassen sich Kollektoren physikalisch richtig beschreiben. Die Interpretation dieser Darstellung bereitet jedoch gewisse Schwierigkeiten. Im Rahmen des Projektes wurde ein Programm geschrieben, welches die Wirkungsgradkennlinien der Kollektoren in

<sup>1</sup> Mittlere Fluidtemperatur des Kollektors minus der Umgebungstemperatur bezogen auf die Einstrahlung.

„verständliche“ Werte umrechnet. Durch die Eingabe der Kollektorparameter ( $\eta_0$ ,  $a_1$  und Werte für die Druckverlustkoeffizienten) und Umgebungsbedingungen (Umgebungslufttemperatur und Einstrahlung) wird die Kollektorleistung, Temperaturniveaus am Kollektoreintritt und –austritt, und Druckverlustwerte berechnet (siehe Abbildung 13 und 14).

Eine eigens geschriebene Solver-Funktion löst das mathematische Problem, dass der Wirkungsgrad, Kollektortemperaturhub und reduzierte Temperaturdifferenz vom Massestrom gleichermaßen abhängt. Erst durch den Wirkungsgrad (y-Wert im Diagramm) kann durch die Leistungsberechnung der Temperaturhub und damit die reduzierte Temperaturdifferenz (x-Achsenwert) berechnet werden. Um den Wirkungsgrad aber bestimmen zu können (y-Wert) braucht man den x-Wert. Es handelt sich hierbei um ein typisches „Henne Ei“ Problem. Die Lösung sieht wie folgt aus: Die gesamte Wirkungsgradkennlinie wird zu Beginn einer Berechnung in etwa 1000 Bereiche zerlegt und analysiert. Nach diesem Schritt werden die Ergebnisse des ersten Kollektors an einen zweiten Kollektor, der in Reihe zum ersten Kollektor geschaltet ist, übergeben. Die Berechnung findet nun für diesen Kollektor statt. Insgesamt lassen sich 5 Kollektoren in Reihe geschaltet berechnen (siehe Abbildung 14).

### 1D-Simulationsrechnungen mit TRNSYS

Zunächst wurden Testsimulationen mit dem TRNSYS Type 302 durchgeführt, in Folge noch weitere Types getestet. Um die Abhängigkeiten der Wirkungsgradkennlinien vom Massenstrom, welche bei einem Luftkollektor stärker ausgeprägt ist als bei einem Flüssigkeitskollektor, in einer Simulation abbilden zu können ist es erforderlich,  $\eta_0$ ,  $a_1$  und  $a_2$  als Input zu definieren. Des Weiteren erscheint es sinnvoll, auch die Wärmekapazität als Input zu definieren und mit einer Type-externen Berechnung zu definieren. Die Anpassungen wurden durch TRANSOLAR durchgeführt und ein angepasstes Type (Nummer 201) erstellt. Bei dieser Adaptierung wurde ein Grundtype verwendet, welches keine Abbildung des IAM zulässt. Um diese Problematik zu beheben, wäre es erforderlich nochmals einen anderen Type anzupassen. TRNSYS bietet mit „Parametric Studies“ die Möglichkeit unterschiedliche Parameter zu variieren und mit den jeweiligen Werten eine Simulation zu durchlaufen.

#### *Testberechnung für einen definierten Massenstrom*

Für diesen Test wurden die Parameter  $cp_{fL}$ ,  $mpunkt$ , Einstrahlung, Eintrittstemperatur und Umgebungstemperatur durch eine Tabelle als „Simulation Parameters“ festgelegt; die Wirkungsgradkennwerte wurden für Testzwecke für den Massenstrom  $mpunkt$  bei den Werten für ca. 190kg/h fixiert. Es ist anzumerken, dass diese Parameterstudie mit der Grundeinstellung des Parameters „Tested flow rate“ von 56.65 durchgeführt wurde. Der Vergleich mit den Laborergebnissen ist in Abbildung 15 oben gezeigt; Die Abweichung zur grünen Linie ist sehr groß. Ein kurzer Test mit der Anpassung des Parameters (Tested flow rate = 220) zeigt eine bessere Übereinstimmung (siehe Abbildung 15 unten). Der Prüfmassenstrom hat demnach einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis.



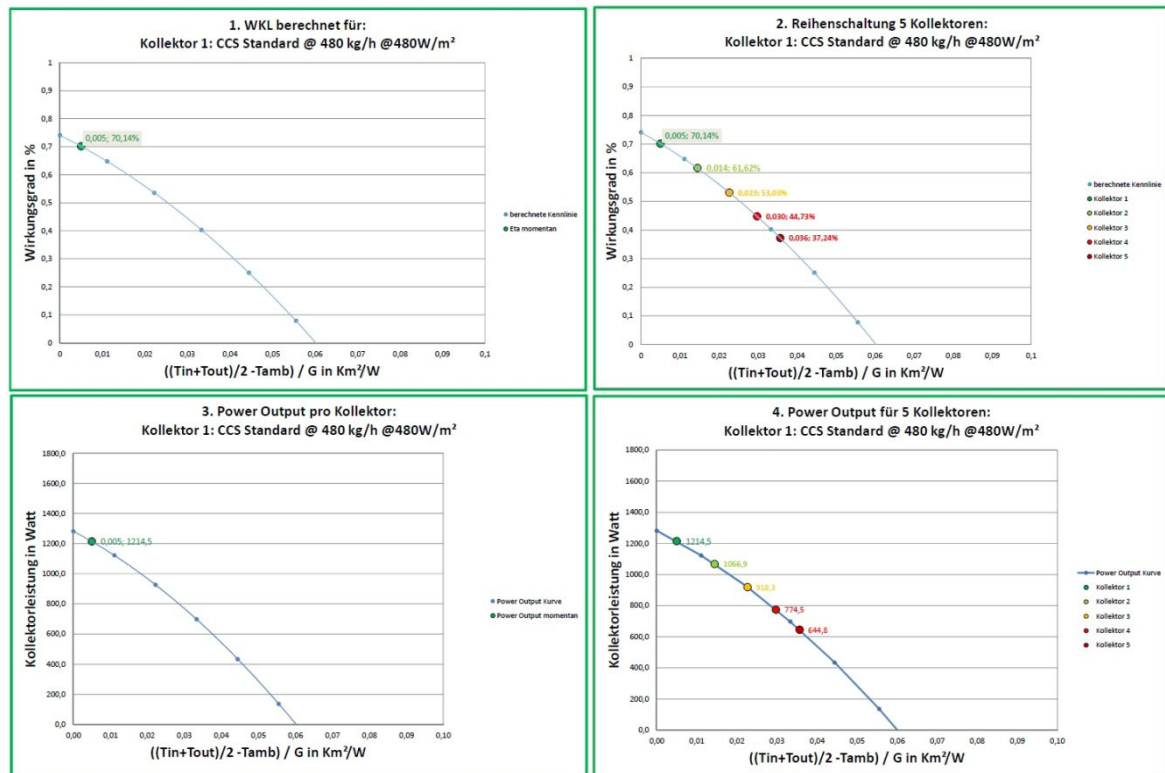


Abbildung 13: Resultate des 1D-EXCEL Tools für die Kollektorleistung und Wirkungsgrad für einen Kollektor und eine Reihenschaltung von 5 Kollektoren

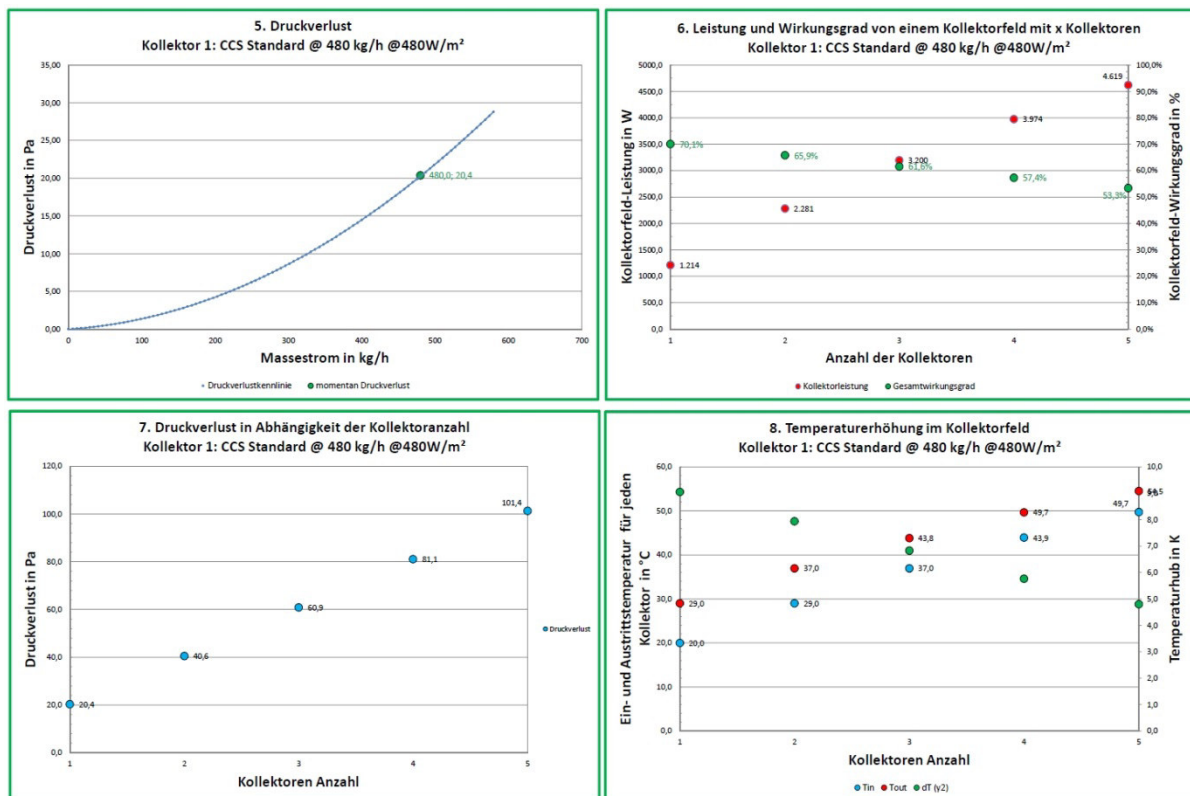


Abbildung 14: Resultate des 1D-EXCEL Tools für den Druckverlust eines Einzelkollektors, Leistung und Wirkungsgrad bei Kollektorzahlesteigerung, Druckverlust für eine Serienschaltung von Kollektoren und die Temperaturerhöhung im Kollektorfeld.

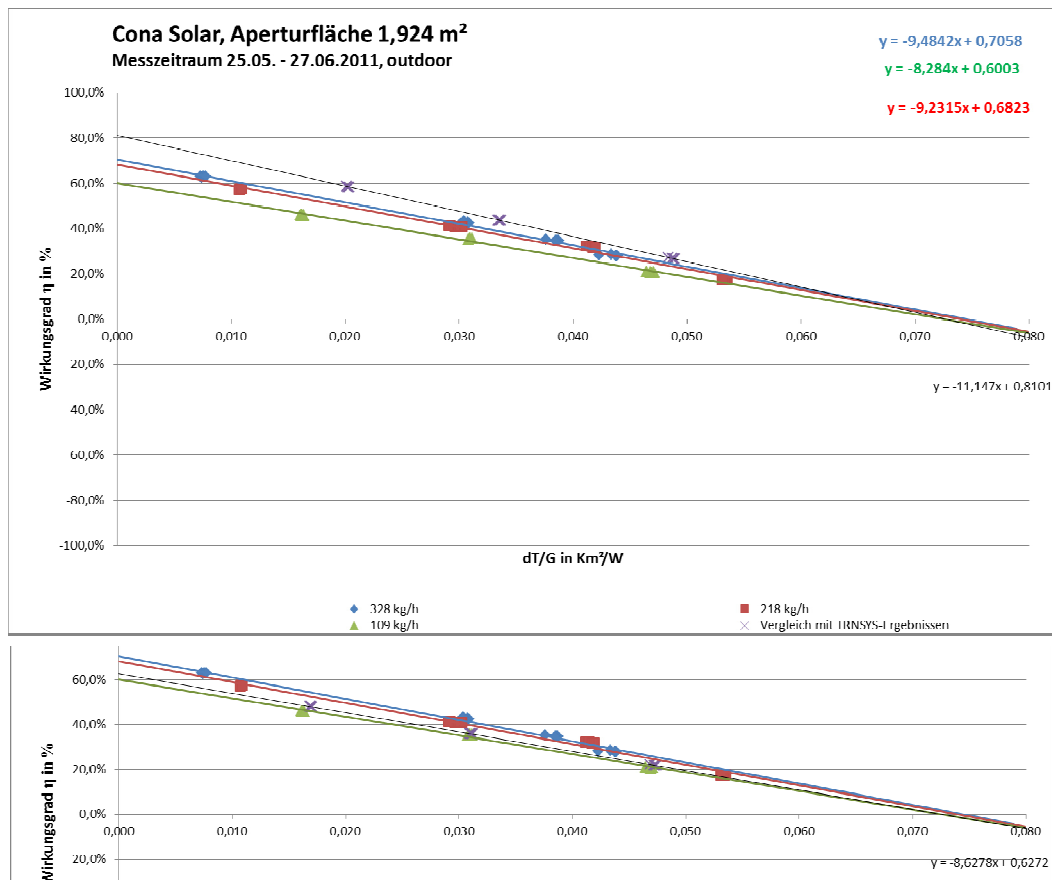


Abbildung 15: (oben) Vergleich der simulierten Daten (X) mit den Ergebnisse der Messungen – die Abweichung zur Messung bei 109 kg/h ist gross; (unten) Berechnung und Vergleich bei angepassten Parameter „Tested flow rate“.

## TRNSYS Parameterstudie – Abgleich Labormessergebnisse

Mit dem angepassten Type (neue Nummer 201, aufbauend auf Type 1) wurde eine Parameterstudie durchgeführt (siehe Abbildung 16). Dazu muss eine Tabelle mit allen Parametern erstellt werden. In TRNEdit wurde ebenfalls der Parameter des Prüfmassenstroms variiert. Die Ergebnisse der TRNSYS-Parameterstudie übersteigen die Wirkungsgrade der Labormessungen geringfügig. Sie liegen aber alle innerhalb eines 3%-Punkte-Bereiches, wie er als Fehlergrenze definiert wurde.

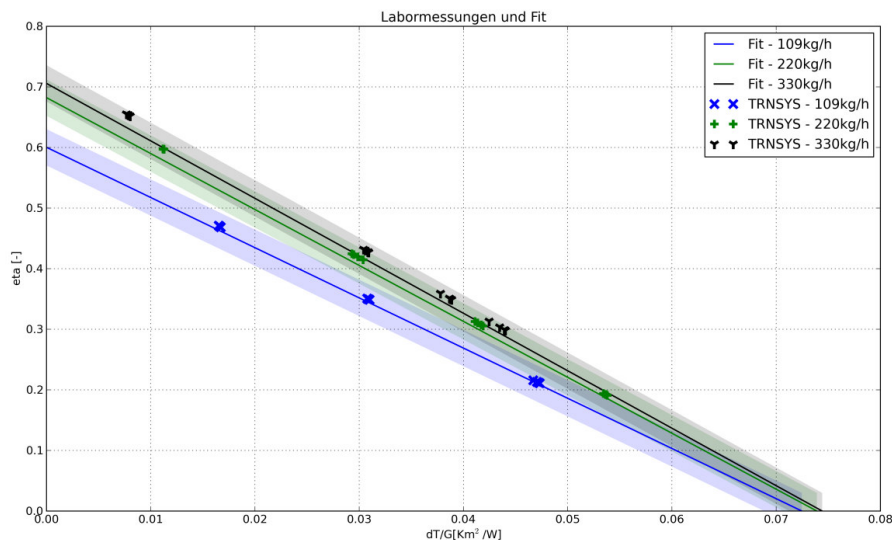


Abbildung 16: Vergleich der simulierten Daten (Symbole) mit den Ergebnissen der Messungen (Fit der experimentellen Daten mit Linien sowie Messunsicherheitsbereich)

## Simulation von Kollektorfeldvarianten

Bei der Simulation von Kollektorfeldvarianten mit unterschiedlichen Verschaltungsvarianten sind folgende Parameter variabel: (a) Kollektorfeld (Gesamtgröße Kollektorfeld, Verschaltung Kollektoren (seriell, parallel), Neigung Kollektoren, Beimischung von Umgebungsluft); (b) Regelung (Massenströme / Ventilatorumdrehzahlen, Ein- und Ausschaltkriterien); (c) Zusatzheizener; (d) Wirkungsgradkennwerte Kollektor (Wärmeverlustkoeffizient  $a_1$ ). Für die Regelung war keine eingehende Betrachtung vorgesehen. Bei den vorliegenden 1D Simulationsrechnungen wurde daher „ohne Regelung“ gearbeitet, was bedeutet, dass jede Energie, welche von Solarstrahlung auf das Kollektorfeld eintrifft in nutzbare Wärme umgewandelt wird. Diese Betrachtungsweise ist am ehesten vergleichbar mit dem Brutto-Kollektorertragstool des Solar Keymark Qualitätslabels (Scenocalc).

Die simulierten Varianten sind mit einem 4-Buchstaben Code (XSYP) benannt: (X...Anzahl serieller Kollektoren je Strang, S...seriell, Y...Anzahl paralleler Stränge, P...parallel). Parameter wie Massen- oder Volumenströme in den einzelnen Strängen wurden mit realen Anlagendaten abgestimmt. Eine Messung der Strömungsgeschwindigkeit im Luftkanal erfolgt gemäß der Monitoring-Dokumentation in der Saugleitung des Ventilators. Diese liegt zwischen 2 und 3 m/s und ergibt bei den Abmessungen von 49cm x 49cm einen Volumenstrom von 0,48 bis 0,72 m<sup>3</sup>/s. Dies entspricht ca. einem Volumenstrom von 1730 bis 2600 m<sup>3</sup>/h. Bei Standardbedingungen (ca. 1,2 kg/m<sup>3</sup> bei 20°C und auf Meeresspiegel) ergibt sich daraus ein Massenstrom von ca. 2076 bis 3120 kg/h für beide beschriebenen Kollektorfelder. Die beiden Kollektorfelder bestehen aus 48 Kollektoren mit je ca. 2m<sup>2</sup> Kollektorfläche, woraus sich ein spezifischer Massenstrom zwischen 21,5 und 32,5 kg/m<sup>2</sup>h ergibt. Im Vergleich dazu lagen die Massenströme bei den Laborversuchen zwischen 54,5 und 165 kg/m<sup>2</sup>h. Da die Betriebsmassenströme in einer realen Anlage merklich geringer sind, als bei den Messungen, kann die verwendete Variante der Fitergebnisse der Abhängigkeit des Wirkungsgrades vom Massenstrom einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis haben. Es wurden die linearen Fits für sowohl  $\eta_0$  als auch  $a_1$  für die Berechnungen herangezogen. Wetterdaten aus der Energy+-Datenbank wurden mit den Paramtern Slope of surface =

45° und Azimuth of surface = 0 festgelegt. Die relative Feuchte (rH) wurde für alle Simulationen auf einen konstanten Wert eingestellt. Das führt dazu, dass die spezifische Wärmekapazität der feuchten Luft nicht in Abhängigkeit der Luftfeuchte variiert – es befindet sich jedoch in einem Bereich, der plausibel ist. Bei allen Simulationen wird die Umgebungsluft angesaugt, es handelt sich um ein sogenanntes offenes System.

Als Beispiel ist Variante V2 6S4P (Kollektorfeld mit 12x2 Kollektoren (siehe Abbildung 17 und 18) hier gezeigt.

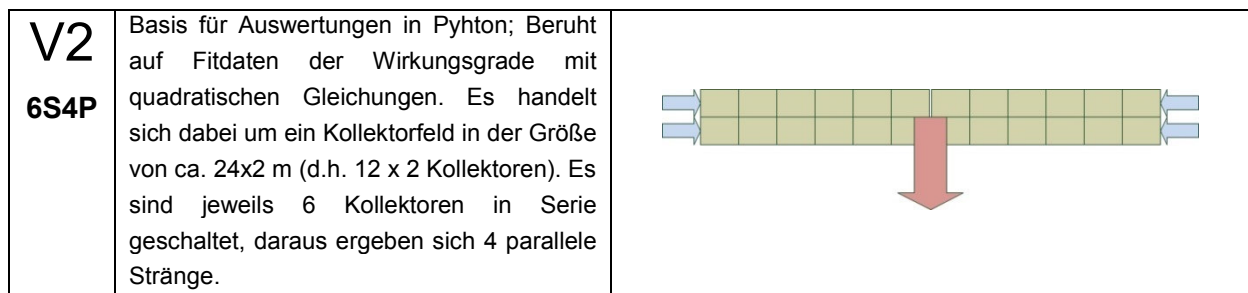


Abbildung 17: Variante V2 6S4P – Identifikationsnummer, Bemerkung und Schematik des berechneten Kollektorfeldes

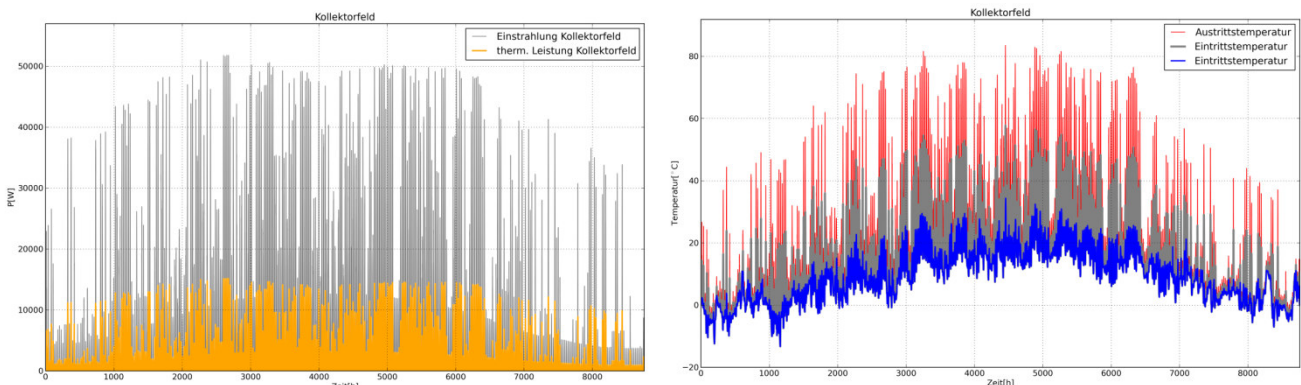


Abbildung 18: (links) V2 (6S4P) Einstrahlung und thermische Leistung des Kollektorfeldes als Funktion der Zeit; (rechts) V2 (6S4P) Eintritts-, Austritts- und mittlere Kollektortemperatur als Funktion der Zeit

## Vergleich und Validierung

Wesentlicher Projektinhalt war die Identifikation und Simulation von geeigneten Testfällen aus der Vielzahl von *Indoor*- und *Outdoormessungen* am CONA Luftkollektor. Die CFD Simulationen wurden an einem Streifen des Kollektors durchgeführt, der durch zwei Symmetrierandbedingungen begrenzt wird. Dadurch werden die seitlichen Verluste, die im realen Kollektor auftreten nicht berücksichtigt, sodass leicht höhere Ausgangstemperaturen bei gleicher Eingangstemperatur zu erwarten sind. Die Eingangstemperatur und der Eingangsvolumenstrom bei Simulation und Experiment sind ident angenommen, die sich in der Simulation ergebende Ausgangstemperatur kann direkt mit den Messdaten verglichen werden. Neben den Materialparametern und der Geometrie muss noch der solare Quellterm

definiert werden. Hierzu wird die in den Experimenten bestimmte solare Einstrahlung um die Verluste bei Glasdurchtritt und Absorption am Absorber reduziert und als Energiequellterm im Absorberblech in den Simulationen vorgegeben. Abbildung 19 zeigt einen Vergleich der berechneten und gemessenen Austrittstemperaturen für die **Outdoor-Meßkampagne** für verschiedene Szenarien.

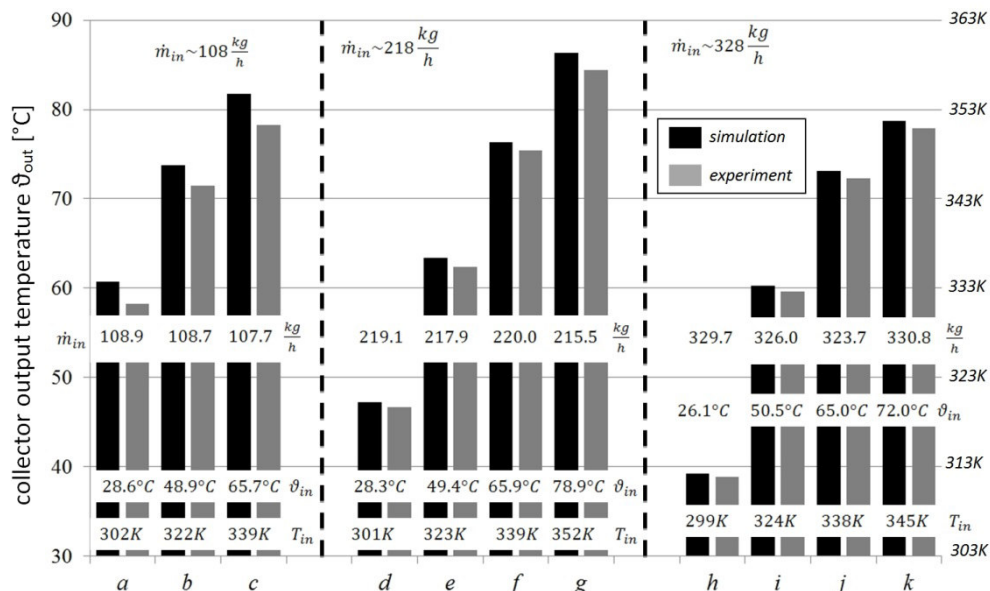


Abbildung 19: Vergleich der Auslasstemperatur des CONA-Luftkollektors für unterschiedliche Luftvolumenströme und Lufteinlasstemperaturen zwischen experimentellen Outdoorprüfstandsdaten (ISE) und CFD-Simulationen (AIT).

CFD Simulationen sind in der Lage, dreidimensionale Modelle von Luftkollektoren korrekt abzubilden. Die relative Vorhersagegenauigkeit ist sehr gut, eine kleine (systematische) Abweichung zwischen numerischen und experimentellen Daten ist in Abbildung 19 ersichtlich. Die Größe des Rechengitters, die notwendig ist, um jedes Detail eines ganzen Luftkollektors aufzulösen übersteigt die verfügbaren Ressourcen (Hauptspeicher und Rechenzeit) bei weitem. Daher sind einige Annahmen zu treffen, um die Geometrie zu vereinfachen. Die Simulation eines ganzen Kollektorfeldes das aus einer Kombination vieler Kollektoren in parallelen oder seriellen Verschaltungen besteht wird nur mit vereinfachten Modellen möglich sein. Korrelation, die aus den Einzelrechnungen erhalten werden können, stellen jedoch eine gute Basis für Kollektorfeldsimulationen dar.

Für die Berechnungen am Luftkollektor wurde nur ein schmaler Streifen des Kollektors herangezogen. Dies führt nur zu geringen Abweichungen von den experimentellen Resultaten. Dies konnte auch durch Analyse der Wärmeströme durch die Seitenflächen gezeigt werden, wenn ein gesamter (vereinfachter 1:1) Luftkollektor berechnet wird. Diese Verluste werden noch weiter reduziert, wenn die Kollektoren Seite an Seite in einem Kollektorfeld aufgebaut sind. Die primären Verluste werden durch die Glas- und Rückseite des Kollektors erfolgen.

Der Einfluss der Neigung des Kollektors auf die zu erreichende Kollektoreffizienz wurde ebenfalls untersucht: Für den betrachteten Kollektor konnte keine signifikante Abweichung festgestellt werden. Die zwei Querbalken zwischen Glas und Absorber teilen den Luftspalt in drei rechteckige Teile, sodass der Platz für die Ausbildung von Konvektionsmustern reduziert ist. Dieses Verhalten ist jedoch nicht allgemeingültig und muss für jeden Kollektor unabhängig untersucht werden.



Die Erhöhung der Wärmeübertragungsfläche mit einem Faktor 3 oder 5 hat einen großen Einfluss auf die Effizienz des Luftkollektors (sein Vermögen, Energie auf das bewegte Luftvolumen zu übertragen) im Vergleich zu einem Kollektor mit einem flachen Absorber. Die Simulationen zeigen aber, dass eine weitere Erhöhung dieses Faktors nur geringe weitere Effizienzsteigerungen bewirken wird – sodass ein Limit der Flächenerhöhung gegeben ist.

Die Simulationen und der Vergleich zu den experimentellen Daten zeigen deutlich die Möglichkeiten der Simulationstechnologie zum Einsatz als Design-Tool für Luftkollektoren. Insbesondere die große relative Vorhersagegenauigkeit für unterschiedliche Randbedingungen macht das Tool sehr interessant. Neben der Untersuchung unterschiedlicher Materialien (mit unterschiedlichen Absorptivitäten, Transmissivitäten, Emissivitäten und thermischen Leitfähigkeiten) kann CFD gut zur Analyse geplanter geometrischer Veränderungen eingesetzt werden. Der im Rahmen dieses Projektes durchgeführte Vergleich zeigt, dass die verwendete experimentelle Methode und der experimentelle Aufbau für Messungen unter höchsten Qualitätsanforderungen möglich sind, obwohl die Details von Luftkollektoren kompliziert sind.

### Administration und Dissemination

Im Rahmen des laufenden Projekts wurden neben telefonischen Besprechungen insgesamt 10 Meetings durchgeführt (siehe Abbildung 20 und 21).



Abbildung 20 (links): Projektmeeting bei CONA am 08.11.2012; (rechts) Projektmeeting bei CONA am 12.02.2014 (im Hintergrund bereits das neue Kollektorfeld);

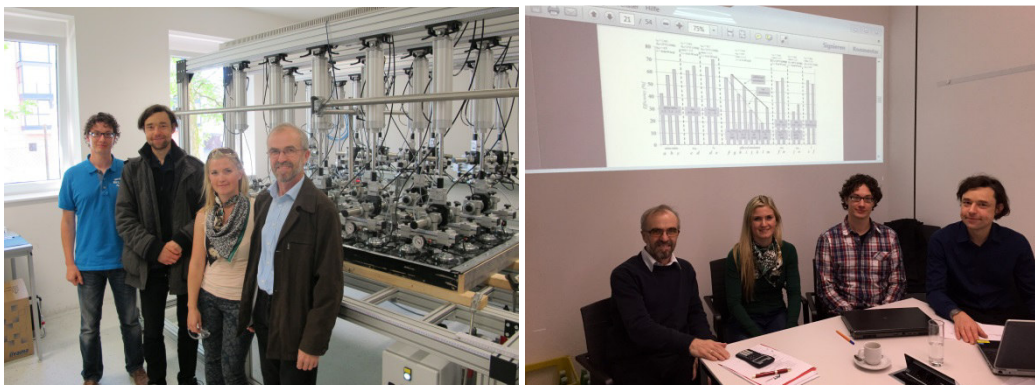


Abbildung 21 (links): Projekttreffen bei ISE – im Hintergrund der MECH-Test [mechanischen Belastungstestsand montiert]; (rechts): Abschlussmeeting am AIT

Im Rahmen des Projektes war die Dissemination von Teilergebnissen bei verschiedenen Veranstaltungen geplant. Resultate wurden beim ERCOFTAC ADA PC Meeting im Mai 2014 in Udine und im Juli 2014 bei der ESAT2014 in Eindhoven präsentiert, eine Veröffentlichung in „Solar Energy“ ist zur Publikation akzeptiert und wird voraussichtlich im Herbst 2015 erscheinen (siehe auch Kapitel 7, Abbildung 23 und 24)

- Ch. Reichl, P. Benovsky, M. Popovac.  
*Numerical Modeling of Solar Air Collectors for Biomass Drying Applications*  
ESAT 2014, 27th European Symposium on Applied Thermodynamics, July 6th-9th, Eindhoven University of Technology, The Netherlands
- Ch. Reichl, K. Kramer, Ch. Thoma, P. Benovsky, T. Lemeé  
*Comparison of experiments and simulation in a flat plate solar air heating collector*  
21st ERCOFTAC Alpe Danube Adria Pilot-Center Meeting, May 8th, 2015, Vienna, Austria
- Ch. Reichl, Ch. Thoma, K. Kramer, P. Benovsky, T. Lemeé:  
*Modelling heat transfer and instabilities in a flat plate solar air collector: Comparison of steady and transient three dimensional computational fluid dynamics simulations to experimental data,*  
Solar Energy, accepted, will be published in fall 2015

### 4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Zielsetzungen wurden im Rahmen des Forschungsprojektes erreicht:

Die Zusammenfassung der Luftkollektoranwendungen und das Pflichtenheft sind wichtige Dokumente des Konsortiums, die auch die charakterisierenden Parameter für Wasser- und Luftkollektoren sowie eine Abgrenzung der Luft- zur Wasserkollektortechnologie enthalten.

Im Bereich des **Kollektors** wurde die Qualität des Solarluftkollektors weitgehend bestätigt und in zwei speziellen Bereichen weiterentwickelt, nämlich beim Solarglas und bei der Regenwasserübergangsleiste mit der Funktion der mechanischen Fixierung der Glasabdeckung. Ersteres hat eine weitere Leistungssteigerung gebracht und zweiteres eine konstruktive Verbesserung. Es wurden auch weitere Optimierungsvarianten getestet, die in Abhängigkeit vom Verhältnis von Aufwand und Nutzen in weiterer Folge eingesetzt werden können. Teilweise ist dafür aber eine größere Investition notwendig, die sich erst bei größerer Stückzahl rentiert.

Die wichtigsten Tests, die am **variabel verschaltbaren Kollektorfeld** durchgeführt wurden sind folgende: Die Kombination aus Serien- und Parallelschaltungen zum Test von Druckverlust, Solarleistung, Massenstrom und Gleichmäßigkeit der Luftverteilung. Die Verschaltung, der Massenstrom und die erforderliche Temperatur müssen in Verbindung zu den jeweiligen Einsatzbereichen der Solarlufttechnik gesehen werden. Für die *Biomassetrocknung im Niedertemperaturbereich* ist ein hoher Massenstrom gewünscht. Bei der symmetrischen Verschaltung wurde bestätigt, dass Kollektoren jeweils 4m links und rechts und 6m links und rechts gut eingesetzt werden können, der Druckverlust in diesen Fällen innerhalb der vorgesehene Ventilatorleistung (Betrieb mit einem einzigen Ventilator (Energiesparventilator zw. 0,16 und 0,40 kW) möglich) passt und die gesamte Solarleistung annähernd gleich hohe Ergebnisse bringen. Ab einer Länge von 8m (beidseitig) ist der Druckverlust bereits entscheidend und aus diesem Grund werden dann stärkere Ventilatoren benötigt. Wird hingegen die Anlage für *höheres Temperaturniveau* eingesetzt, wird sie mit einem niedrigerem Massenstrom betrieben und es eine Verschaltung auf 8 bis 10m (links und rechts), also Gesamtanlagenbreite 16 bis 20m ist möglich. Die asymmetrische Verschaltung wurde vor dem Forschungsprojekt nicht durchgeführt. Nun hat sich aber gezeigt, dass diese Verschaltung durchaus möglich ist und gegebenenfalls mittels geringer Korrekturen in der Luftströmung ausgeglichen werden kann, was sehr interessante Anwendungsfelder in geometrisch komplizierten Umgebungen ermöglicht und zu einer weiteren Verbreitung der Solarlufttechnik (bessere Ausnutzungen vorhandener Dachflächen) führen kann. Die Volumenströme können hoch ( $100 \text{ kg/m}^2$ ) angesetzt werden, womit die höchstmöglichen thermischen Leistungen der Kollektoren aus der Gesamtanlage abgerufen werden können.

Im Rahmen des Projektes wurden mehrere unterschiedliche Luftkollektoren konstruiert und getestet. Die Erfahrungen wurden beim Bau eines neuen (unterschiedlich verschaltbaren) Kollektorfeldes eingebracht. Der Kollektor und das Kollektorfeld wurden messtechnisch instrumentiert. Ein Luftkanal mit variablen Umlenkkonfigurationen wurde konstruiert und das Strömungsfeld mittels optischer



Strömungsmeßtechnik charakterisiert. Die thermo- und strömungsmechanischen Abläufe innerhalb des Kollektors wurden analysiert.

1D (basierend auf EXCEL für Kollektorsimulation und TRNSYS für Systemsimulation) und 3D Modelle des Luftkollektors wurden erfolgreich entwickelt und parametrisiert. Der Vergleich der Prüfstandsmessungen mit 3D CFD Resultaten resultiert in einer belastbaren Methodik für die Simulation von Luftkollektoren unter Berücksichtigung von allen relevanten thermodynamischen Prozessen der Wärmeübertragung: Strahlung, Konvektion und Diffusion. Auch der Wärmetransport durch die metallischen Festkörper wurde mittels Lösung der Wärmeleitungsgleichung simultan erfasst und mit der Navier Stokes Gleichung für die Lösung der Strömungsgleichungen gekoppelt.

Das Konsortium führte eine Reihe von sehr produktiven, interessanten Projekttreffen bei den Partnern durch. Die Arbeiten konnten bei mehreren internationalen Konferenzen vorgestellt werden und wurden zur Publikation in Solar Energy eingereicht.

Die Prüfinfrastruktur am ISE konnte im Rahmen des Projektes optimal eingesetzt werden. Die Erkenntnisse aus den umfangreichen Messungen der unterschiedlichen Kollektoren sowohl indoor- als auch outdoor (insbesondere der zeitgleichen Parallelmessung zweier Bauvarianten am Outdoorprüfstand) beinhalten wertvolle Resultate. Im Rahmen der vielfältigen Messungen Luftkollektoren im Rahmen dieses Projektes konnte sich die hochpräzise Messtechnik für Luftkollektoren gut bewähren. Diese Infrastruktur steht anderen Luftkollektorherstellern zur Verfügung.

Die entwickelten 1D Modelle zur Simulation von Luftkollektoren und die Tests mit unterschiedlich verschalteten Kollektorfeldern bieten ein breites Betätigungsfeld im Bereich der Systemsimulation, die nun auch die Luftkollektortechnik zufriedenstellend einbindet. Die validierten 3D CFD Modelle ermöglichen den Einsatz dieser wertvollen Methode für Design und Entwicklung von Solarluftkollektoren der nächsten Generation. Diese entwickelte und überprüfte Toollandschaft steht für weiterführende Arbeiten zur Verfügung. Die Resultate der 3D Modellentwicklung sind für die verschiedenen Forschungsgruppen im Bereich Solarluftkollektoren relevant und sind über die Publikation in Solar Energy weltweit abrufbar. Wesentliche Resultate aus dem Forschungsprojekt werden über den publizierbaren Endbericht alle wichtigen Zielgruppen zur Verfügung gestellt.

### **Markt**

Die Fa. CONA konzentriert sich auf die solare Trocknungstechnik. Die Kollektoren werden nicht extra vermarktet. Insgesamt sind die solaren Trocknungsanlagen in 25 Ländern im Einsatz. Zum Projektstart waren es 14 Länder (+79%). Mit diesen Anlagen werden bereits 170 verschiedene Güter getrocknet. Zum Projektstart waren es 120 (+42%).

### 5 Ausblick und Empfehlungen

Die Beschreibung der Luftkollektoren ist im Rahmen des Projektes sowohl mit numerischen (1D EXCEL, 1D TRNSYS, 3D CFD) als auch experimentellen (Luftkollektorprüfstand) Methoden durchgeführt worden – belastbare Modelle liegen dem Konsortium vor.

Im Rahmen der Arbeiten zeigte sich deutlich, die notwendige Behandlung einerseits des Kollektorfeldes, andererseits der Systems aus Luftkollektor und Verbraucher.

Das Konsortium empfiehlt daher weiterführende Arbeiten in den folgenden Bereichen:

- 3D CFD Kollektorfeldsimulationen – erste Tests zeigten deutlich die empfindlichen Zusammenhänge zwischen Design von Luftabsaugungen und Kollektorzusammenführungen mit der Luftmengen und –geschwindigkeitsverteilung in den Kollektoren. Letztere definiert schließlich die Effizienz des Gesamtkollektorfeldes (siehe Abbildung 22 für eine Veranschaulichung eines sehr stark vereinfachten Kollektorfeldes)
- Genauere Untersuchungen des Zusammenspiels von Kollektorfeld und Verbrauchersystem (Trocknungsanlage, Hallenheizungen, Steinspeicher, etc...) im Rahmen von Kollektorfeldsimulationen und Systemsimulationen. Diese experimentellen und numerischen Arbeiten und ein Abgleich der beiden Ansätze ermöglichen Vorabdesign von Anlagen, die mit Luftkollektortechnik betrieben werden.

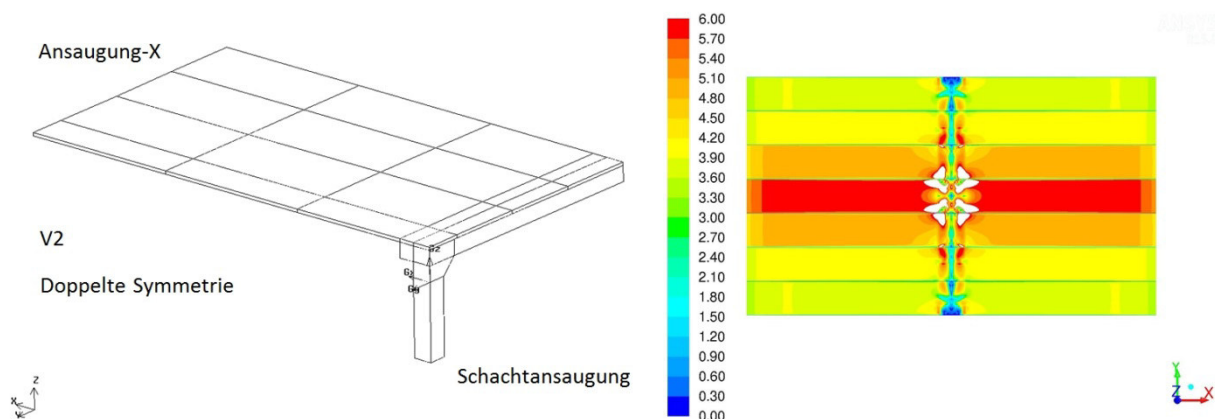


Abbildung 22: erste Tests einer sehr stark vereinfachten 3D CFD Flachabsorber - Kollektorfeldstudie; (links): Geometrie (dargestellt ist nur ein Teil des Feldes – das ganze Feld ergibt sich durch Nutzung der Symmetrieebenen links vorne und rechts vorne, (rechts): Kontourplot der Strömungsgeschwindigkeit [m/s] – die Schachtansaugung befindet sich in der rechten Abbildung mittig.

## 6 Literaturverzeichnis

1. [Ans13] ANSYS, 2013. ANSYS R Fluent, Release 15.0. ANSYS, Inc. Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA.
2. [Bie11] Biermayr et al, Innovative Energietechnologien in Österreich, 2011
3. [Blu02] J. Blumm, J. Opfermann; Improvement of the mathematical modelling of flash measurements; High Temp. High Press. Vol.34, 515-521 (2002)
5. [Bru95] H. H. Bruun, Hot-Wire Anemometry: Principles and Signal Analysis, Publisher: Oxford University Press, USA (June 8, 1995), ISBN: 0198563426
6. [But07] Buttinger, F., Pröll, M., Beikirchner, T., Schöllkopf, W., 2007. Entwicklung eines konzentrierenden Vakuumflachkollektors für Mitteltemperaturanwendungen. In: 17. Symposium Thermische Solarenergie. Bad Staffelstein, Germany.
7. [Cap63] J.A. Cape, G.W. Lehmann; J. Appl. Phys., Vol.34, 1909-1913 (1963)
8. [Cha13] Chandrasekhar, S., 2013. Hydrodynamic and hydromagnetic stability. Courier Corporation.
9. [Che03] Chen Y. T. et al., High precision (1 part in  $10^4$ ) reflectivity measurement for the study of reflective materials used in solar collectors, Solar Energy Materials and Solar Cells 80 (2003), 305-314
10. [Cla75] L.M. Clark, R.E. Taylor; Radiation Loss in the Flash Method for Thermal Diffusivity; J.Appl.Phys. Vol.46, 714-719 (1975)
11. [Dgi86] A. Dgiovanni, M. Laurent; Une nouvelle technique d'identification de la diffusivité thermique pour la methode flash; Revue Phys. Appl. Vol.21, 229-237 (1986)
12. [DST] DSTTP, Forschungsstrategie für Niedertemperatur-Solarthermie 2030
13. [Duf06] Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2006. Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd Edition. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
14. [Dur87] F. Durst, A. Melling, J. H. Whitelaw, Theorie und Praxis der Laser Doppler Anemometrie, ISBN 3-7650-2022-2 Verlag G. Braun, Karlsruhe 1987
15. [Dur91] P. Durbin, Near-Wall Turbulence Closure Modeling Without Damping Functions, Theoretical. Comput. Fluid Dynamics, Vol.3, pp. 1-13, 1991
16. [Eam93] Eames P. C., Norton B., Detailed Parametric Analyses of Heat Transfer in CPC Solar Energy Collectors, Solar Energy 50, 1993
17. [Eam93b] Eames, P. C., Norton, B., 1993b. Validated, unified model for optics and heat transfer in line-axis concentrating solar energy collectors. Solar Energy 50, 339-355.
18. [ENV99] ENV 13005; Guide to the expression of uncertainty in measurement (1999)
19. [Jov02] J. Jovanovic, The Statistical Dynamics of Turbulence, ISBN 3-540-20336-2 Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2002
20. [Ken02] Kennedy C.E., Review of Mid- to High-Temperature Solar Selective Absorber Materials, NREL Technical Report (2002) NREL/TP-520-31267
21. [Mat] Matuska, T. et al, Design tool KOLEKTOR 2.2 for virtual prototyping of solar flat-plate collectors, TU Prag, [www.fsid.cvut.cz/~matustom/kolektor/ID90\\_matuska\\_metzger\\_zmrhal\\_design\\_tool\\_kolektor.Pdf](http://www.fsid.cvut.cz/~matustom/kolektor/ID90_matuska_metzger_zmrhal_design_tool_kolektor.Pdf)

22. [Hem89] W.F. Hemminger, H.K. Cammenga; Methoden der Thermischen Analyse, Springer 1989, pp 100-200
23. [ISO13]ISO, 2013. Norm ISO 9806:2013(E) Solar energy solar thermal collectors test methods, edition 2013-11.
24. [Kra14] Kramer, K. S., Thoma, C., Mehnert, S., Fahr, S., 2014. Testing Solar Air-heating Collectors. Energy Procedia 48, 137-144, 2nd International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry (SHC 2013).
25. [Pau11-1] G. J. Pauschenwein, Ch. Zauner, Ch. Reichl, M. Monsberger  
Pressure Drop, Flow Distribution and Turbulence in Collector Hydraulics  
ISES Solar World Congress 2011, August 28th – September 2nd, Kassel, Deutschland
26. [Pau11-2] G. J. Pauschenwein, Ch. Zauner, G. Schmid, Ch. Reichl, M. Monsberger  
Kollektorhydraulik – Ultraschall und CFD, 21. Symposium THERMISCHE SOLARENERGIE, 11.05.2011 - 13.05.2011, Bad Staffelstein, Kloster Banz, Deutschland
27. [Raf98] M. Raffl, C. Willert, J. Kompenhans, Particle Image Velocimetry – A practical Guide, ISBN 3-540-63683-8 Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1998
28. [Ray16] Rayleigh, L., 1916. LIX. on convection currents in a horizontal layer of fluid, when the higher temperature is on the under side. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 32 (192), 529-546.
29. [Rei13] Reichl, C., Hengstberger, F., Zauner, C., 2013. Heat transfer mechanisms in a compound parabolic concentrator: Comparison of computational uid dynamics simulations to particle image velocimetry and local temperature measurements. Solar Energy 97 (0), 436-446.; URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13003605>
30. [Rhi73] F. Rhigini, A. Cezairliyan; Pulse Method of the Thermal Diffusivity Measurement (A Review), High Temp. High Press. Vol.5. 481-501 (1973)
31. [Ruc87] B. Ruck, Laser-Doppler-Anemometrie, ISBN 3-921 681-00-6 AT-Fachverlag GmbH Stuttgart 1987
32. [Sel08] Selmi M., Al-Khawaja M. J., Marafia A., Validation of CFD Simulation for Flat Plate Solar Energy Collector, Renewable Energy 33, 2008
33. [Sie09] Thorsten Siems, Matthias Rommel, Feldtest mit hocheffizienten Vakuumröhren-Solarluftkollektoren zur solaren Heizungsunterstützung, OTTI 2009, 19. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 06.-08. Mai 2009
34. [Str08] Gerhard Stryi-Hipp, Korbinian Kramer, Jens Richter, Christoph Thoma, Stefan Fortuin, Stefan Mehnert and Christian Welz, Towards a unified standard for solar air heating collectors, EUROSUN 2008, Int. Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings, 07th - October 10th, 2008, Lisboa, Portugal
35. [Tay84] R.E. Taylor, D.K. Maglic; Pulse Method for Thermal Diffusivity Measurement – in D.K. Maglic, A. Cezairliyan, V.E. Peletsky; Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods, Vol.1 Survey of Measurement Techniques; London, Plenum Publishing Corp. (1984)
36. [Tes00] Tesfamichael T., Waackelgard E., Angular Solar Absorptance and Incident Angle Modifier of Selective Absorbers for Solar Thermal Collectors, Solar Energy 68 (2000), 335-41
37. [Tho10a] Thoma, C., Cerezo, J. D. M., Kramer, K., Richter, J., Mehnert, S., Stryi-Hipp, G., 2010. Temperature Measurement in Air Ducts an optimized method for solar air heaters. In: EUROSUN

2010, Int. Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings, September 28th- October 1st. Graz, Austria, International Solar Energy Society (ISES).

38. [Tho10b] Thorsten Siems, Matthias Rommel, Feldtest mit hocheffizienten Vakuumröhren-Solarluftkollektoren zur solaren Heizungsunterstützung, 20. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 05.-07. Mai 2010
39. [Tho11a] Christoph Thoma, Jens Richter, Stefan Mehnert, Korbinian Kramer, Gerhard Stryi-Hipp, Optimierung und Validierung des Luftkollektorteststandes im Rahmen des Projektes Luko-E, OTTI 2011, 21. Symposium Thermische Solarenergie, 11.-13. Mai 2011, Bad Staffelstein
40. [Tho11b] Christoph Thoma, Thorsten Weick, Jens Richter, Thorsten Siems, Matthias Rommel, Testing of solar air collectors, ISES Solar World Congress 2011, August 28th – September 2nd, Kassel, Deutschland
41. [VDI06] vgl. VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, VDI Wärmeatlas, Springer, 10. Auflage, 2006
42. [VDI03] VDI, 2003. VDI 4670-1 Thermodynamische Sto\_werte von feuchter Luft und Verbrennungsgasen, Ausgabe 2003-02 e.g. (VDI 4670-1).
43. [Wei11] Werner Weiss, Franz Mauthner, Solar Heat Worldwide, Markets and Contribution to the Energy Supply 2009, Edition 2011
44. [Wel14] Welz, C., Maurer, C., Paolo Di Lauro, G. S.-H., Hermann, M., 2014. Mass Flow, Pressure Drop, and Leakage Dependent Modeling and Characterization of Solar Air Collectors. Energy Procedia 48, 250-263.
45. [Zau12] Zauner, C., Hengstberger, F., Hohenauer, W., Reichl, C., Simetzberger, A., Gleiss, G., 2012. Methods for Medium Temperature Collector Development Applied to a fCPCg collector. Energy Procedia 30 (0), 187-197, 1st International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry (SHC 2012).; URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021201539123> e, J. A., Beckman, W. A., 2006. Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd Edition. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.



## 7 Anhang

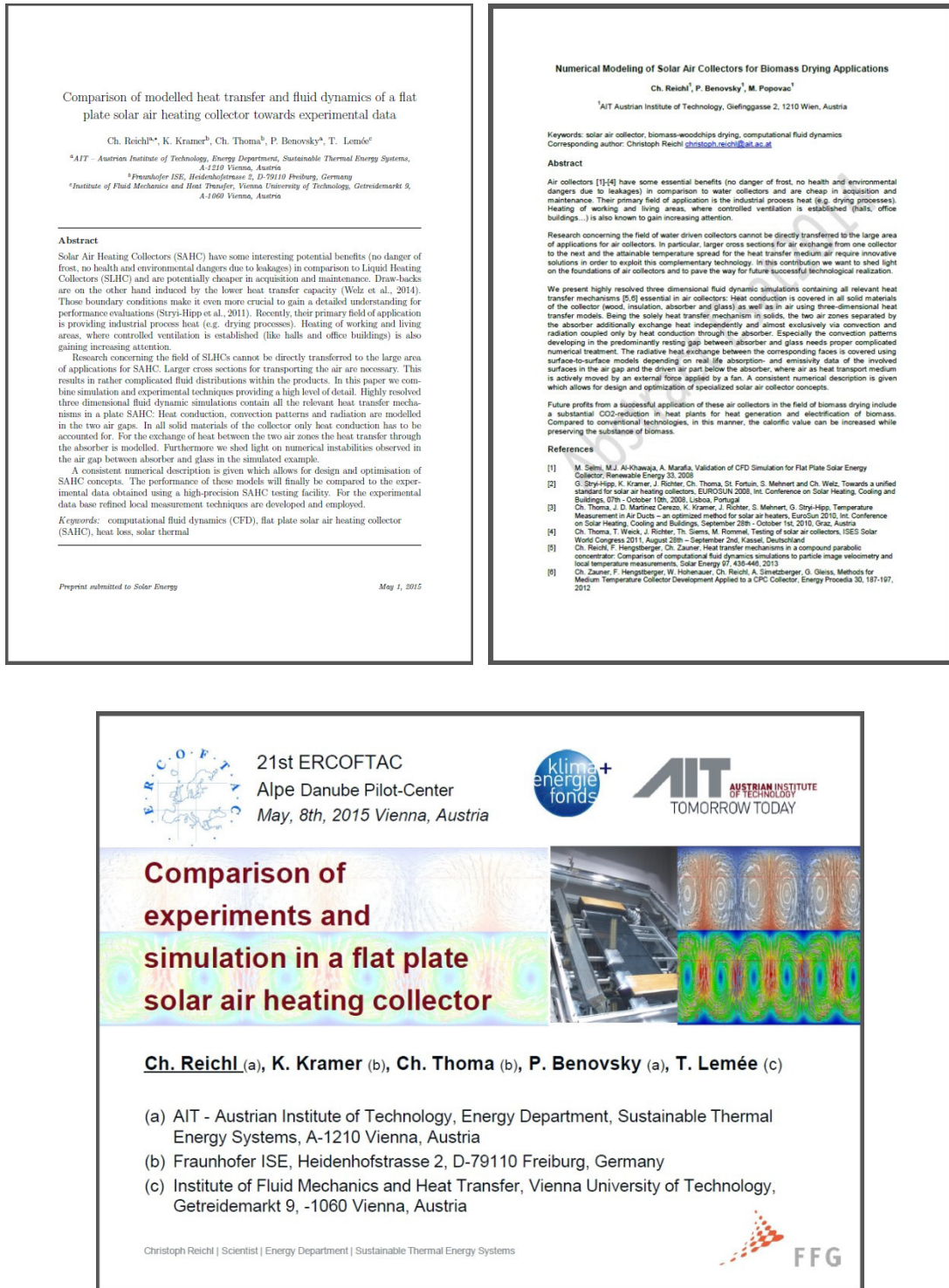


Abbildung 23: Publikationen des Projekts „innoLUKO“

Abbildung 24: Publikationen des Projekts „innoLUKO“

### 8 Kontaktdaten

Christoph Reichl

[christoph.reichl@ait.ac.at](mailto:christoph.reichl@ait.ac.at)

AIT – Austrian Institute of Technology

Energy Department

Nachhaltige Thermische Energiesysteme

Giefinggasse 2, A 1210 Wien, Österreich

T +43 50550 – 6605, F +43 50550 – 6679, [www.ait.ac.at](http://www.ait.ac.at)

Korbinian Kramer, Christoph Thoma

[Korbinian.Kramer@ise.fraunhofer.de](mailto:Korbinian.Kramer@ise.fraunhofer.de), [christoph.thoma@ise.fraunhofer.de](mailto:christoph.thoma@ise.fraunhofer.de)

Division Solar Thermal and Optics

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Heidenhofstrasse 2, 79110 Freiburg, Germany

Phone: +49 (0) 7 61/ 45 88-51 39

Fax: +49 (0) 7 61/ 45 88-9950

[testlab-sts@ise.fraunhofer.de](mailto:testlab-sts@ise.fraunhofer.de)

[www.collectortest.com](http://www.collectortest.com)

[www.kollektortest.de](http://www.kollektortest.de)

Johanna Astecker, Georg Hubmer

CONA Entwicklungs- u. Handelsges.m.b.H.

Voitsdorf 55, 4551 Ried/Traunkreis, AUSTRIA

Tel.: 0043 (0) 7588 6446, Fax: 0043 (0) 7588 6446 46

e-mail: [johanna.astecker@cona.at](mailto:johanna.astecker@cona.at), [georg.hubmer@cona.at](mailto:georg.hubmer@cona.at)

[www.solar.cona.at](http://www.solar.cona.at)



## IMPRESSUM

### **Verfasser**

Austrian Institute of Technology  
Energy Department  
Nachhaltige Thermische Energiesysteme  
Giefinggasse 2, A 1210 Wien, Österreich  
Tel: +43 50550 – 6605  
Fax: +43 50550 – 6679  
Web: [www.ait.ac.at](http://www.ait.ac.at)

### **Projektpartner und AutorInnen**

AIT Austrian Institute of Technology  
Christoph Reichl

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der  
angewandten Forschung e.V.

Korbinian Kramer  
Christoph Thoma

CONA Entwicklungs- und  
Handelsgesellschaft m.b.H.

Johanna Astecker  
Georg Hubmer

### **Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber**

Klima- und Energiefonds  
Gumpendorfer Straße 5/22  
1060 Wien  
E-Mail: [office@klimafonds.gv.at](mailto:office@klimafonds.gv.at)  
Web: [www.klimafonds.gv.at](http://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.

Weder der Klima- und Energiefonds noch  
die Forschungsförderungsgesellschaft  
(FFG) sind für die Weiternutzung der hier  
enthaltenen Informationen verantwortlich.

### **Gestaltung des Deckblattes**

ZS communication + art GmbH