

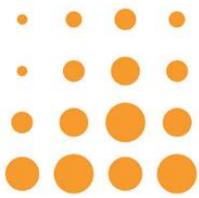
LWT  
airwalls



Entwicklung von Komponenten für ein  
solarthermisches Turmkraftwerk –  
**G**esamtoptimierung durch **L**uftwand und  
**o**ptimierten **W**ärmeträger

## **Schlussbericht**

Förderkennzeichen: 0324174 A/B



**LWT**  
airwalls



## Danksagung

Das Forschungsprojekt HelioGlow wurde in der Zeit vom 01.09.2018 bis zum 31.05.2022 durch den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 0324174 betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, wofür wir uns herzlich bedanken.

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt von sbp sonne gmbh, Kraftblock GmbH, Luftwandtechnik GmbH und Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg gemeinsam durchgeführt. Dieser Bericht beinhaltet eine Beschreibung der Arbeiten und Ergebnisse der Verbundpartner Luftwandtechnik GmbH und Fraunhofer ISE in den Teilprojekten 0324174 A/B. Für die Arbeiten in den angeschlossenen Teilprojekten C/D wurden separatere Abschlussberichte (Fkz.: 0324174 A/B) von Seiten sbp sonne gmbh und Kraftblock GmbH eingereicht, deren Teilprojekt zum 31.08.2021 endete.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# HelioGlow

## Entwicklung von Komponenten für ein solarthermisches Turmkraftwerk – Gesamtoptimierung durch Luftwand und optimierten Wärmeträger

Projektträger Jülich

### Projektkoordination

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
in Freiburg

### Teilprojekt A

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE

**Projektleitung:** Dr.-Ing Gregor Bern  
Heidenhofstr. 2  
79106 Freiburg im Breisgau

**Förderkennzeichen:** 0324174 A

### Teilprojekt B

LWT GmbH

**Projektleitung:** Dipl.-Ing Jürgen Städtner  
Waldnieler Str. 225  
41068 Mönchengladbach

**Förderkennzeichen:** 0324174 B

**Berichtszeitraum:** 01.07.2019 – 31.05.2022

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

## Inhalt

1.	Ausgangssituation des Vorhabens .....	2
1.1.	Aufgabenstellung .....	2
1.2.	Voraussetzungen .....	2
1.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	3
1.4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	4
1.5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	5
2.	Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens .....	6
2.1.	Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse .....	6
2.1.1.	AP 1 Projektmanagement und Koordination .....	6
2.1.2.	AP 2 Heliostatenentwicklung .....	6
2.1.3.	AP 3 Receiverentwicklung .....	6
2.1.4.	AP 4 Systemintegration .....	20
2.1.5.	AP 5 Komponententests .....	23
2.1.6.	AP 6 Planung und Vorbereitung zur Verwertung .....	35
2.2.	Zahlenmäßiger Nachweis .....	38
2.3.	Notwendigkeit der Arbeit .....	38
2.4.	Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	38
	LWT GmbH .....	39
	Fraunhofer ISE .....	39
2.5.	Relevante Ergebnisse von dritter Seite .....	40
2.6.	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen .....	40
3.	Literaturangaben .....	41

## 1. Ausgangssituation des Vorhabens

### 1.1. Aufgabenstellung

Im Projekt HeliOGlow wurden grundlegende Innovationen betrachtet und erarbeitet. Die Zielstellung umfasst ein Konzept, bestehend aus einem kleinen Heliostatenfeld und einem zentralen Receiver, der eng mit einem Speicher und einer Turbine (perspektivisch z.B. eine Supercritical-CO<sub>2</sub> (sCO<sub>2</sub>)-Turbine oder einer Mikrogasturbine) gekoppelt ist. Mit der Turbine wird Strom erzeugt. Die Abwärme kann als hochwertige Prozesswärme z.B. zur Erzeugung von Prozessdampf genutzt werden.

Im Projekt wird ein kompakter Receiver auf Basis von Festkörpermaterialeien entworfen. Zur Ertragsoptimierung sollte ein Konzept zur Reduzierung der Receiver-Wärmeverluste mittels Luftwand entwickelt und getestet werden. Das Projekt gliederte sich in die Entwicklungs- und die Erprobungsphase.

Kurzgefasst wurden die nachfolgenden Ziele verfolgt:

- Entwicklung und Test eines Receiver-Konzepts mit integriertem Speicher, basierend auf dem SoBoRec (solid body receiver) Konzept einschließlich eines neuartigen Werkstoffs.
- Entwicklung und experimentelle Umsetzung eines Konzepts zur Verminderung der thermischen Verluste in Turmreceivern auf Basis von Luftwandtechnologie
- Weiterentwicklung des Stellio-Heliostaten mit dem Ziel der weiteren Kostenreduktion und Anpassung des Designs an die Anforderungen kleiner Turmkraftwerke
- Weiterentwicklung von technisch-ökonomischen Modellen für die Auslegung und Wirtschaftlichkeitsberechnung von kommerziellen Turmkraftwerken

### 1.2. Voraussetzungen

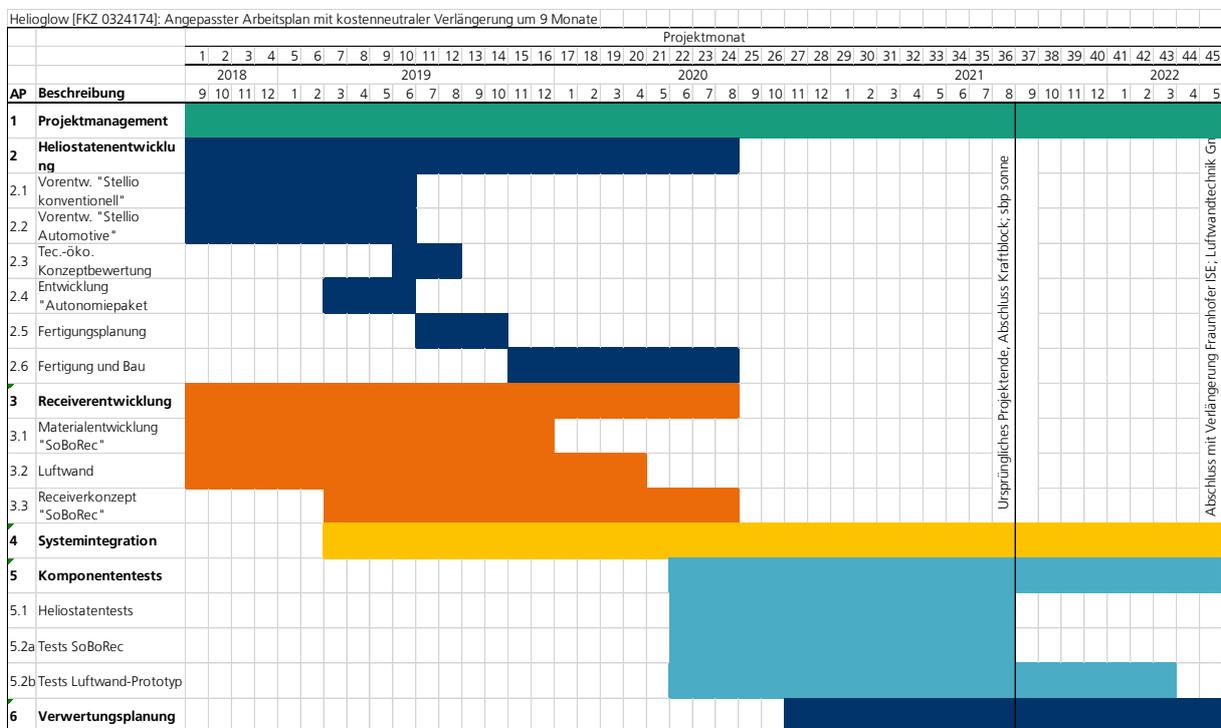
Fraunhofer ISE – Fraunhofer ISE bearbeitete bereits vor dem Beginn des Projektes im Bereich Solarthermie und Optik seit vielen Jahren Fragestellungen im Kontext konzentrierender Kollektoren und solarthermischer Kraftwerke. So wurde auch in einer Studie gezeigt, dass kleine solarthermische Anlagen zur Kraft-Wärmekopplung ökonomisch sinnvoll sein können ([www.mss-csp.info](http://www.mss-csp.info)). Zudem wurden in einer Dissertation dynamische Simulationsmodelle für die Komponenten von solaren KWK-Anlagen implementiert, und für die Reglerauslegung verwendet. Die entwickelten Regler wurden an einer Testanlage erfolgreich getestet und der Einfluss unterschiedlicher Regelstrategien wurde untersucht. Messtechnik und Expertise in den Bereichen Heliostaten, Heliostatenfeld-Regelung und Turmkraftwerke, sowie speziell die Solarfeld-Auslegung und auch die Modellierung von Receivern, wurden im BMWi-Projekt „HeliPack“ (heute BMWK) und im EU-Projekt „Raiselife“ (Laufzeit bis 2019) weiter ausgebaut. Im Bereich optischer Simulation, Messtechnik und Umsetzung von Materialuntersuchungen und Entwicklung von Testständen, konnte das vorliegende Projekt hierauf aufbauen.

*LWT* - Die Luftwandtechnik GmbH stellte bereits zu Beginn des Projekts mit dem patentierten Verfahren Lösungen für die thermische Trennung von offenen Räumen bereit und ermöglichte damit erhöhte Einsparungen bei der Klimatisierung von Gebäuden. Umgesetzte Anwendungsbeispiele reichen von industriellen Gebäuden wie Kühlräumen und Logistikhallen, öffentlichen Gebäuden wie Flughäfen oder Bahnhöfen bis zu Märkten oder Banken. Die präzise umgesetzten Luftwände konnten hierbei individuell an die räumlichen und gestalterischen Gegebenheiten angepasst werden. In der Anwendung war und ist diese Anpassungsfähigkeit von besonderem Nutzen, da die Luftwandtechnik an die besonderen Anforderungen in der Solarthermie angepasst und in den Receiver integriert werden sollte. *LWT* hatte bereits vor Projektstart in einer internen Voruntersuchung in Abstimmung mit Fraunhofer ISE die von der Anwendung gestellten Anforderungen und Randbedingungen für den Einsatz einer Luftwand zur Wärmeverlustverminderung geprüft und mit potenziellen Zulieferern abgestimmt. Die Machbarkeit wurde in der Voruntersuchung bestätigt.

### 1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde für eine Laufzeit von 36 Monaten angesetzt und begann am 01.09.2018. Der zeitliche Ablauf des Projektes musste angepasst werden. So wurde eine Vermessung des bestehenden Heliostaten bereits früh im Projekt im Jahr 2019 durchgeführt. Nachdem die Fertigungstechniken aus der Automobilindustrie keine Vorteile für die Wirtschaftlichkeit des Stellio aufzeigte wurden die Ziele angepasst und stärker auf die Kommunikation und Vermessung von Materialcharakteristika unter Temperatureinfluss gelegt. Der Aufbau des Receiverstandes, an welchem die Luftwandtechnologie experimentell untersucht wurde verzögerte sich durch einen verlängerten Mittelfreigabe-Prozess und später nochmals durch Lieferengpässe in der Pandemie. Aus diesem Grund wurde eine kostenneutrale Verlängerung um 9 Monate für die Teilprojekte A/B des Projektes bewilligt, in welcher mit vielversprechenden Messergebnissen das Projekt abgeschlossen werden konnte.

Nachfolgendes Gantt-Diagramm (Abbildung 1) zeigt den Zeitplan mit dem Endzeitpunkt für die Teilprojekte C und D, sowie mit der Verlängerung für die Teilprojekte A und B, welche Inhalt dieses Berichts sind.



**Abbildung 1: Gantt-Diagramm zur Planung und Ablauf des Projektvorhabens Helioglow. Eingezeichnet ist der geplante Projektzeitraum, zu welchem die Teilprojekte C und D abgeschlossen wurden, sowie der erweiterte Bereich, in welchem im Rahmen einer kostenneutralen Verlängerung die Teilprojekte A und B abgeschlossen wurden.**

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die Meilensteine aufgeführt. Eine kurze Beschreibung zur zeitlichen Einordnung sowie zur näheren Beschreibung (wo relevant) ist in Form eines Kommentars beigefügt.



**Tabelle 1: Meilensteine in den Teilprojekten A und B, mit Projektmonat, Verantwortlichem, Beschreibung und Alternativpfad. MX.Y bezeichnet den Meilenstein Y im Arbeitspaket X.**

MS	PROJ.- MONAT	VERANT- WORTL.	BESCHREIBUNG	KOMMENTAR
3.2	20	LWT	Luftwand-System für Einsatz am SoBoRec-Prototyp entwickelt	Die Entwicklung des Luftwand-Systems wurde zeitgerecht in H1 2020 abgeschlossen.
3.3	24	ISE	Receiver-Testprototyp entwickelt und konstruiert	Der Meilenstein wurde mit leichter Verspätung aufgrund der Verzögerungen im Zusammenhang mit der Mittelentsperrung im H1 2021 erreicht
4.1	36	ISE	Gesamtsystem-Konzept entwickelt	Der Meilenstein wurde im Zeitraum erreicht
5.1	34	ISE	Heliostatentests abgeschlossen	Die Inhalte wurden im Rahmen einer Zieländerung und Mittelumwidmung angepasst. Die optischen Messungen wurden pünktlich und erfolgreich abgeschlossen.
5.2	34	ISE	Receivertests abgeschlossen	Die Receivertests wurden in zwei Schritten durchgeführt. Die Tests an den SoBo-Materialien wurden pünktlich im Zeitraum abgeschlossen. Für die Untersuchungen der Luftwand am Receiverprototypen wurde aufgrund der Verzögerungen in der Mittelentsperrung und Lieferverzögerungen während der Pandemie eine kostenneutrale Verlängerung beantragt. Die Untersuchungen wurden erfolgreich und mit vielversprechenden Ergebnissen mit dem Ende des Projektes abgeschlossen.

#### 1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

International wurden zu Beginn des Projektes verschiedene Hochtemperatur-Receiverkonzepte entwickelt und erprobt (z.B. in Kombination mit einer solarthermischen Gasturbine). Bekannt waren das Projekt SMILE in Brasilien (BMU), das Projekt Solugas in Spanien (EU/BMU), das Projekt Pegase in Frankreich, das Projekt Wilson Power in den USA (US DOE) und das Projekt der San Diego State University in Kalifornien (US DOE). Zusätzlich bot das damalige israelische Unternehmen Aora eine CSP Anlage mit der 100 kW Turbine Turbec T100 des Herstellers Ansaldo an. Der solare Receiver war wassergekühlt, so dass ein Wasserkreislauf für die Anlage immer noch nötig war. Der solare Receiver war nicht modular, so dass die Turbine definiert war und Aora vom Turbinenlieferanten abhängig war. Eine Speichereinbindung war in den bisherigen Projekten nicht vorgesehen.

Es existierten bereits Receiverkonzepte, die auf dem Transport kleiner, temperaturstabiler Partikel mittels eines Fluids beruhen [1–3]. Üblicherweise dienen die Partikel auch als Absorber für die konzentrierte Solarstrahlung. Zu diesen Partikelreivern gab es auch etliche Patente (z.B. [4, 5]). Der im vorliegenden Projekt zu entwickelnde Receiver unterscheidet sich von diesen Partikelreivern allerdings signifikant, da größere Formelemente bestehend aus den von Kraftblock entwickelten, betonähnlichen Materialien mittels einer Fördervorrichtung in den Fokus der Solarstrahlung transportiert, kontrolliert durch den Fokus bewegt und dort aufgeheizt werden sollten. Ein solches Konzept war und ist nach Wissen der Projektbeteiligten neu.

Zum Zeitpunkt des Projektendes sind neue Entwickler auf dem Markt, welche kleine und modulare Hochtemperaturanwendungen bewerben, wie Heliogen (USA), mit dem deutschen Unternehmensteil

HelioHeat, 24/7 Solar (USA), Vast Solar (Australien) oder der auf Solar Fuels spezialisierte Systemanbieter Synhelion (Schweiz/Deutschland).

Zum Thema Wärmeverlustminderung mittels Luftvorhang existierten theoretische und experimentelle Studien [6]. Windeinflüsse auf die konvektiven Verluste wurden auch an kleineren Receivern im Windkanal untersucht (Ma 1993, Prakash 2009, Lee 2018). Hier ist die direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse auf größere Maßstäbe fraglich. Um eine bessere Übereinstimmung der Ähnlichkeitszahlen mit der realen Anwendung zu bekommen, wurden am DLR Tests bei sehr tiefen Temperaturen im Cryo-Windkanal durchgeführt (Flesch 2016, Siegrist 2018). Aber auch hier wurde der Einfluss einer Luftwand auf die konvektiven Verluste nicht direkt untersucht, sondern nur im Rahmen eines ‚passiven Luftfensters‘, das durch die Anordnung geeigneter Elemente am Eingang des Receivers entsteht. Nach dem Wissen der Autoren existiert bis jetzt jedoch keine kommerzielle Umsetzung. Weiterhin liegen ein US-Patent [7] und ein deutsches Patent [8] vor, die jedoch beide ausgelaufen sind. Die in HelioGLOW vorgesehene Implementierung unterscheidet sich von bisherigen Studien, da die von LWT patentierte, sehr innovative Luftwand-Technologie zum Einsatz kommt, die die Abdeckung besonders großer Flächen ermöglicht. Grundsätzlich sind die Erkenntnisse über die Auswirkungen der extremen Temperaturen auf die eingesetzten Materialien, Apparate (Ventilatoren), sowie über die thermischen Verhaltensweisen in Bezug auf die geführte Strömungstechnik von besonderer Bedeutung.

## 1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Dieses Projekt wurde im Verbund aus sbp sonne gmbh, Kraftblock GmbH (ehem. Nebuma GmbH) LWT GmbH und Fraunhofer ISE durchgeführt.

**Teilprojekt A - Fraunhofer ISE** koordinierte das Projekt und begleitete die Systemintegration und Gesamtsystemsimulation. Zudem entwickelte Fraunhofer ISE das theoretische Receiver/Speicher-Konzept und unterstützte Kraftblock bei der Entwicklung und Umsetzung von Solid-Body-Prototypen. Fraunhofer ISE unterstützte LWT bei der Entwicklung der thermischen Verlustreduzierung durch Simulationen und Austausch. Zudem führte Fraunhofer ISE federführend die experimentellen Arbeiten durch und arbeitet in diesem Zusammenhang eng mit allen Partnern zusammen. Die Tests des Receivermaterials wurden in Freiburg und im Rahmen eines geförderten Forschungsbesuchs in Spanien bei IMDEA durchgeführt. In Freiburg wurde der Receiverprototyp zur experimentellen Untersuchung der Luftwand durchgeführt. Fraunhofer ISE unterstützte auch sbp bei der Vermessung des Stellio-Heliostaten und Reflektorproben. Die Details sind im vorliegenden Abschlussbericht in Kapitel 2 ausgeführt.

**Teilprojekt B - LWT** entwickelte die patentierte Luftwandtechnologie weiter und passte sie an die Anforderungen der Solarturmanwendung an, um die Wärmeverluste im Receiver zu reduzieren. Fertigungsmaterial, Platzierung, Dimensionierung und Auslegung wurden intensiv untersucht. Hierfür wurden einerseits Messungen in der Fertigungshalle vorgenommen und dann die speziell für die fortlaufenden Untersuchungen angepasst Luftwand gefertigt und am Teststand des Fraunhofer ISE installiert und in Betrieb genommen. Die Details sind im vorliegenden Abschlussbericht in Kapitel 2 ausgeführt.

**Teilprojekt C - KRAFTBLOCK** entwickelte das Material und den Fertigungsprozess für den Wärmeträger des Konzepts aus kombiniertem Receiver und Speicher. Aufbauend auf bereits existierenden Speichermaterialien und Formgebungsverfahren wurde das Material in seinen Eigenschaften angepasst, hinsichtlich Speicherkapazität, Pressverfahren und Dichte. Die Arbeiten sind im separaten Schlussbericht (Teilprojekt C) beschrieben.

**Teilprojekt D - sbp** untersuchte mögliche Verbesserung des Stellio-Heliostaten, insbesondere wurden Fertigungsverfahren aus der Automobiltechnik untersucht. Darüber hinaus wurden Kommunikationstechniken untersucht und verbessert und die optische Genauigkeit und mögliche Einflussfaktoren gemessen und analysiert. Die Arbeiten sind im separaten Schlussbericht (Teilprojekt D) beschrieben.

Mit **Externen** Einrichtungen wurde im Rahmen des Transnational Access-Programms des SFERA-III-Projektes zusammengearbeitet. Das Fraunhofer ISE konnte mit der Zufinanzierung über das SFERA-III-Programm in einem zweiwöchigen Aufenthalt bei IMDEA (Instituto Madrileño de Estudios Avanzados) Energy in Madrid erweiterte Materialuntersuchungen am Solid-Body-Material unter idealen Bedingungen durchführen und die Untersuchungen am Dish-Konzentrator in Freiburg durch zusätzliche Experimente mit einem Sonnensimulator erweitern. Die Ergebnisse dieses Aufenthalts sind weiter in der Ergebnisbeschreibung zu AP5 im folgenden Kapitel beschrieben.

## 2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

### 2.1. Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

Die durch die Zuwendung der Fördermittel ermöglichte Forschungsarbeit und die erzielten Ergebnisse sind nachfolgend für die unterschiedlichen Arbeitspakete eingehend beschrieben.

#### 2.1.1. AP 1 Projektmanagement und Koordination

Die Gesamtprojektkoordination wurde durch das Fraunhofer ISE ausgeführt, unterstützt durch die Teilprojektleitungen durch die drei Partner LWT GmbH, Kraftblock GmbH und sbp sonne gmbh.

Die Projektleitung umfasste die Koordination, Prüfung und Einreichung der Zwischenberichte, die Organisation der Projektberichte und die Abstimmungen im Konsortium.

Im Rahmen der Projektdurchführungen waren einige Änderungen notwendig, welche mit dem Projektträger abgestimmt und koordiniert wurden. Dies betraf einerseits eine Mittelumwidmung und Anpassung der Projektziele auf Basis der in AP2 erarbeiteten Zwischenergebnisse sowie eine Projektverlängerung der aufgrund von Verzögerungen in der Mittelentsperrung, sowie Einflüssen aus Lieferengpässen und der Pandemie. Letztendlich konnte das Projekt erfolgreich abgeschlossen werden.

#### 2.1.2. AP 2 Heliostatenentwicklung

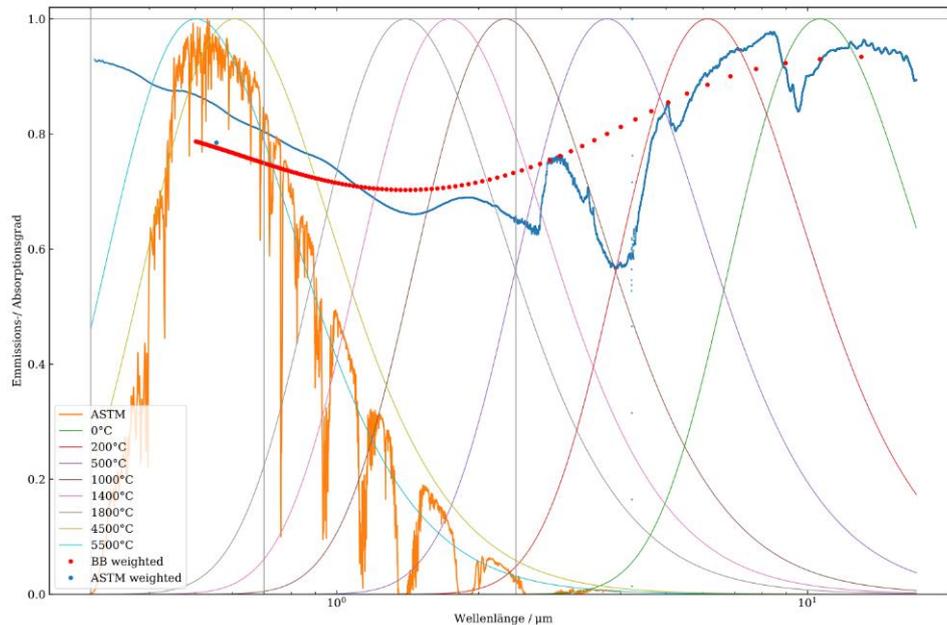
Die Arbeiten in AP2 wurden im Wesentlichen durch sbp sonne erarbeitet und im Teilschlussbericht B/C berichtet. Fraunhofer ISE beteiligte sich in Diskussionen und bildete die Verbindung zur wirtschaftlichen Bewertung, welche dann in AP4 weiterverfolgt wurde.

#### 2.1.3. AP 3 Receiverentwicklung

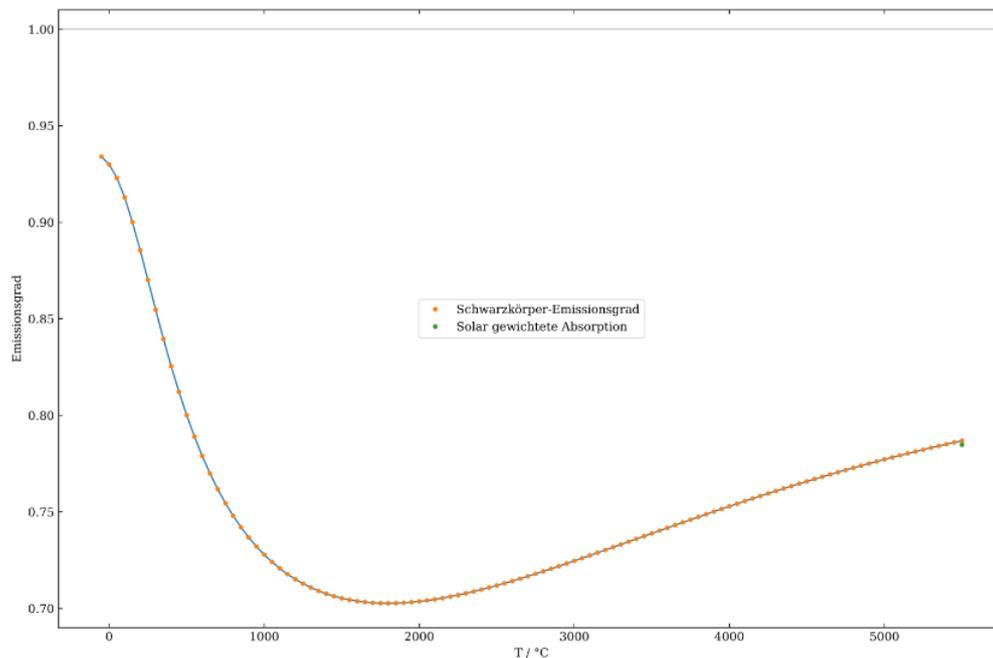
##### 2.1.3.1. AP 3.1 Materialentwicklung SoBoRec

Fraunhofer ISE begleitete die Entwicklungen des Materials bei Kraftblock hinsichtlich möglicher Formfaktoren (Formkörperausbildung, Oberflächenstruktur, Stärke, Materialeigenschaften) und hinsichtlich der notwendigen Parameter wie Wärmekapazität, Leifähigkeit und Belastung. Begleitend zur Materialentwicklung bei Kraftblock wurden am Fraunhofer ISE Tests der mechanischen, optischen und thermischen der hergestellten Proben durchgeführt.

Bei der optischen Vermessung lag besonderes Augenmerk auf dem solaren Absorptionsgrad und dem thermischen Emissionsgrad bei unterschiedlichen Temperaturen. Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen Ergebnisse der optischen Vermessung für eine der erhaltenen Proben. Hier beträgt der solare Absorptionsgrad 0,79, und der thermische Emissionsgrad im relevanten Temperaturbereich 0,71, was auf leichte Strahlungsselektivität des Materials hindeutet. Diese ist für die Anwendung als Strahlungsempfänger sehr günstig, und eine weitere Optimierung des Materials in dieser Richtung ist denkbar. Andererseits ist aufgrund der vergleichsweise geringen Absorption eine Färbung der Oberfläche zu empfehlen, was wiederum Einfluss auf die Emissionseigenschaft aufweisen kann.



**Abbildung 2:** VIS- und IR-Absorptionsspektrum der SoBo-Keramik (blau). Daraus berechnet wurden der Solare Absorptionsgrad (0.79) und der temperaturabhängige thermische Emissionsgrad (rot).



**Abbildung 3:** Thermischer Emissionsgrad SoBo-Keramik in Abhängigkeit der Materialtemperatur. Das Minimum des Emissionsgrades im Bereich um  $1500^\circ\text{C}$  ist vorteilhaft für die geplante Anwendung, weil dadurch Strahlungsverluste verringert werden und leicht selektive Absorbereigenschaften entstehen.

Die Tests und Untersuchungen der thermischen Eigenschaften der Proben sind in AP 5.2 detailliert beschrieben. Für die finalen Proben wurde eine maximale Anwendungstemperatur von  $1300 \pm 100^\circ\text{C}$  ermittelt, was einer Bestrahlungsstärke von  $500 \text{ kW/m}^2$  entspricht. In der mechanischen Festigkeit wurde für den Anwendungsfall noch verbesserungspotential identifiziert.

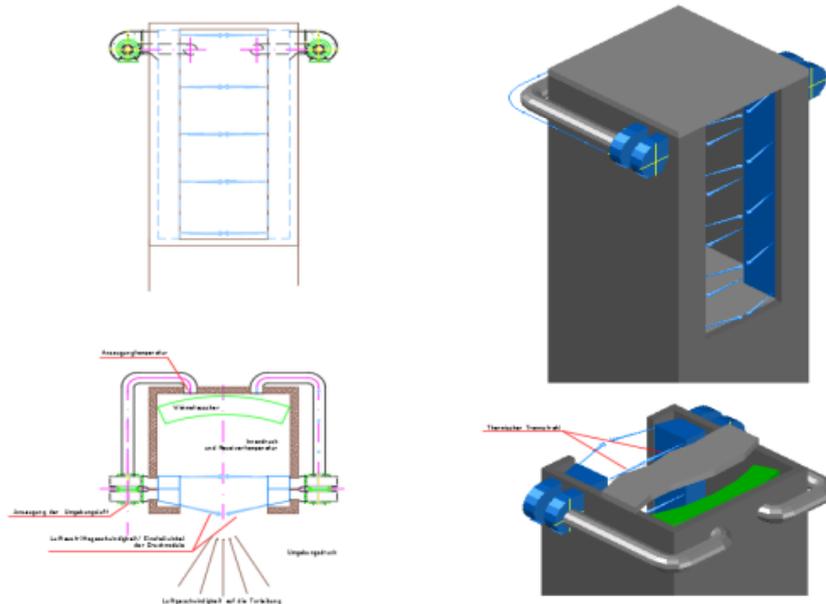


### 2.1.3.2. AP 3.2 Luftwand

#### LWT

#### Konzept der Luftwandanlage

Das Startkonzept für den Verlauf des Projektes Auslegung und Realisierung der Luftwandanlage am Cavity-Receiver wurde zunächst zeichnerisch gem. Abbildung 10 entworfen.



**Abbildung 4: exemplarische Luftwandzeichnung für Cavity-Receiver mit horizontalem Luftstrom**

Um erste Kenntnisse und Rückschlüsse auf die Experimentelle-Durchführung ziehen zu können, wurde eine CFD-Simulation geplant und durchgeführt. Im Abschnitt AP 3.2 - ISE werden die Simulationsergebnisse ausführlich beschrieben.

Die Ausarbeitung der experimentellen Untersuchung wurde konzeptuell in enger Zusammenarbeit zwischen LWT und Fraunhofer ISE vorgeplant: Zur Entwicklung der Luftwand am Receiverturm wurde ein Konzept für die experimentelle Untersuchung zu dessen Wirkung entwickelt. Dabei wurde unterschieden in welcher Form dieser Versuchsstand aufgebaut werden kann. Um ein möglichst genaues adäquates Modell zu realisieren, einigte man sich zunächst auf einen Schiffcontainer, welcher in der Öffnung eines Cavity-Receiver von etwa 1-5 m nahekommt.

Für das Experimentierkonzept wurde eine erste Grobauslegung der Luftwanddüsen und der erforderlichen Gebläse Peripherie von LWT durchgeführt, wie in Abbildung 5 dargestellt.

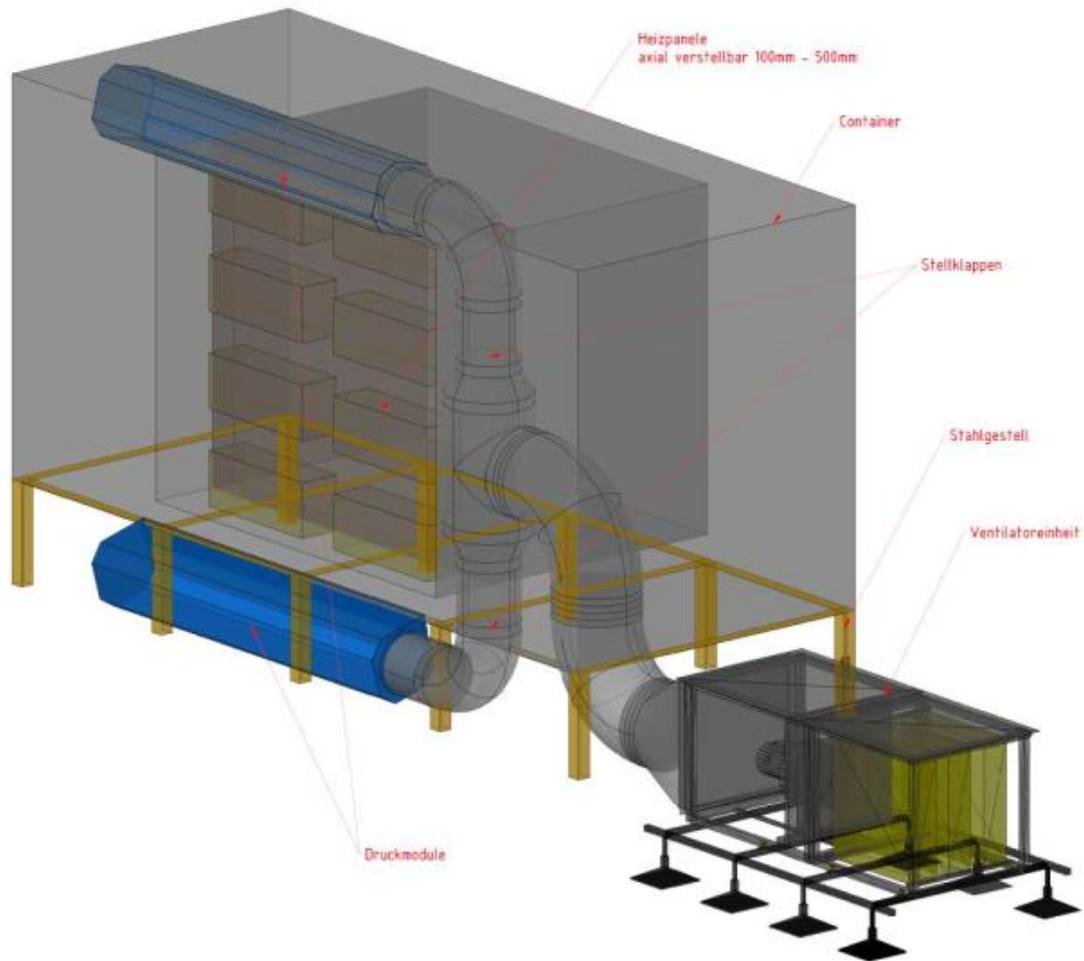


Abbildung 5: Konzept für Gebläse Peripherie

## Bereitstellung von Messdaten zur Validierung der Strömungssimulation

Zur Validierung des Simulationsmodells der Düse wurde ein experimenteller Aufbau bei LWT realisiert. In der folgenden Abbildung ist der Teststand mit Eckdaten und Querschnittsskizze abgebildet.

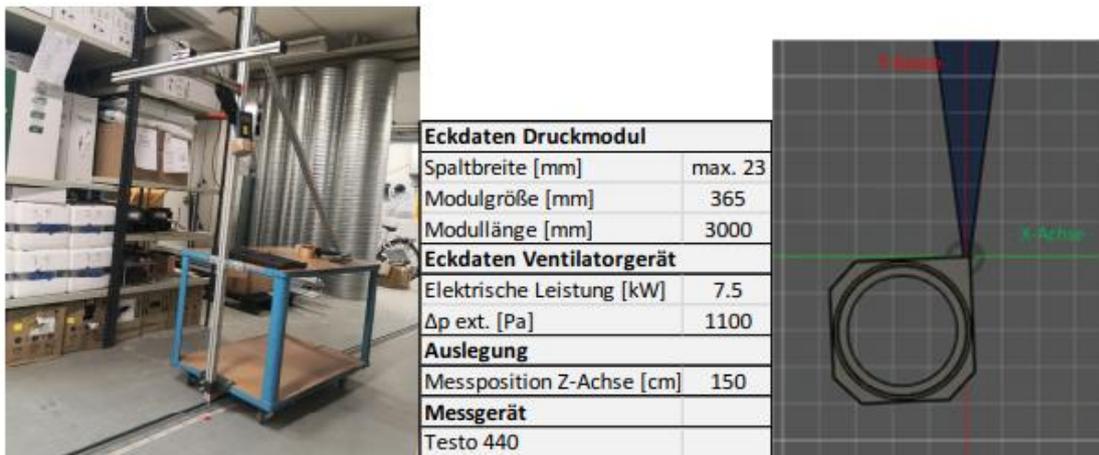


Abbildung 6: Teststand Luftwand bei LWT mit Eckdaten und Querschnittsskizze

Die Messergebnisse in Abhängigkeit des Messabstandes in x und y Richtung können folgender Grafik entnommen werden.

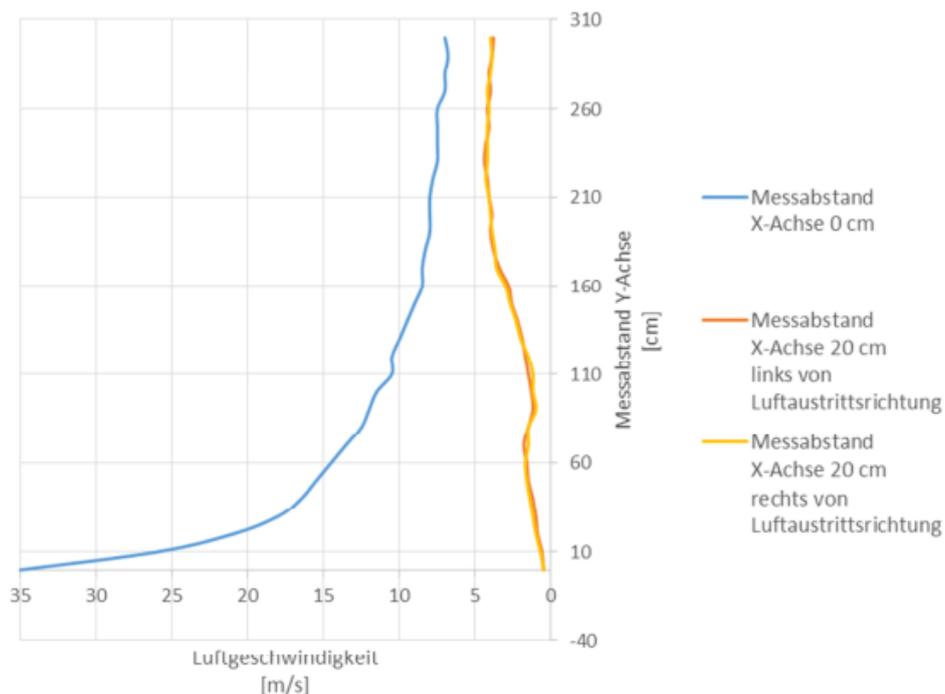


Abbildung 7 Messergebnisse am Luftwandteststand bei LWT

Die erste durchgeführte Versuchsreihe zeigt ab 0 cm Abstand zur X-Achse einen regressiven Verlauf der Luftgeschwindigkeit zum Düsenaustrittsspalt. Der Luftstrahl nimmt stark laminar zu den ersten 30 cm ab. In dieser Messtrecke 0 – 30 cm nimmt die Luftgeschwindigkeit etwa um die Hälfte der Intensität ab. Im Streckenverlauf 30 – 190 cm nimmt die Luftgeschwindigkeit fortlaufend ab. Bei einer Strecke  $\geq 190$  cm ist

eine verhältnismäßige konstante Luftgeschwindigkeit zu verzeichnen. Im zweiten Versuchsverlauf wurden zusätzlich Geschwindigkeitsprofile bei einem Abstand von 20 cm links sowie rechts vom Düsenaustrittsspalt gemessen. Beide Verläufe sind im Geschwindigkeitsprofil mit geringfügigen Toleranzen gleichzusetzen. Da sich im gesamten Verlauf der Geschwindigkeitsmessung ein annähernd laminares Profil einstellt, ist eine laminare fallende Luftaustrittsströmung zu vermessen.

#### **- Auslegung der Druckmodule und Ventilatoren**

Zur Auslegung der Luftwandkomponenten, wurden zwei Konzepte seitens der LWT GmbH entwickelt. Im ersten Konzept, wird ein Druckmodul oben am Cavity-Receiver angebracht. Das Fraunhofer ISE führte, ausgehend von der LWT GmbH vorgestellten Konzeptdarstellung zur Minderung der kollektiven Wärmeverluste am Turmreceiver, umfangreiche CFD-Simulationsversuche durch. Dazu wurden die Daten von der Ventilatorleistung, Dimensionierung der Druckmodule sowie deren Anordnung in der Receiver Peripherie in die CFD-Simulation eingepflegt. Diese Simulationen wurden mit verschiedenen Anstellwinkeln vom Düsenaustrittsspalt zwischen 0° bis -20° zusätzlich simuliert.

Ein zweites Konzept wurde ergänzend vorgestellt. Dabei handelte es sich um die Anbringung von zwei Druckmodulen. Dabei wurde, wie im Konzept 1 mit einem oben liegenden zusätzlich ein zweites Druckmodul an der Unterlippe am Cavity Receiver angebracht.

#### **Zur Auslegung Druckmodule und Ventilator:**

Im optimalen Betriebspunkt erzeugt der gewählte Ventilator einen Volumenstrom von 13.000 m<sup>3</sup>/h. Am Düsenpalt ergibt sich die Ausblasgeschwindigkeit von:

$$\text{Volumenstrom} / 2 \times \text{Fläche des Düsenpalt} = \text{Ausblasgeschwindigkeit}$$

Der Ventilator war ausgewählt für einen Volumenstrom von 12.000 m<sup>3</sup>/h wodurch sie eine Ausströmgeschwindigkeit von rund 30,8 m/s Ergab. Das bedeutete, dass für die Tests bis zu 30 m/s Ausblasgeschwindigkeit zur Verfügung standen.

Durch Variation dieser Leistungseinstellung und den Verstellbaren Neigungswinkel der Druckmodule wurde ermöglicht, die Strömungsverhältnisse optimal anzupassen.

#### **- Planung und Erstellung von Konstruktionszeichnungen für die Luftwand-Anlage**

##### **Aufbau/technische Daten der Luftwandanlage**

Der Innenraum des Receiverteststandes wurde nach Auslegung des Fraunhofer ISE letztendlich zu den Abmaßen von 2800 × 2800 × 2000 mm bei einer Wandstärke von 100 mm ausgelegt. Die beiden Druckmodule mit den Abmaßen 450 × 3000 × 3 mm wurden aus hitzebeständigem wärmefestem Stahl 1.4841, der eine Temperaturbeständigkeit von ca. 1100 °C erlaubt, gefertigt. Die Wickelfalzrohr wurden durch eine Halterung in Position gehalten und waren mit dem Übergangstück am Ventilator verbunden. Der Ventilator hatte zum Receiver einen Sicherheitsabstand von 1 Meter, um eine ausreichende Kühlung sicherzustellen.

Zum Versuchsaufbau wurden Zeichnungen erstellt, die zur Fertigung und Montage vom endgültigen Versuchsaufbau herangezogen wurden.

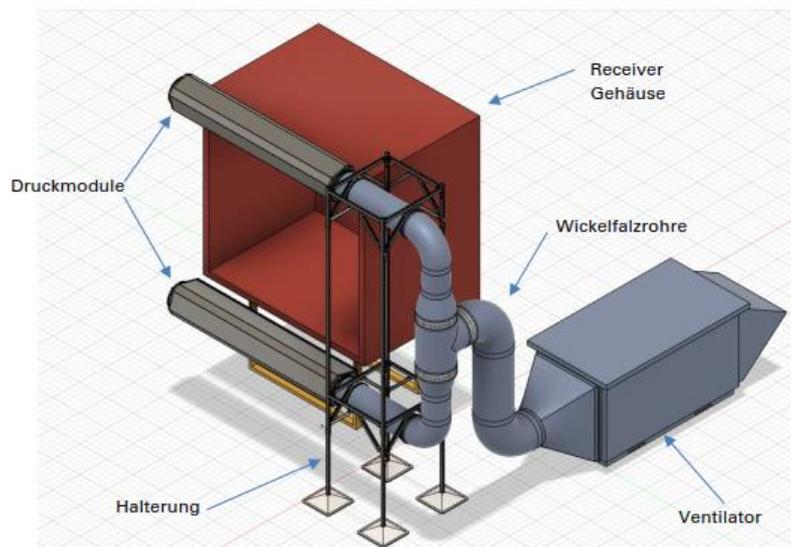


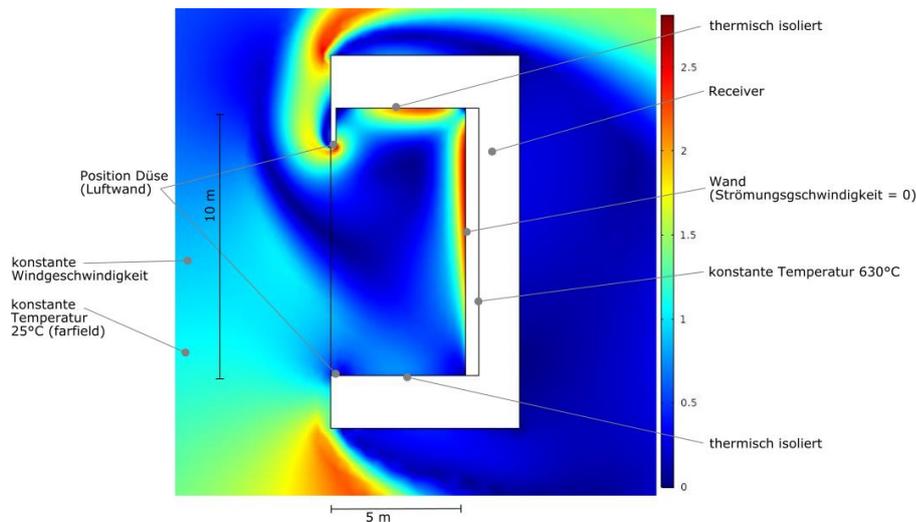
Abbildung 7: CAD-Modell des Aufbaus zum Test der Luftwand mit Receiver-Gehäuse (rot), oberem und unterem Luftwand-Modul (dunkelgrau) und Gebläse (hellgrau).

### **Fraunhofer ISE**

In enger Zusammenarbeit mit der LWT GmbH wurde am Fraunhofer ISE die Planung des Strahlungsempfänger-Teststandes mit Luftwand durchgeführt. Dazu wurden anfangs zum einen Fluidynamik-Simulationen durchgeführt, um eine vielversprechende Teststandkonfiguration zu identifizieren, zum anderen wurde der Aufbau hinsichtlich seiner thermischen, elektrischen und mechanischen Eigenschaften modelliert und ausgelegt.

### **CFD Simulation**

Die Simulation des Strömungs- und Temperaturfeldes innerhalb und in der Umgebung des Receivers wurde mit der Software Comsol Multiphysics durchgeführt. Dabei wurden die Gleichungen zur Beschreibung der Strömung (Navier-Stokes-Gleichungen) mit der Energiegleichung gekoppelt, um die Effekte der natürlichen Konvektion abzubilden und die thermischen Verluste zu ermitteln. Der simulierte  $50 \text{ MW}_{\text{th}}$  Cavity Receiver entspricht Abbildung 8 und wurde dabei als 2-dimensionale Geometrie abgebildet, um den Rechenaufwand gering zu halten. Dazu wird ein vertikaler Schnitt durch den Receiver gelegt. Die wesentlichen Randbedingungen und eine vereinfachte Darstellung der Geometrie sind ebenfalls in Abbildung 8 dargestellt.



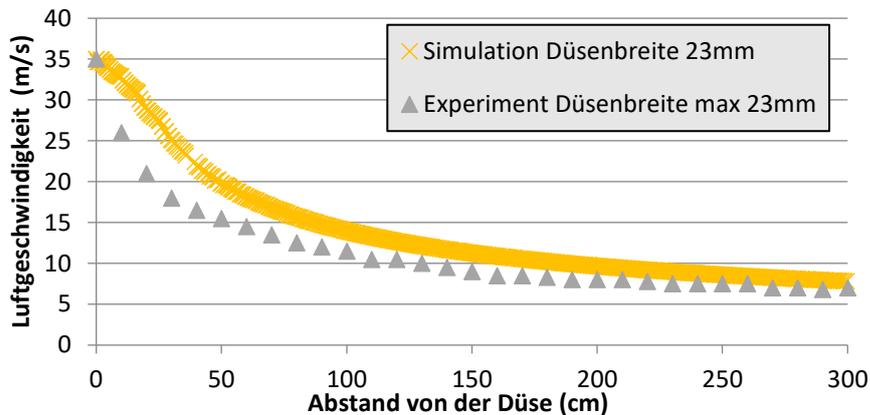
**Abbildung 8: Wesentliche Randbedingungen des Strömungs- und Temperaturfeldes an einem Receiver. Farblich dargestellt ein Beispielströmungsfeld mit Windlast (1m/s) und ohne Luftwand. Farbskala in m/s.**

Für einen Cavity-Receiver mit 10 m x 10 m x 5 m wurden die Strömungs- und Temperaturfelder innerhalb der Cavity und in der Umgebung des Receivers abgebildet. Dafür wurde das Modell basierend auf dem k-epsilon Turbulenzmodell (instationär gelöst) erstellt und die Effekte der natürlichen Konvektion analysiert sowie die thermischen Verluste ermittelt. Eine Simulationsstudie dauerte ca. 6-24 h und die Windgeschwindigkeit, Position der Strömungsdüse, Düsen-Ausblasgeschwindigkeit (bis zu 35 m/s), Ausrichtung der Düse sowie die Länge der oberen Lippe wurden dabei variiert. Das Simulationsmodell des Cavity-Receivers mit Luftwand wurde mit einem vereinfachten Modell (ohne Temperaturfeldberechnung) hinsichtlich der Luftgeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand zur Düse experimentell verifiziert. Dazu wurde ein experimenteller Aufbau bei LWT realisiert (siehe oben).

Das Simulationsmodell des Receivers wurde auf eine Düsenströmung (ohne Temperaturfeldberechnung, Temperatur konstant 20°C) reduziert. Die Ergebnisse des Experiments und der Simulation sind hier in der Hauptströmung des Jets dargestellt (Abbildung 9).

Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung der Simulation und der Messung. In der Kernströmung wird mit der Simulation die Geschwindigkeit leicht überschätzt. Im Bereich außerhalb der Kernströmung sind die Abweichungen leicht höher (maximal 30-50%), und die Geschwindigkeit wird abschnittsweise unterschätzt. Trotzdem wird aus den Ergebnissen geschlossen, dass die Simulationen ausreichend genau sind, um qualitative Aussagen zu treffen.

Mit dem Simulationsmodell der Cavity wurden Fälle mit und ohne Luftwand sowie Windeinfluss simuliert. Für die Cavity mit 35 m/s Düsendeschwindigkeit und Luftwand von oben konnte gezeigt werden, dass Windgeschwindigkeiten von 8 m/s noch abgeschirmt werden können. Dieses Resultat kann auch genutzt werden, um einen ersten Anhaltspunkt für den messtechnisch relevanten Bereich zu erhalten. Jedoch zeigten einige Simulationen, in denen die Luft nur aus einer einzigen Düse von oben ausgeblasen wurde, in bestimmten Szenarien höhere Wärmeverluste als die Fälle ohne Luftwand. Um die Wärmeverluste abzuschwächen, wurden daher weitere Simulationen mit einer zusätzlichen Düse im unteren Bereich der Cavity durchgeführt. Über längere Zeiträume kann die Cavity damit vom Windeinfluss abgeschottet werden, jedoch kommt es teilweise auch zu Umlenkungen und Erhöhung der thermischen Verluste in der Cavity. Diese Effekte und deren Vermeidung sollen in zukünftigen Projekten weiter untersucht werden.



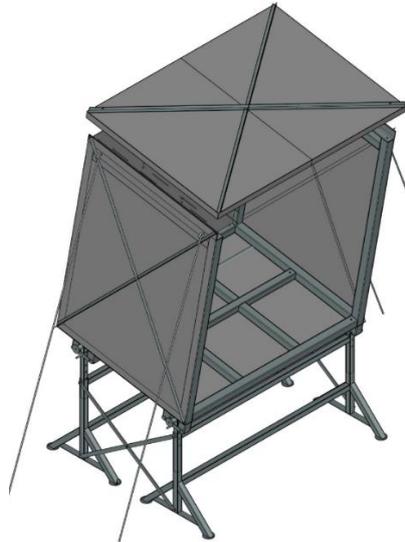
**Abbildung 9: Verlauf der Luftgeschwindigkeit in der Kernströmung für die CFD Simulation und das Experiment bei LWT.**

Die natürliche Konvektion auch unter Windeinfluss konnte mit dem Simulationsmodell gut abgebildet und die Netzunabhängigkeit bestätigt werden. Bei der gekoppelten Simulation des Strömungsfeldes mit natürlicher Konvektion, Windeinfluss und Luftwand traten jedoch Schwierigkeiten auf. Die Simulationszeit verlängerte sich auf mehrere Tage und die Konvergenz der Simulation wurde bei bestimmten Parametern nicht erreicht. Die Simulationen zeigten, dass sich bei einer Bandbreite von Winkeln, Düsendurchmesser und Düsenposition eine instationäre Strömung entwickelt, die die natürliche Konvektion unterbinden kann und im Inneren der Cavity eine deutliche Temperaturerhöhung erfolgt. Gleichzeitig wird in den Simulationen regelmäßig eine pulsierende Gegenströmung induziert, die eine erhöhte Wärmeabfuhr mit sich bringt. Dieses instationäre Verhalten führt dazu, dass die Modelle nicht immer konvergieren.

### Entwurf und Bau des Receiver-Teststands am Versuchsgelände in Freiburg

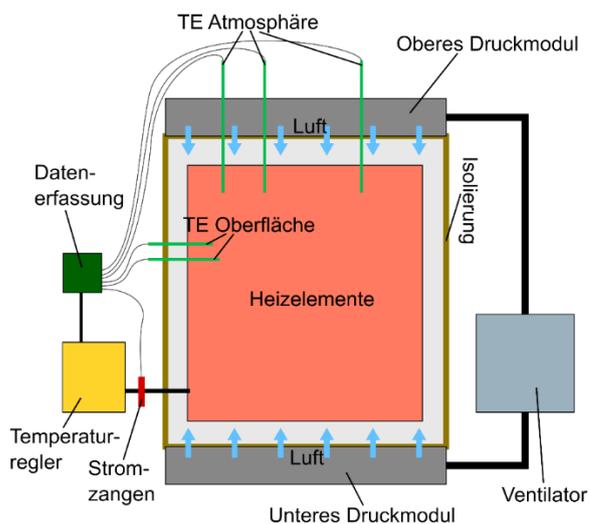
Basierend auf den Ergebnissen der CFD Simulationen, wurde in Zusammenarbeit mit der LWT GmbH und einem Stahlbauer in Freiburg im Laufe der Jahre 2020 und 2021 ein Messaufbau ausgelegt und konstruiert (Abbildung 10), der geeignet war, die energetischen Einsparungen am Solarturm-Receiver durch den Betrieb einer Luftwand zu quantifizieren. Ein Aufbau mit der folgenden Charakteristik wurde schlussendlich für realisierbar im Rahmen des Projekts befunden und die notwendigen Komponenten bestellt / in Auftrag gegeben:

Für die Auslegung des Luftwand-Testaufbaus in technischer und elektrischer Hinsicht dienten als Vorlage u.a. die Arbeiten von Kraabel [8] zu Untersuchungen der konvektiven Wärmeverluste an einer Kavität. In Abbildung 11 ist eine Skizze des Aufbaus dargestellt. Der Testaufbau hat eine Öffnung von 286x300 cm<sup>2</sup> und eine Tiefe von 200 cm. Ein Paneel aus 21 flachen elektrischen Heizelementen mit einer maximalen Heizleistung von je 12 kW wurde verwendet, um die heiße Absorberfläche an der inneren Rückseite des Aufbaus zu simulieren. Mit der vorhandenen Stromversorgung und der verwendeten Zweipunkt-Temperaturreglung konnte eine Oberflächentemperatur von bis zu 650 °C erreicht werden.



**Abbildung 10: Konstruktionszeichnung des aufgeständerten Stahl-Gehäuses zur Aufnahme von 21 Heizelementen und zwei Luftwand-Druckmodulen (Vordere Öffnung 286x300 cm<sup>2</sup>).**

Die fünf Wände des Stahlwürfels sind mit Calciumsilikatfasern und Steinwolle mit einer Stärke von 15 cm (Rückwand) bzw. 10 cm sonst isoliert. An der Oberfläche jedes Heizelements sind Typ-K-Thermoelemente angebracht, deren Signal als Sollwert für die Temperaturregelung von sieben unabhängigen Heizzonen verwendet wird (jeweils drei Heizelemente bilden eine Zone). Darüber hinaus sind 24 Thermoelemente im Innenraum angeordnet, um dort die Lufttemperatur zu messen. Der Heizstrom jeder der sieben thermischen Zonen wurde kontinuierlich mit Stromzangen gemessen, was eine kontinuierliche Messung der elektrischen Heizleistung ermöglicht. Ein Schalenanemometer an der Spitze des Aufbaus misst die Umgebungs-Windgeschwindigkeit. Der gesamte Aufbau kann nach vorne gekippt werden, um einen geneigten Cavity-Receiver zu simulieren, der eine Stagnationszone an der Oberseite besitzt. Außerdem kann die Rückwand nach vorne bewegt werden, um die Wirkung der Luftwand auf einen externen Strahlungsempfänger zu testen.



**Abbildung 11: Skizze aufgebauten Außenteststandes am Fraunhofer ISE zum Test einer Luftwand. Mit dem Temperaturregler kann eine Oberflächentemperatur von bis zu 650 °C für die elektrischen Heizelemente an der Rückwand des Kubus eingestellt werden. Der installierte Ventilator erzeugt einen Luftstrom, der durch zwei Druckmodule (Düsen) an der oberen und unteren Vorderkante des Würfels ausgeblasen wird. Dadurch entsteht eine Luftwand, die als transparente konvektive Abschirmung für die Öffnung des Strahlungsempfängers dient.**

Die Konstruktion des Gebläses und der Luftwand ermöglichte eine variable Austrittsgeschwindigkeit der Luft von bis zu 30 m/s. Der Ausblaswinkel der Luftdüsen konnte manuell verändert werden, um die Strömungsbedingungen zu ermitteln, die die zur besten konvektiven Abschottung führen. Mit einer Nebelmaschine wurde der Luftstrom visualisiert.



**Abbildung 12:** Der fertig gestellte Messaufbau zum Test einer Luftwand an solarthermischen Strahlungsempfängern am Außentestgelände des Fraunhofer ISE. Auf dem Bild sind ein 500 kW Stromerzeuger (links, rot), zentral der Messaufbau mit Heizelementen und Luftwand-Düsen, rechts daneben der Druckluft-Ventilator und ganz rechts ein Container (blau) für Regelung und Messtechnik zu sehen.

Die Fertigstellung des Aufbaus zusammen mit der Notwendigen Messtechnik erfolgte im April 2022. Im Abschnitt 5.2 werden die Experimente und Ergebnisse beschrieben, die mit dem Luftwand-Receiver-Prototypen gewonnen wurden.

### 2.1.3.3. AP 3.3 Receiverkonzept SoBoRec

Basierend auf dem grundlegenden Gesamtkonzept (Abbildung 13) wurde ein Integrations- und Receiverkonzept entwickelt. Besondere Herausforderung war die Definition der richtigen Formgebung zwischen optischem Optimum und Fertigung, Transportmöglichkeiten, Exposition sowie Eindringtiefe und Wärmeauskopplung.

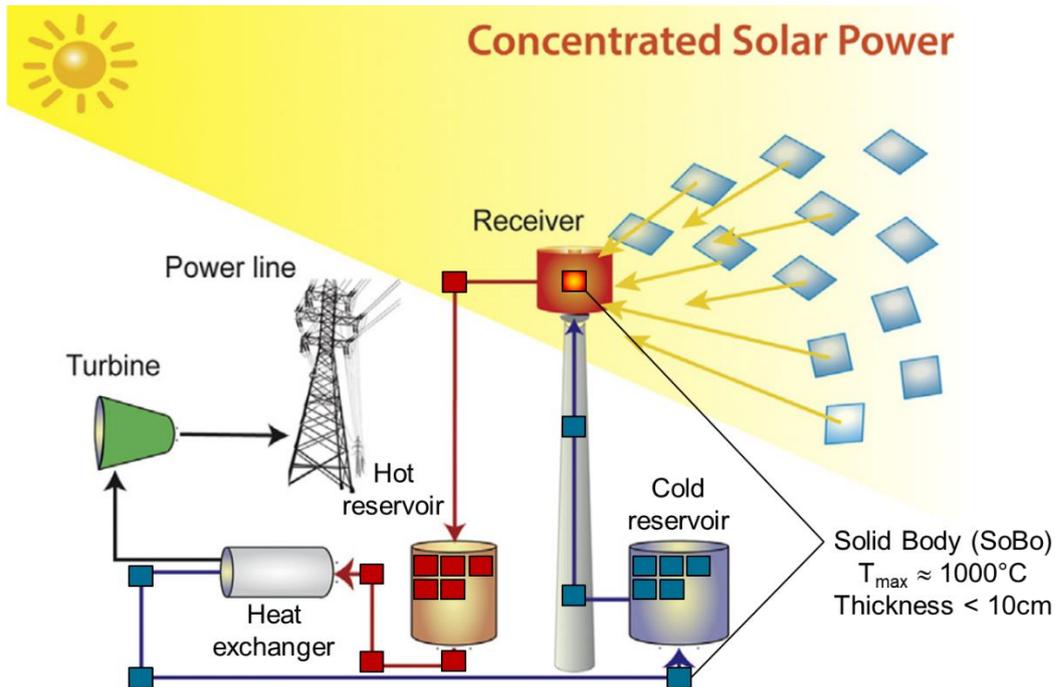


Abbildung 13: Übersicht Gesamtkonzept – Prinzipskizze des SoBo-Kraftwerkskonzepts.

Die Vielzahl an möglichen Lösungswegen ist exemplarisch im morphologischen Kasten (Abbildung 14) aufgeführt, mit einer möglichen Lösung für das Gesamtkonzept. Auf dieser Basis wurden unterschiedliche Gesamtlösungsansätze untersucht.

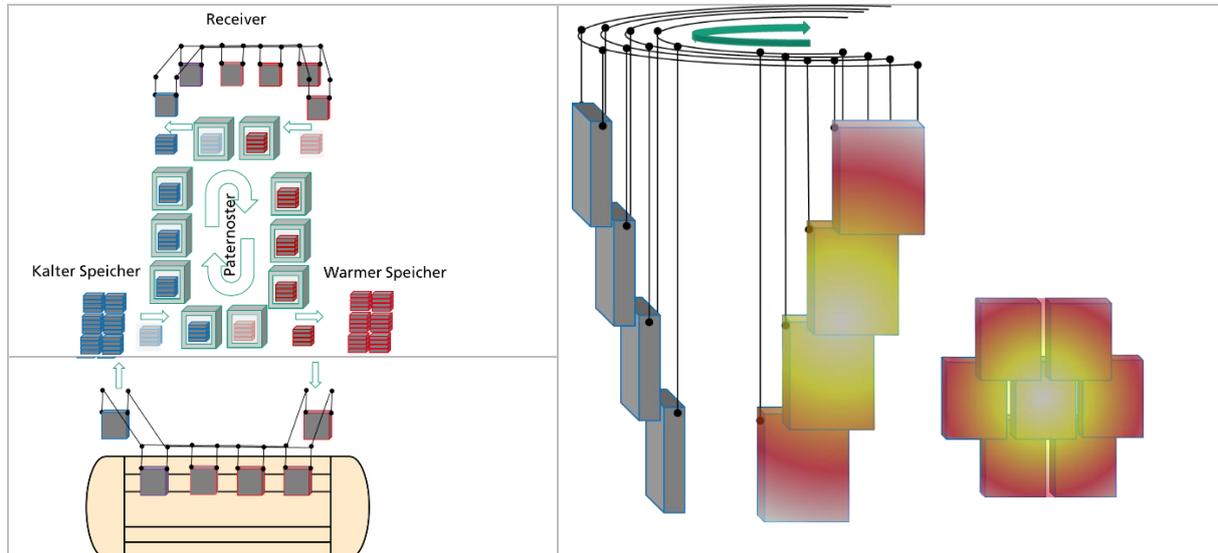
## Morphologischer Kasten

Merkmale	Wahl A	Wahl B	Wahl C	Wahl D	Wahl E	Wahl F
<b>Receivermerkmale</b>						
Receivertyp	Hohlraum	Extern	Beam-Down			
SoBo-Geometrie	Platte	Zylinder	Hohlzylinder	Sechskantprofil		
SoBo-Oberfläche	Glatt	Porös	Zackern/Wellen	Beschichtung		
<b>Transportmerkmale (Stetigförderer)</b>						
Horizontal-/Diagonalförderer	Förderband	Kettenförderer	Rollenbahn	Rutsche (Schiefe Ebene)	Kreisförderer (Schlachthof)	Umlaufseilbahn (Ski-Seilbahn)
Vertikalförderer	Kein	Gurtheber (Gabelstapler)	Hubtisch	Kran	Patenoster	
SoBo-Befestigung am Förderer	Haken	Zangen (Greifer)	Magnetisch	Keine (Reibschluss)	Unterdruck	
Transportrichtung durch Strahlung	Vertikal	Horizontal	Diagonal			
SoBo-Rotation	Keine	Einmalig wenden (180°)	Dauhaft			
SoBo-Transport zum Speicher / WÜ	Gleich wie durch Strahlung	In Transportbox				
<b>Kraftwerksmerkmale</b>						
Wärmeübertrager (WÜ)	Strahlungs-WÜ	Partikel-WÜ + Wirbelschicht	Gas-WÜ (Regenerator)	Flüssig-WÜ (Metall)		
Druckdifferenz zu Kraftwerkskreislauf	Separate Systeme (Wärmeübergang durch Wand)	Fenster vor Receiver (Druckbehalteter Receiver)	Druckschleuse			
Kraftwerkskreislauf	Gasturbine offen/geschl. 900°C < T < 1400°C	Mikrogasturbine 700°C < T < 1000°C	Dampfkreislauf T < 600°C	Überkrit. Dampfkreislauf T < 700°C	Überkrit. CO2 Kreislauf T > 700°C	Gas + Dampfkreislauf 900°C < T < 1400°C

Abbildung 14: Morphologischer Kasten als Grundlage für die Entwicklung des Receiver-, Speicher und Wärmetauscherkonzepts für die Solid Body Integration im Solarturmkraftwerk.

Hierbei zeigte sich, dass die Wärmeauskopplung eine spezielle Herausforderung darstellt. Diese wurde aus diesem Grund in Absprache mit dem Fördermittelgeber intensiver untersucht und im Rahmen einer

Masterarbeit und enger wissenschaftlicher Betreuung eingehend analysiert. Die Ergebnisse hierzu werden nachfolgend zusammengefasst. Die Ausarbeitung des SoBo-Transportsystems wurde im Gegenzug nur theoretisch erarbeitet. Der Vorschlag zeigt ein Paternostersystem für die vertikale Förderung in SoBo-Speicherpaketen, welche durch eine Fördereinheit in einer Rotationsbewegung durch den Receiver und die hochkonzentrierte Solarstrahlung transportiert werden (Abbildung 15)



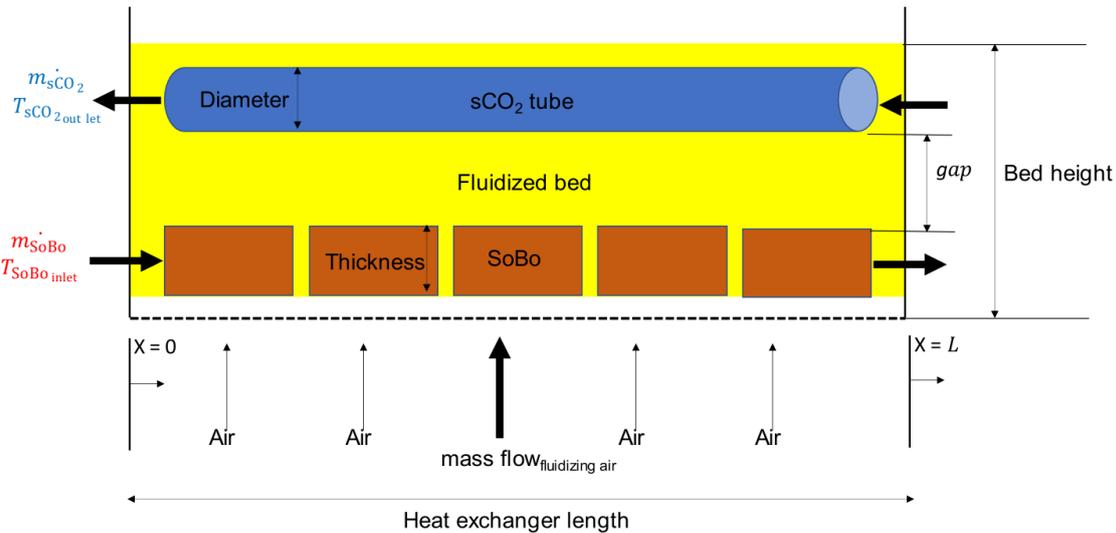
**Abbildung 15: Prinzipskizze des Transportkonzepts als Paternoster (links) für Vertikaltransport und Aufhängung für Wärmetauscher- bzw. SoBo-Transport unter konzentrierter Strahlung (rechts)**

### Sobo-sCO<sub>2</sub>-Wärmetauscher

Um ein Verständnis für geeignete Betriebsparameter die Dimensionierung des Wärmetauschers zur Extraktion der Energie aus dem SoBo-Material zu bekommen, wurde im Rahmen einer Masterarbeit ein Wärmetauscher-Modell in Modelica/Dymola erstellt. Die Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben.

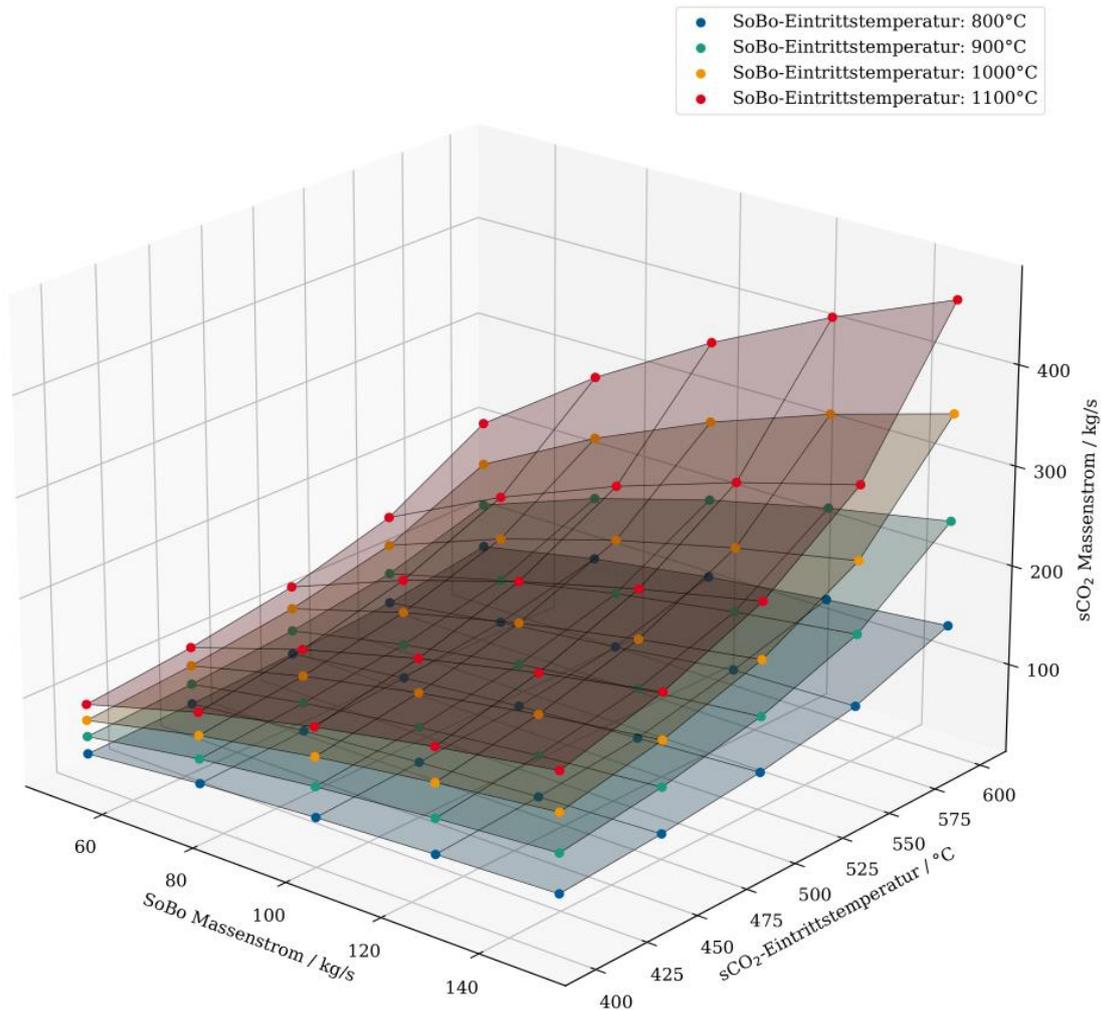
Es wurde eine numerische Optimierung der Konstruktionsparameter und ein systematischer Vergleich von 3 Wärmetauscherkonzepten durchgeführt: 1) der SoBo-Luft Wärmetauscher 2) ein radiativer SoBo-sCO<sub>2</sub>(Rohre)-Wärmetauscher 3) ein SoBo-sCO<sub>2</sub>(Rohre)-Wärmetauscher mit einem Wirbelbett (Abbildung 16). Für alle drei Konzepte wurden die relevanten physikalischen und thermischen Prozesse abgebildet. Für die Simulation der Wärmeübergangskoeffizienten im Wirbelbett-Wärmetauscher wurde zusätzlich auf in der Literatur vorhandene Kennlinien zurückgegriffen.

Für alle drei Konzepte erfolgte eine Optimierung der Masseströme im Designpunkt und eine Optimierung der Abmessungen der SoBos, gleichzeitig mit einer Minimierung der Gesamtgröße des Wärmetauschers.



**Abbildung 16: Ausschnitt des Modells des Wirbelschichtwärmetauschers mit wichtigen Konstruktionsparametern.**

Die optimale Geschwindigkeit der SoBos für Konzept 1 beträgt nur 3-4 mm/s. Eine Geschwindigkeit in dieser Größenordnung würde zu einer sehr langen Anfahrzeit und geringer Möglichkeit zur Last-Adaptivität des Wärmetauschers führen. Außerdem befindet sich unter diesen Parametern die Leistungsaufnahme für das Gebläse im Bereich von 10-15% der Gesamtleistung des Wärmetauschers. Beide Eigenschaften dieses Konzepts sind negativ in Bezug auf den vorgesehenen Einsatz. Im zweiten Konzept ist die optimale SoBo-Geschwindigkeit deutlich höher (5 cm/s), aber der optimierte Wärmetauscher ist deutlich größer als in den anderen beiden Konzepten. Das Wirbelbett-Konzept ermöglicht hingegen eine SoBo-Transportgeschwindigkeit von 30 cm/s (-> 2-3 Minuten Verweilzeit im Wärmetauscher) und kann daher einem sich änderndem Lastprofil schnell nachgefahren werden. Der Wärmeübergangskoeffizient für das Wirbelbett-Konzept ist ca. um einen Faktor 10 höher als für Konzept 1 und 2. Dadurch wird eine kompaktere Bauweise des Wärmetauschers im Vergleich zu den anderen beiden Konzepten ermöglicht. Der Entwurf in der Größe für 10 MW<sub>el</sub> hat ein Gesamtvolumen von 30 m<sup>3</sup>. Insbesondere die hohe spezifische Nettoleistung und der hohe Wärmeübergangskoeffizient machen die untersuchte Wirbelschichttechnologie für aktuelle CSP-Anwendungen sehr attraktiv. Das auf den thermohydraulischen Designpunkt hin optimierte Wärmetauschermodell wurde anschließend genutzt, um Kennlinien für unterschiedliche Temperaturen und Flussraten der beiden Medien zu berechnen (Abbildung 17). Auf Basis dieser Information und ermittelten Parameterfelder erfolgte die Optimierung des Gesamtsystems in ColSim (siehe AP 4).

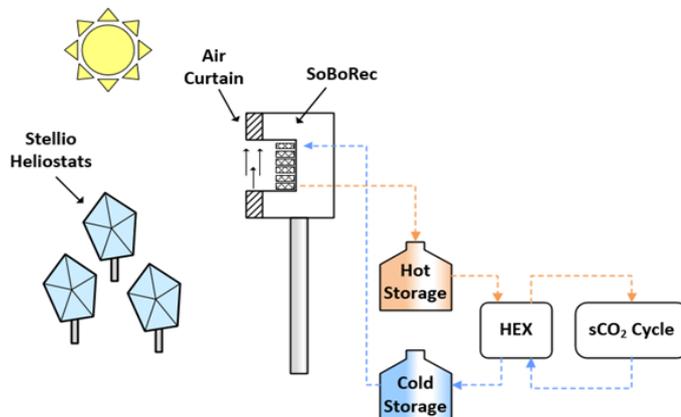


**Abbildung 17: Kennlinien/Kennebenen des simulierten Wirbelbett-Wärmetauschers zur Erhitzung von sCO<sub>2</sub> durch SoBos. Die Austrittstemperatur des sCO<sub>2</sub> beträgt in allen Fällen 700 °C. Die Austrittstemperatur der SoBos variiert zwischen 500 und 750 °C.**

#### 2.1.4. AP 4 Systemintegration

Ziel des Arbeitspaketes war es, die Integration aller neu entwickelten Komponenten in ein Gesamtsystem zu entwickeln. Ausgehend von einer konventionellen Solarturmkonfiguration wurden die entsprechenden Komponenten (Heliostaten, Receiver, Kraftwerksblock) ausgetauscht und die Auswirkungen und notwendigen Anpassungen des Systemdesigns untersucht (v.a. Speicher, Wärmetauscher).

So wurden das SoBoRec-Material (2.1.3.1), die Luftwand (2.1.3.2) und das Receiver-Konzept (2.1.3.3) in ein Central Receiver System (CRS)-Simulationsmodell integriert, das Stelio-Heliostaten, einen direkten thermischen Festkörperspeicher und einen 12,9 MWe (brutto) sCO<sub>2</sub>-Kraftwerkskreislauf umfasst. Dieses Setup stellt eine CRS-Anlage der nächsten Generation dar. Die Modellierung und Simulation wurde mit zwei Fraunhofer ISE-eigenen Simulationswerkzeugen, Raytrace3D und ColSim CSP, durchgeführt. Raytrace3D ist ein Softwarepaket, das die Flussverteilung auf Absorberoberflächen mit hoher räumlicher Auflösung und unter Berücksichtigung optischer Effekte berechnet [9]. ColSim CSP führt dynamische, jährliche Ertragsbewertungen für solarthermische Kraftwerke und solarthermische Prozesswärmeanwendungen durch [10]. Aus diesen Jahressimulationen lassen sich detaillierte, hochaufgelöste Ergebnisse für Kraftwerkskomponenten wie Solarfeld, Receiver und Powerblock ableiten.



**Abbildung 18: Diagramm des verbesserten CRS-Systems mit Stello-Heliostaten, SoBoRec, sCO<sub>2</sub>-Zyklus und Luftwand**

Parasitäre Verluste der einzelnen Komponenten wie die Nachführleistung der Heliostaten, der SoBo-Transport und die Kompressorleistung des Luftschleiers wurden nicht berücksichtigt, um die Analyse von Leistungsverbesserungen einzelner Komponenten zu vereinfachen. Außerdem wurde die thermische Speicherkapazität des Systems so gewählt, dass die gesamte vom Receiver absorbierte Wärme genutzt werden kann. In den folgenden Abschnitten werden die Komponenten im Detail beschrieben.

### Festkörper-Receiver (SoBoRec) System

Für die Simulation wurde der Betriebstemperaturbereich des SoBo-Materials mit 500 – 1100 °C angenommen, während die Auslasstemperatur des Receivers mit 800 – 1100 °C angenommen wurde ( $Rec_{T,out}$ ). Für die SoBoRec-Konfiguration wurde ein Cavity-Receiver-System mit einer quadratischen Absorptionsfläche von 40 – 120 m<sup>2</sup> und einer SoBo-Stärke von 1 cm vorgesehen. Es wird angenommen, dass das SoBo-Material zwischen dem Receiver, dem thermischen Speichersystem und dem Wärmetauscher über ein adiabates und isobares Förderbandsystem (bzw. Paternoster) transportiert wird. In ColSim CSP werden die verschiedenen Verluste (absorbierte Strahlung, Wärmestrahlung und Konvektion) in jedem Zeitschritt berechnet.

Weitere Informationen zu den Materialeigenschaften des Prototyps des SoBo-Materials finden sich in Abschnitt 2.1.3.1, bzw. im Schlussbericht zu Teilprojekt D.

### Solar-Receiver mit montierter Luftwand

Der Hauptnutzen der Luftwand besteht in der Verringerung der Konvektionsverluste im Receiverbereich. In ColSim CSP wurde die Reduzierung der Verluste in die Berechnung der an die SoBos übertragenen Wärme einbezogen, wie in den Gleichungen (1) und (2) dargestellt:

$$Q_{gain} = Q_{absorbed} - Q_{loss,refl} - Q_{loss,tr} - Q_{loss,cv} \quad (1)$$

wobei  $Q_{gain}$  der Gesamtwärmegewinn durch das SoBoRec-System,  $Q_{absorbed}$  die maximal verfügbare potenzielle Wärmeabsorption,  $Q_{loss,refl}$  der Gesamtverlust durch reflektierte Sonnenstrahlung,  $Q_{loss,tr}$  der Gesamtverlust durch Wärmestrahlung und  $Q_{loss,cv}$  der gesamte konvektive Wärmeverlust ist. Die gesamten konvektiven Verluste werden in Gleichung (2) berechnet:

$$Q_{loss,cv} = h \cdot A \cdot (T_{rec} - T_{amb}) \cdot (1 - C_{AC}) \quad (2)$$

wobei die konvektiven Wärmeverluste,  $Q_{loss,cv}$ , durch die Multiplikation des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten [11],  $h$ , der in jedem Zeitschritt als Funktion der Umgebungstemperatur, der Receivertemperatur und der Windgeschwindigkeit berechnet wird, der Empfängerfläche,  $A$ , der

Differenz zwischen der Empfängertemperatur und der Umgebungstemperatur,  $T_{rec} - T_{amb}$ , und schließlich dem Luftwand-Verbesserungsfaktor,  $C_{A.C.}$ , berechnet werden. Ausgehend von den Ergebnissen aus Abschnitt 2.1.5.2 wurde ein Parameterbereich von 0% - 50% verwendet, um die Auswirkungen des Luftwandverbesserungsfaktors  $C_{A.C.}$  zu untersuchen. Dieser Bereich steht im Einklang mit numerischen Simulationen von Luftwand sowie mit den experimentellen Beobachtungen, bei denen eine Verbesserung von 30% als konservativ und eine Verbesserung von 50% als optimistisch angesehen wird.

### Stellio-Heliostatenfeld

Für einen Referenzreceiver mit einer Absorberfläche von 80 m<sup>2</sup> wurde ein Referenzsolarfeld mit einer thermischen Auslegungsleistung von 50 MW<sub>th</sub> und rechteckigen Heliostaten mit einer Aperturfläche von 48,5 m<sup>2</sup> und einer Oberflächenabweichung von 1,5 mrad entworfen. Der Entwurf des Heliostatenfeldes wurde mit dem MUEEN-Algorithmus [12] erstellt und die Feldapertur auf 84 875 m<sup>2</sup> festgelegt. Obwohl der MUEEN-Algorithmus für rechteckige Heliostaten vorgesehen ist, war es möglich, die Parameter des Algorithmus für die fünfeckige Form des Stellio zu optimieren. Ausgehend von dem Referenz-Solarfeld (rechteckig) wurden 25 optimierte Heliostatenfeldkonfigurationen erstellt, wobei die lineare, kombinierte Neigungs-/Nachführabweichung in einem Bereich von 0,9 bis 2,5 mrad und die Receiverfläche in einem Bereich von 40 m<sup>2</sup> bis 120 m<sup>2</sup> variiert wurde. Zusätzlich wurden 5 optimierte Heliostatenfeldkonfigurationen für die Stellio-Heliostaten und unterschiedliche Empfangsflächen abgeleitet.

Weitere Informationen zur Methodik, die für die Entwicklung des Solarfelds verwendet wurde, finden Sie in Chandler et. Al. 2022 [13].

### sCO<sub>2</sub>-Kraftwerkskreislauf und Wärmetauscher

In ColSim CSP wurde ein 12,9 MW<sub>el,gross</sub> Recompression sCO<sub>2</sub> Cycle, wie in Abbildung 19 dargestellt, integriert. Der Zyklus wurde nach dem in Reyes-Belmonte et. al [14], und Trevisan et.al [15] verwendeten Ansatz modelliert und wird unter idealen Bedingungen im stationären Zustand angenommen. Für die sCO<sub>2,TIT</sub> wurde ein Bereich von 650 °C bis 850 °C betrachtet, mit entsprechenden thermischen zu elektrischen Umwandlungswirkungsgraden zwischen 50,0% und 54,9% [15]. Dieser Bereich zeigt die Grenzen des SoBoRec beim Betrieb bei hohen Temperaturen auf.

Der sCO<sub>2</sub>-Zyklus des modellierten Systems wurde dann mit dem in Abschnitt 2.1.3.3 beschriebenen Wärmetauschermodell verbunden. Durch die Kopplung der beiden Modelle wurden die SoBoRec-Eintrittstemperatur und der SoBoRec-Massendurchsatz auf der Grundlage der sCO<sub>2</sub>-Eintrittstemperatur, der Austrittstemperatur, des Massendurchsatzes und des Rec<sub>T, out</sub> berechnet. Für diese Studie wurde angenommen, dass die Temperaturdifferenz ( $\Delta T$ ) zwischen dem sCO<sub>2,TIT</sub> und Rec<sub>T, out</sub> 150 °C, 200 °C oder 250 °C beträgt.

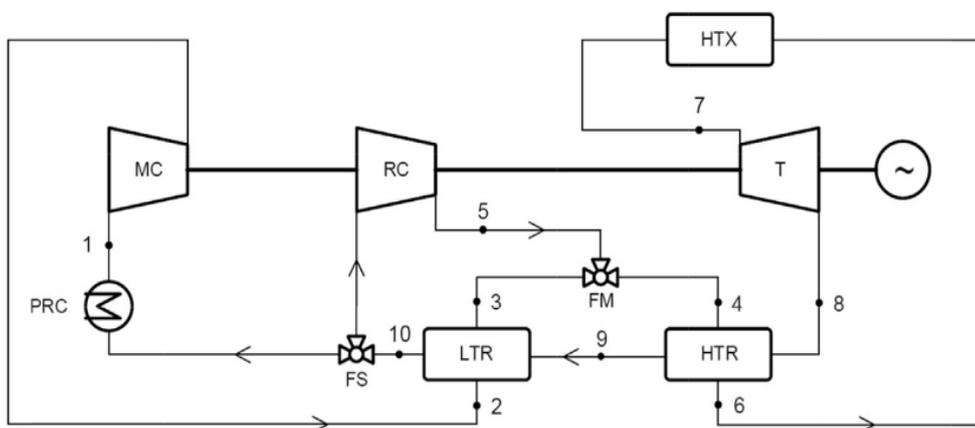


Abbildung 19: Modellierter Recompression-sCO<sub>2</sub>-Cycle (Reyes-Belmonte et al. 2016)

## Parametervariation und Optimierung

Ein wesentliches Merkmal von ColSimCSP ist die Fähigkeit, Simulationen gleichzeitig auf mehreren CPU-Kernen laufen zu lassen, was von entscheidender Bedeutung ist, wenn eine große Anzahl jährlicher Simulationen mit hoher Auflösung betrachtet wird. Für den Optimierungsprozess wurde ein parametrischer Ansatz gewählt, (siehe Tabelle 2Tabelle 2), der mehr als 900 verschiedene Simulationsfälle umfasst. Jeder Simulationsfall besteht aus einer Jahressimulation mit einem Zeitschritt von 120 Sekunden. Darüber hinaus wurde die tägliche Leistung jeder Konfiguration für drei Sommertage mit sehr guten DNI-Bedingungen ( $\text{Maxima} > 900 \text{ W/m}^2$ ) betrachtet.

**Tabelle 2 Liste der Komponenten-Parametrierungsbereiche**

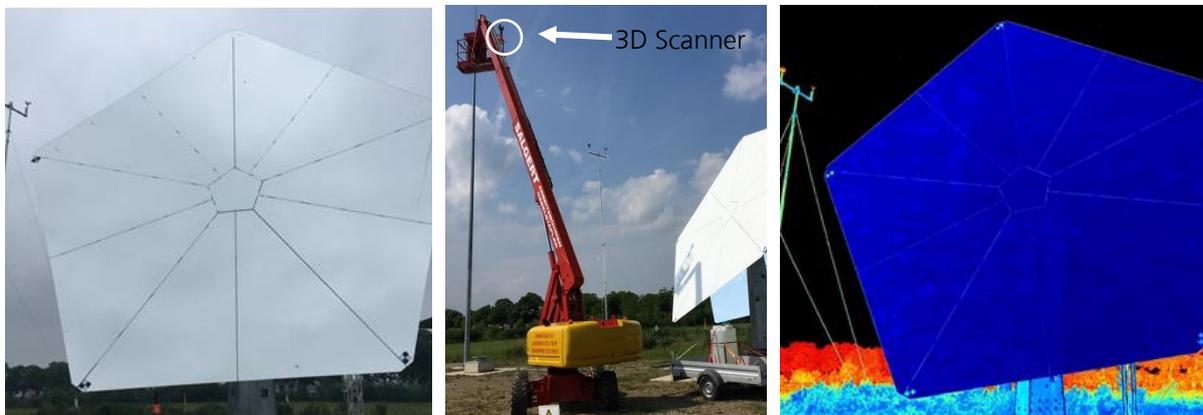
Komponente	Bereich der Parametrisierung	Parameterbereich	Unit
Heliostatenfeld	Oberflächenabweichung ( $\sigma$ )	0.9, 1.3, 1.7, 2.1, 2.5	mrad
Receiver	Receiverfläche	40, 60, 80, 100, 120	m <sup>2</sup>
	Austrittstemperatur ( $\text{Rec}_{T, \text{out}}$ )	800 – 1100 (50 °C Schritt)	°C
Luftwand	Konvektive Verlustreduzierung	0 - 50% (10% Schritt)	%
sCO <sub>2</sub> Cycle	Turbineneintrittstemperatur ( $\text{sCO}_2 \text{ TIT}$ )	650 – 850 (50 °C Schritt)	°C
Wärmetauscher	$\Delta T (\text{Rec}_{T, \text{out}} - \text{sCO}_2 \text{ TIT})$	150, 200, 250	°C

### 2.1.5. AP 5 Komponententests

Die Arbeiten im Arbeitspaket 5 teilten sich in drei unterschiedliche Arbeitsbereiche ein. Diese werden in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

#### 2.1.5.1. AP 5.1 Heliostatentests

Ein Stellio Prototyp wurde zur Unterstützung der Weiterentwicklung bei sbp im Solarkraftwerk Jülich mittels 3D-Laserscanning vermessen.



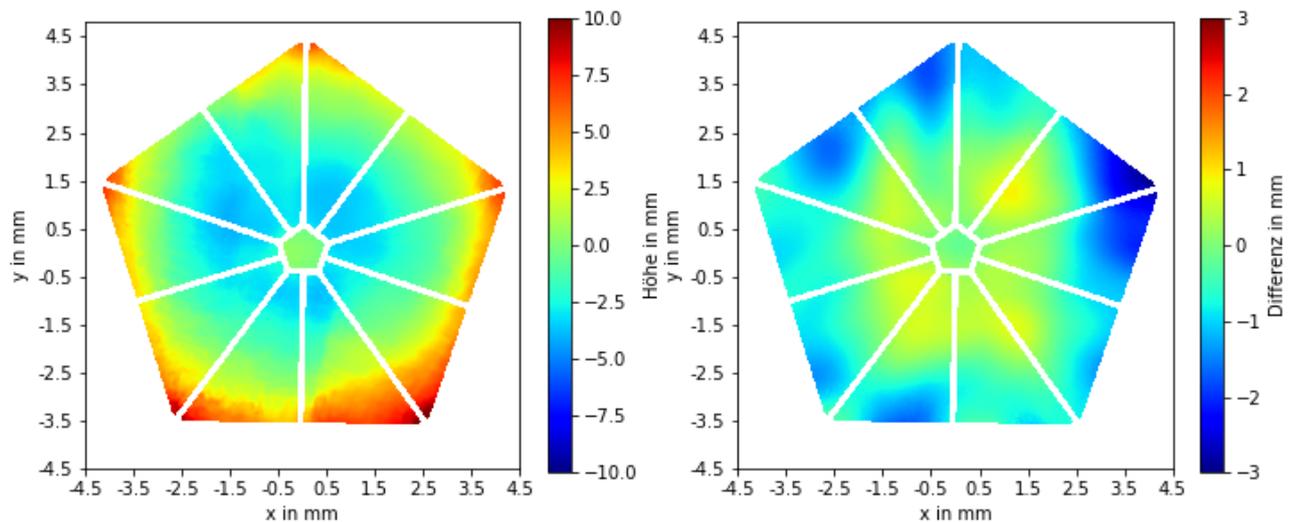
**Abbildung 20:** Links: Der Stellio am Solarkraftwerk Jülich. Mitte: Vermessung des Stellio: Der mit weißem Kreidespray vorbereitete Heliostat wird in einer Stellung vermessen. Der 3D Scanner ist auf einer Hebebühne platziert, um bei verschiedenen Stellpositionen des Heliostaten eine gute Perspektive für die Messung zu erreichen. Rechts: Der Stellio aus Sicht des 3D-Scanners. Blau dargestellt sich Bereiche mit guter Messpunktqualität. Rote Bereiche können weniger gut erfasst werden. Die blau dargestellte Spiegelfläche wurde zu diesem Zweck mit Kreidespray vorbereitet. Durch die diffuse Reflexion kann die Oberfläche mittels 3D-LaserScanner vermessen werden.

Die hoch präzise deflektometrische Vermessung im Heliostatenfeld ist aufgrund großer Referenzflächen und der notwendigen Kalibrierung des Messaufbaus sehr aufwändig. Auch die Heliostatenausrichtung ist üblicherweise durch den Aufbau eingeschränkt. Alternativ sind photogrammetrische Messungen üblich, bei welchen die Heliostatenfläche eng mit Referenzmarkern bestückt wird. Fraunhofer ISE verfolgte eine andere Methodik: Die spiegelnde Oberfläche wurde temporär mit Sprühkreide vorbereitet, um mittels eines hoch präzisen 3D-Laserscanners die Oberfläche zu vermessen (Siehe Abbildung 20). So können

Messungen mit einer Auflösung von bis zu 10 mm pro Messpunkt und hohe Messgeschwindigkeiten erreicht werden.

Der Stellio wurde in 12 verschiedenen Achsstellungen vermessen. Eine Messung ist in Abbildung 21 links dargestellt. Der 3D-Scanner wurde auf einer Hebebühne platziert, um auch bei Messungen mit großen Elevationswinkeln eine gute Messposition zu erreichen.

Durch die Messungen wurde der Einfluss der Schwerkraft auf die Struktur und die Spiegelverformung bei verschiedenen Ausrichtungen der Spiegelfläche, zwischen annähernd vertikal (kein Einfluss) bis horizontal (maximaler Einfluss) aufgenommen. Das Primäre Ergebnis ist eine 3D-Punktwolke, welche weiter ausgewertet wird. Ein beispielhaftes Ergebnis ist in Abbildung 21 links dargestellt: Die Oberflächenform zeigt die parabolische Form mit der nach außen ansteigenden Höhe. Abbildung 21 rechts zeigt den Vergleich der Messung in horizontaler Spiegelstellung (Stow) mit einer Messung bei  $8.1^\circ$  Elevation. Sichtbar ist die sehr geringe Absenkung des äußeren Bereichs der Spiegel durch die Wirkung der Schwerkraft. Die Verformung aufgrund der Schwerkraft wird beim Design des Heliostaten berücksichtigt, um die Oberflächenform für die in den über das Jahr relevantesten Stellungen zu optimieren.



**Abbildung 21: Links: Ein Ergebnis: Die Methode erlaubt die Messung der Oberfläche als Punktwolke, welche in der weiteren Bearbeitung hinsichtlich der Topographie und der Gradienten untersucht wird. Hier dargestellt ist die aufgenommene Form in horizontaler Stellung des Stellio.**

**Rechts: Höhendifferenz der horizontalen Stellung zur Referenzstellung bei  $8.1^\circ$  Elevation**

Die hochwertige Formtreue des Stellio konnte in der Messung bestätigt werden. Darüber hinaus wurden Herausforderungen in dem Messverfahren identifiziert, welche im Folgenden weiter untersucht wurden: Die größte Herausforderung ist der Einfluss von Wind, insbesondere auf die Stabilität der Scanner-Position. Für die Messungen vor Ort war nicht wie gefordert eine Scheerenbühne verfügbar, welche etwas bessere Charakteristik gegenüber Windeinflüssen aufweist. Die Auswertung und Filterung der Daten ist im Resultat aufwändiger. Es zeigte sich darüber hinaus, dass schnelle Messungen (mit weniger Messpunkten) und von stabilen Grundpositionen wesentlicher Faktor für hochwertige Ergebnisse sind. Andererseits zeigte sich, dass eine Vorbereitung mittels Kreidespray nicht immer notwendig ist.

## 2.1.5.2. AP 5.2 Tests des SoBoRec/Luftwand-Prototyps

### LWT

#### - Bestellung der Komponenten / Fertigung der Luftwand Luftwand-Teststand

Der Aufbau und Test des Luftwand-Teststandes in diesem Arbeitspaket wurde am Außentestgelände des Fraunhofer ISE durchgeführt.

Die wesentlichen Komponenten für den Teststand wurden spezifiziert, konstruiert und wurden durch LWT an den Standort geliefert: Die elektrischen Heizelemente und Verkabelung (seitens ISE), die beiden Luftwand-Druckmodule und das Gebläse und die Verrohrung für den Betrieb der Luftwand. Die Komponenten standen zusammen mit einem Container zur Aufnahme der Mess- und Regelungstechnik am Testgelände bereit.

#### - Aufbau der Luftwand-Anlage am Teststand in Hochdorf

Auf Basis der Ergebnisse (AP 3.2) wurde der Außen-Teststand auf dem Versuchsgelände in Freiburg aufgebaut.

#### - Konstruktion und Fertigung der Luftwand-Druckmodule (LWT)

Der Ventilator (Abbildung 22) erzeugt mit Hilfe der Umgebungsluft den erforderlichen Luftstrom und Druck, der für den Aufbau der Luftwand benötigt wird. Er erzeugt einen Volumenstrom von  $13.000 \text{ m}^3/\text{h}$  und hat die Abmessungen (H x B x L)  $1.270 \times 1.270 \times 2.175 \text{ mm}$ . Mit Wickelfalzrohren (DN400) wird der erzeugte Luftstrom nahezu reibungslos zu den beiden Druckmodulen weiterbefördert. Das Druckmodulpaar (Abbildung 23) aus hitzebeständigem wärmefesten Stahl 1.4841 erzeugt einen gleichmäßigen Luftstrom, der mit einer konstanten Geschwindigkeit ausgeblasen wird, so dass die Luftwand entsteht.

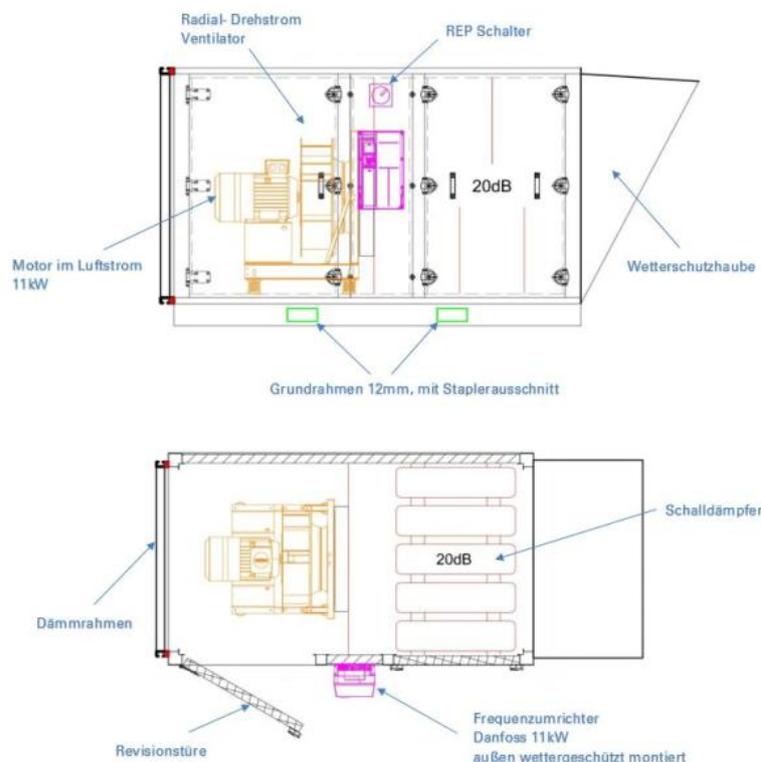


Abbildung 22: Aufbau des Ventilators für den Betrieb der beiden Druckmodule für die Luftwand am Teststand.



**Abbildung 23: Am Teststand in Freiburg eingetroffene Module.**

**- Montage / Inbetriebnahme / erfolgreiche Abnahme am 23.3.2022**

In der Zeit vom 21.03.2022 bis zum 23.03.2022 konnten die Mitarbeiter der LWT die Luftwandanlage für den Teststand in Freiburg installieren und in Betrieb nehmen. Dabei wurden zunächst die beiden Druckmodule am Cavity-Receiver befestigt. Zur Verstellung der Ausblasrichtung wurden sie drehbar gelagert. Für die Verrohrung wurde ein Gestell errichtet. Im nächsten Schritt wurde die Verrohrung zwischen Ventilator und Druckmodulen eingebaut. Nach Parametrierung des Frequenzumrichters, fand ein Probelauf statt der auf ca. 28m / s Ausblasgeschwindigkeit erfolgte.

Das Ergebnis der Messungen wird nachfolgend durch Fraunhofer ISE ausführlich beschrieben. Die Ergebnisse entsprechen den Erwartungen und Prognosen der LWT GmbH und bestätigen die Effizienz der Luftwand auch für den Anwendungsfall, in dem hoch temperierte Luft abgeschottet werden soll.

Die Luftwandanlage erzeugt eine barrierefreie Luftabschottung, somit wird die heiße Luft im Receiver gehalten. Da die Luftwandanlage wenig Luftvolumen benötigt und mit einer erhöhten Austrittsgeschwindigkeit arbeitet, ist die Luftwandtechnik höchst effizient und ökologisch.



**Abbildung 24: Die Abbildung zeigt den realisierten Aufbau der Luftwandanlage.**

## Luftwand-Tests

Am Fraunhofer ISE wurden im April und Mai 2022 die Hochtemperaturtests am aufgebauten Teststand umgesetzt. Die Messungen wurden mit unterschiedlichen Betriebsparametern der Luftwand durchgeführt (Ausblasrichtung, Luftmenge, nur obere Luftwand in Betrieb) und auch auf mehreren Temperaturniveaus der Heizelemente. Während zu Beginn der Messkampagne zum Teil nur geringfügige Verbesserungen der konvektiven Abschottung, oder sogar ein erhöhter Wärmeverlust bei ungünstiger Einstellung der Luftwand beobachtet wurden, wurde schließlich im Laufe der Versuche ein Einstellungsbereich identifiziert, der zu einer Reduktion der konvektiven Verluste durch aus dem Testaufbau ausströmende Warmluft um 30 % führt. Es wird – in Übereinstimmung mit aktueller Literatur – erwartet, dass dieser Wert durch geeignete Maßnahmen weiter gesteigert werden kann, auf mindestens 50 %. Im Folgenden wird die Durchführung der Experimente beschrieben, bei denen die höchste Verringerung der konvektiven Verluste erzielt wurde, sowie die Ergebnisse im Detail erläutert.

## Durchführung der Experimente

Während der Versuche wurde die Temperatur der Thermoelemente der sieben thermischen Zonen mit einem Zweipunktregler für den elektrischen Strom konstant auf 610 °C gehalten (Abbildung 25). Die zur Aufrechterhaltung dieser Temperatur erforderliche elektrische Leistung wurde durch kontinuierliche Messung des elektrischen Stroms ermittelt. Unter stationären Bedingungen entspricht diese Leistung den kombinierten konduktiven (durch die drei Seitenwände, Rückwand und Boden), radiativen und konvektiven Wärmeverlusten des Testaufbaus. Aufgrund der statistischen Schwankungen des Zweipunktreglers mussten die Messungen über einen längeren Zeitraum (mindestens 20 Minuten) durchgeführt werden, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

Um das Basisszenario - den Gesamtwärmeverlust ohne Luftwand - zu messen, wurde der Aufbau 45 Minuten lang bei Rückwand-Zieltemperatur betrieben und die notwendige el. Heizleistung bestimmt. Danach wurde das Gebläse für die Luftwand eingeschaltet und dessen Leistung in 5 Schritten auf bis zu 2 kW erhöht. Die Messungen wurden bei jeder Luftwand-Einstellung 30 Minuten lang durchgeführt. Die maximal gemessene Umgebungs-Windgeschwindigkeit betrug während der Tests weniger als 0,5 m/s.



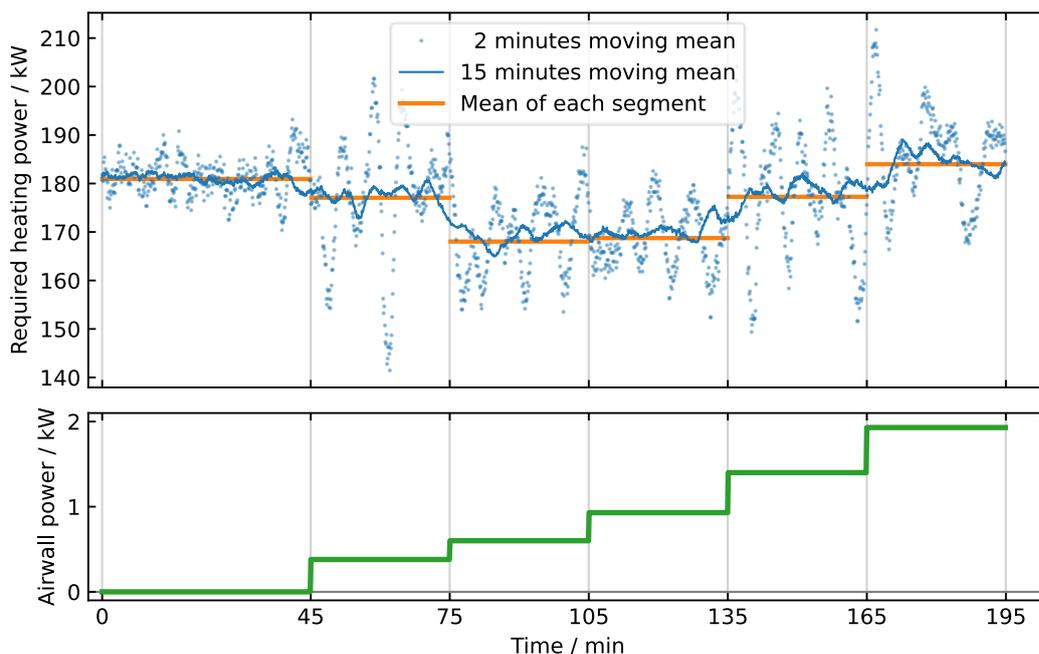
**Abbildung 25:** Der Testaufbau zur Messung der Wärmeverluste von solarthermischen Strahlungsempfängern während der Durchführung von Versuchen. Die Wärmeverluste des Testaufbaus mit und ohne Luftwand wurden verglichen. Die Temperatur der Rückwand wurde dabei konstant auf 610 °C gehalten. Unter stationären Bedingungen entspricht die erforderliche elektrische Heizleistung den thermischen Verlusten der Kavität. Wird das System mit idealen Luftwandparametern betrieben, kann die erforderliche Heizleistung zur Aufrechterhaltung der Rückwandtemperatur deutlich reduziert werden.

## Ergebnisse

Abbildung 12 zeigt die Heizleistung, die zur Aufrechterhaltung einer konstanten Oberflächentemperatur während des Tests erforderlich ist (oben), und die entsprechende Leistung des Luftgebläses (unten). Da die einzelnen Leistungsmessungen aufgrund des statistischen Charakters des Zweipunktreglers stark schwanken, sind gleitende 2- und 15-Minuten-Mittelwerte sowie der Mittelwert (orange) jedes Testabschnitts dargestellt.

Im Basisfall ohne Luftwand (Minuten 0-45) beträgt die Leistung  $181 \pm 2$  kW. Nach dem Einschalten der Luftwand fällt die Leistung deutlich ab und erreicht ihr Minimum im dritten Leistungs-Schritt (Minuten 75-105) mit einer Heizleistung von  $168 \pm 3$  kW. Da sich die Heizertemperaturen in der Cavity während des Versuchs nicht wesentlich ändern (mittlere Standardabweichung der Temperaturen der sieben kontrollierten Thermoelemente: 1,7 K), bleiben die Strahlungs- und Leitungsverluste konstant. Dies bedeutet, dass die Verringerung der Heizleistung nur durch die positive Wirkung des Luftwandbetriebs auf die konvektiven Verluste entsteht. Die erzielte Leistungsreduktion beträgt  $13 \pm 4$  kW oder  $7,1 \pm 1,9\%$  der gesamten Wärmeverluste.

Eine weitere Erhöhung der Gebläseleistung lässt die konvektiven Verluste wieder ansteigen. Wenn die Leistung sehr hoch ist (Minuten 165-195), sind die konvektiven Verluste höher als im Referenzfall ohne Luftwand.



**Abbildung 26: Erforderliche Heizleistung zur Aufrechterhaltung einer konstanten Temperatur in der Kavität (obere Abbildung). Dargestellt sind gleitende 2- und 15-Minuten-Mittelwerte sowie der Mittelwert jedes gesamten Messsegments (orange). Der Referenzfall (ohne Luftwand) liegt im Zeitraum von Minute 0-45. Während der Tests wurde die Leistung des Gebläses der Luftwand (untere Abbildung) schrittweise erhöht, um den optimalen Wert zu ermitteln. Der beobachtete Rückgang der Heizleistung ist auf eine Verringerung der konvektiven Verluste durch den Betrieb der Luftwand zurückzuführen. Das Optimum wird in Stufe 3 erreicht (Minuten 75-105). Wenn die Leistung der Luftwand zu hoch eingestellt wird, steigen die konvektiven Verluste auf einen höheren Wert als im Referenzfall ohne Luftwand.**

Eine experimentelle Trennung der verschiedenen thermischen Verlustmechanismen (radiativ, konduktiv, konvektiv) wurde nicht durchgeführt und bleibt einer zukünftigen experimentellen Bewertung vorbehalten. Mit Hilfe theoretischer Modelle kann diese Trennung jedoch (mit einer gewissen Unsicherheit) auf der Grundlage der bekannten geometrischen- und Materialparameter des Aufbaus und

seiner Komponenten vorgenommen werden. Die Informationen über die Größenordnung der Strahlungs- und Leitungsverluste können dann zur Bestimmung der relativen Verringerung der Konvektionsverluste verwendet werden.

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz ergibt für die Strahlungsverluste (mit erhöhter Unsicherheit, die durch die Unsicherheit des Emissionsgrads der Heizelemente und der Oberflächentemperaturverteilung über die gesamte Heizplatte verursacht wird)

$$P_{\text{rad}} = 138 \pm 8 \text{ kW}$$

und die Leitungsverluste durch die isolierten Wände betragen

$$P_{\text{cond}} = 3 \pm 1 \text{ kW}.$$

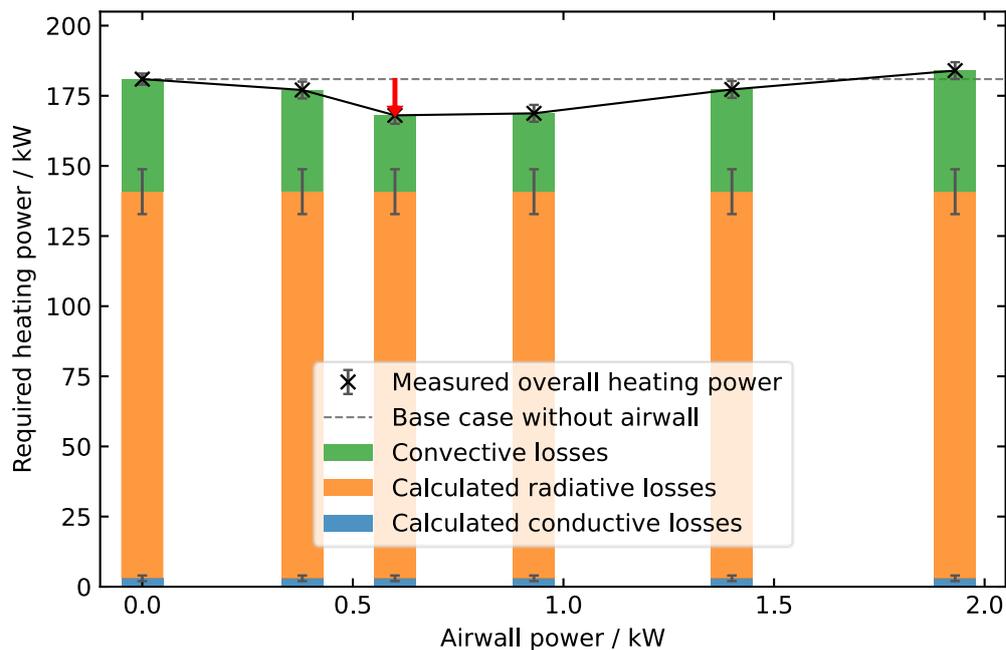
Mit

$$P_{\text{base}} = P_{\text{rad}} + P_{\text{cond}} + P_{\text{conv}},$$

ergeben sich für die konvektiven Verluste (im Basisfall ohne Luftwand)

$$P_{\text{conv}} = 40 \pm 8 \text{ kW}.$$

Dieser Wert bedeutet, dass die Verringerung der Konvektionsverluste um  $13 \pm 4 \text{ kW}$  eine relative Verringerung um  $32 \pm 11 \%$  darstellt. Abbildung 26 veranschaulicht die Beziehungen und die inhärente Unsicherheit im theoretischen Modell der Strahlungs- und Leitungsverluste.



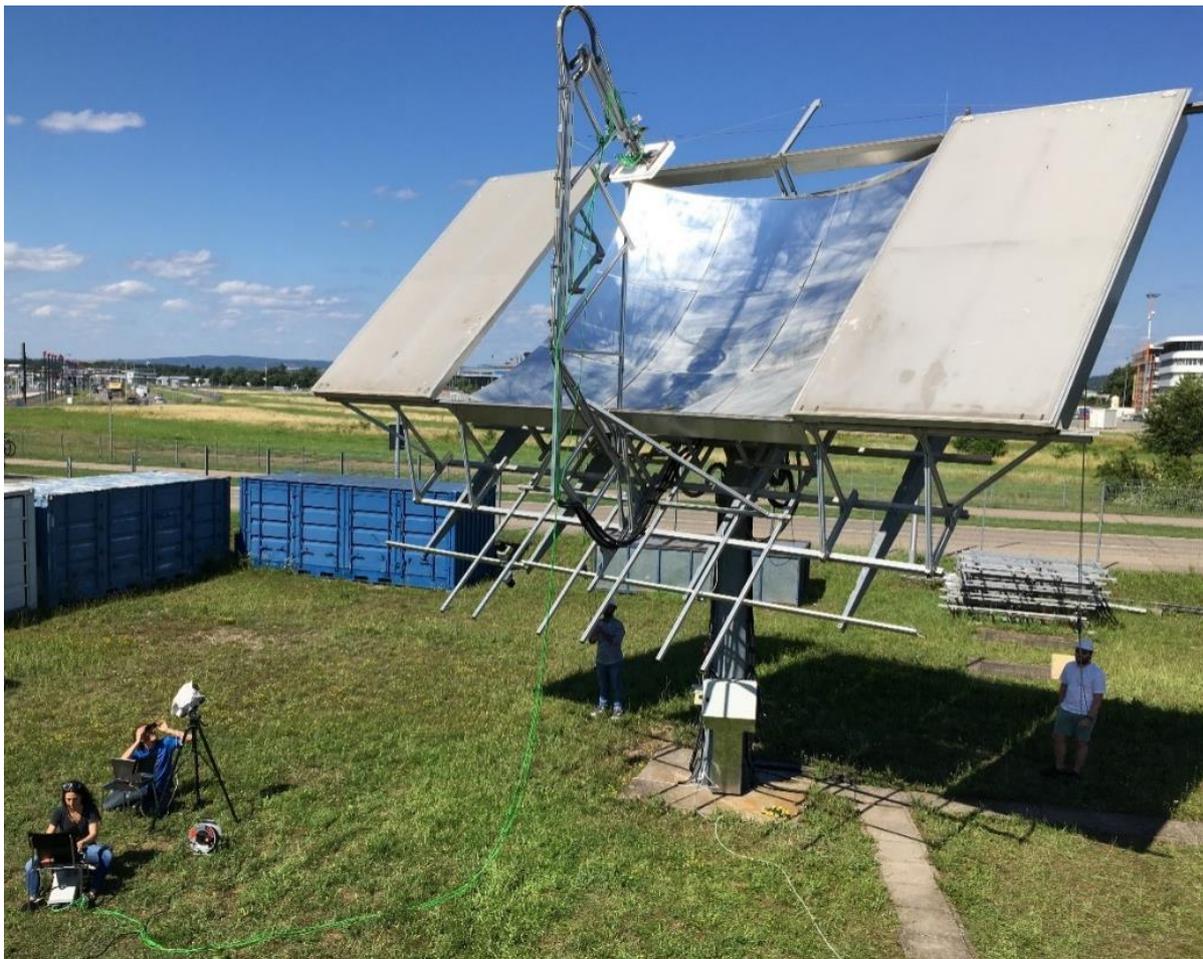
**Abbildung 27: Aufteilung der Wärmeverluste der Cavity in Abhängigkeit von der Leistung der Luftwand. Die Kreuze zeigen die gemessene Heizleistung (gleich den Wärmeverlusten) für verschiedene Gebläseleistungen. Theoretische Modelle wurden verwendet, um den Gesamtwärmeverlust in die konduktiven, radiativen und konvektiven Komponenten zu trennen. Im optimalen Fall (Gebläseleistung 0,6 kW) ist die Reduktion der konvektiven Verluste (roter Pfeil)  $7,1 \pm 1,9\%$  der gesamten Wärmeverluste oder  $32 \pm 11\%$  der rein konvektiven Verluste.**



Um die Eigenschaften der von Kraftblock hergestellten Proben in Bezug auf Materialverhalten und Eignung als Material für solarthermische Festkörper-Strahlungsempfänger zu untersuchen, wurden am Fraunhofer ISE Tests unter natürlicher Solarstrahlung sowie am spanischen Forschungsinstitut *IMDEA Energía* (Madrid) Tests am Solarsimulator durchgeführt. Die Tests und die gefundenen Ergebnisse sind im Folgenden beschrieben.

### Ergebnisse vom Dish-Konzentrator

Ende Juli 2021 wurden am Außen-Testgelände des Fraunhofer ISE die Strahlungstests an der SoBo-Keramik mit einem 16 m<sup>2</sup>-Dishkonzentrator durchgeführt (Abbildung 28). Abbildung 29 zeigt ein VIS-Kamerabild des Prüflings während eines Tests, auf dem die Strahlungsverteilung gut sichtbar ist. Durch eine Veränderung der z-Position des Probenhalters konnte die Probe in- und aus dem Fokuspunkt gefahren werden. Die resultierende Temperaturverteilung der Probe ist auf Abbildung 30 gezeigt. Die Bestrahlungsstärke auf der Probe war während dieser Außen-Experimente zeitlich leicht fluktuierend und nur mit einer relativ hohen Unsicherheit bekannt. Gründe dafür sind die Abweichung der Spiegel von der optimalen Paraboloid-Form und daraus resultierende räumliche Inhomogenität im Fokus, Wolkenschleier-Durchzüge, Windeinflüsse und die schrittweise Nachregelung des Trackers. Konzentrationsmessungen mit einer Leuchtdichtekamera, die auf der Detektion der vom Strahlungsschild reflektierten Strahlung basieren, ergaben eine maximal erreichbare Bestrahlungsstärke des Konzentrators von 1,1-1,3 MW/m<sup>2</sup>.



**Abbildung 28:** Durchführung von Strahlungstests an der SoBo-Keramik am Außentestgelände des ISE in Freiburg. Die Keramik (10x10 cm<sup>2</sup>) ist im Brennpunkt des Konzentrators (16 m<sup>2</sup>) montiert. Ihre Temperatur wird mit Thermoelementen überwacht und die Strahlung mit IR/VIS-Kameras vermessen.

Die Experimente am Konzentrator lieferten wertvolle Erkenntnisse über die Belastbarkeit der Keramik, sowohl kontinuierlich als auch unter zeitlichen und räumlichen Gradienten. Die Experimente lieferten gleichzeitig die Grundlage für die nachfolgenden Tests am Solarsimulator KIRAN42 bei IMDEA in Madrid. Die dort erreichbare räumliche Ausdehnung des Fokuspunkts beträgt zwar nur 3-4 cm, aber durch die Laborsituation ist die zeitliche und räumliche Variation der Intensität genau bekannt und kontrollierbar. Dadurch ergänzen sich die beiden Tests gegenseitig und liefern zusammen eine genaue Charakterisierung des Verhaltens der Keramik bei Bestrahlung mit hohen Intensitäten. Im Folgenden sind die Ergebnisse der Dish-Tests anhand der in Zwischenbericht 6 formulierten Forschungsfragen aufgeführt:

- 1) Überprüfung des Verhaltens der SoBo-Elemente bei schneller Änderung der Flussdichte (zeitliche Temperaturgradienten)  
Bei den Tests am Dish-Konzentrator wurden die Prüflinge zu Beginn schnell in den Fokuspunkt gefahren und während des Tests häufig in und aus dem Fokuspunkt, um die Bestrahlungsstärke zu variieren. Bei keinem der Experimente wurden Schäden an der Keramik beobachtet, die durch interne Temperaturspannungen verursacht wurden.
- 2) Überprüfung des Verhaltens der SoBo-Elemente bei stark inhomogener Flussdichte (räumliche Temperaturgradienten)  
Durch die Abweichung der Paraboloidspiegel von der optimalen Form war die Strahlungsverteilung auf den Prüflingen stark inhomogen; die räumliche Intensitätsvariation auf der Probenoberfläche beträgt bis zu 100 %. Aber auch dies führte nicht zu beobachtbaren Schäden durch auftretende Materialspannungen.
- 3) *Bestimmung der maximalen Flussdichte / Temperatur, bei der noch kein Materialversagen eintritt*  
Deutliche Schäden an der Keramik traten unter 0,5-0,7 MW/m<sup>2</sup> nicht auf. Dies entspricht somit der Belastungsgrenze des Materials. Die Oberflächentemperatur der Keramik, die erreicht wurde, bevor eine starke Veränderung der Oberfläche auftritt (Abbildung 31), wurde mittels Infrarotmessung auf 1250±100 °C bestimmt (Abbildung 30).
- 4) Halten der SoBo-Elemente für längere Zeit auf einem Temperaturniveau, das mehrere 100 K unter der Erweichungstemperatur liegt und Test auf Materialveränderungen  
Die Erweichungstemperatur des Materials wurde in den Dishtests bestimmt. Tests auf Materialveränderungen bei niedriger Materialtemperatur wurden aber wegen der genaueren Regel- und Messbarkeit der Bestrahlungsstärke im Solarsimulator KIRAN42 durchgeführt. Stattdessen wurden die Experimente im Dish so aufgebaut, dass die Belastungsgrenzen des Materials bei großflächig hoher Bestrahlungsstärke charakterisiert werden konnte.



Abbildung 29: SoBo-Keramik im Probenhalter unter konzentrierter Solarstrahlung im Dish-Konzentrator am Fraunhofer ISE (VIS-Foto aufgenommen mit Graufilter).

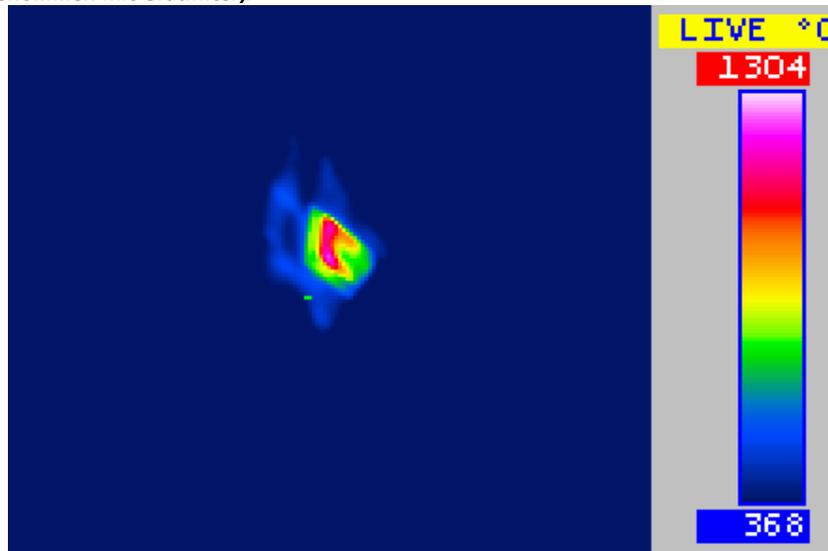


Abbildung 30: IR-Kamerabild der Keramik während der Tests unter konzentrierter Sonnenstrahlung. Der Zustand der Keramik nach dem Test ist in Abbildung 31 (links) gezeigt.



Abbildung 31: Oberfläche der SoBo-Keramik nach 3 Minuten Bestrahlung mit ca.  $0,8 \text{ MW/m}^2$  (links) und nach 20 s Bestrahlung mit ca.  $1,2 \text{ MW/m}^2$  (rechts) im Dish-Konzentrator am Fraunhofer ISE. Beide Bestrahlungsstärken sind über der Belastungsgrenze des Materials und führen zur Schädigung der Oberfläche.

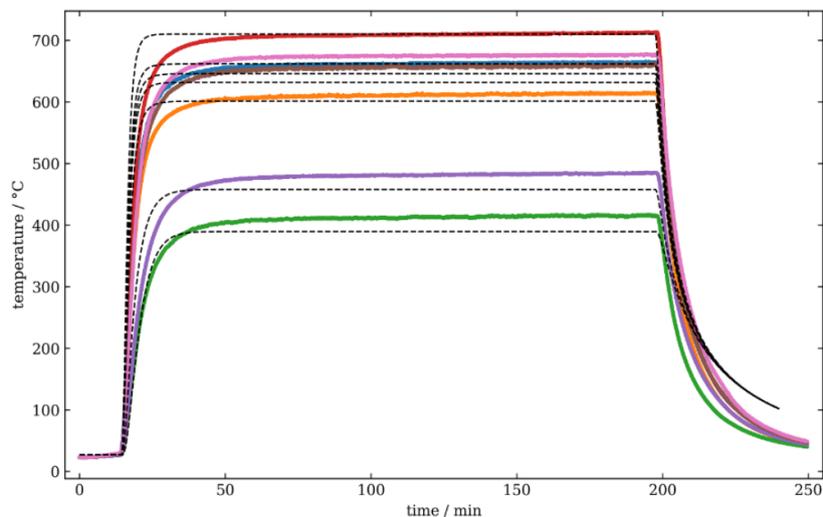
### Ergebnisse der Tests im Solarsimulator

Aus den Experimenten im Solarsimulator KIRAN42 bei IMDEA Energy (Abbildung 32) wurden zusätzliche und genauere Informationen über die Eignung des keramischen Materials als Receivermaterial erwartet. Insbesondere die Übereinstimmung der gemessenen Temperaturprofile, die unter Bestrahlung im Simulator auftraten, mit den theoretischen Berechnungen (aus zuvor gemessenem solaren Absorptionsgrad, Emissionsgrad, Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärmekapazität) war von hohem Interesse und wurde getestet. Es wurde eine gute Übereinstimmung des thermischen Modells mit den durchgeführten Messungen festgestellt (Abbildung 33). Zusätzlich lieferten die Messungen wichtige Daten für eine Verfeinerung des Modells und die genauere Identifizierung der relevanten Materialparameter. Außerdem wurden die maximale Bestrahlungsstärke und die damit verbundene maximale Oberflächentemperatur, die nicht zu einer dauerhaften Materialveränderung führen, genauer ermittelt als

es in den Tests am Dish-Konzentrator möglich war.  
Im Folgenden sind die Ergebnisse der Tests ausführlicher beschrieben.



**Abbildung 32: Durchführung von Experimenten unter hoher Strahlungsflussdichte am Solarsimulator KIRAN42 (IMDEA Madrid).**



**Abbildung 33: Messdaten aus dem Solarsimulator KIRAN42: Temperaturen an verschiedenen Positionen auf der Rückseite des SoBo-Prüflings (farbige Linien) und entsprechendes numerisches Modell. Das Modell hat leichte Abweichungen von den Messdaten in der Aufheiz- und Abkühlphase (ab Minute 200), liefert aber eine gute Beschreibung des stationären Zustands.**

### Maximale Temperatur und Bestrahlungsstärke

7 Langzeitexperimente (jeweils 1-3 Stunden) wurden an verschiedenen Proben mit unterschiedlichen Bestrahlungsstärken durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass bei einem Strahlungsfluss von weniger als  $450 \text{ kW/m}^2$  nur eine leichte Verfärbung der Oberfläche auftritt, ohne sichtbare Schäden. Bei  $500 \text{ kW/m}^2$  tritt eine stärkere Verdunkelung der Oberfläche auf (Abbildung 34), aber immer noch keine Verformung. Diese Flussdichte führt zu einer Oberflächentemperatur von  $1300 \pm 100 \text{ °C}$ . Bei  $790 \text{ kW/m}^2$  findet ein weitgehendes oberflächliches Schmelzen des Materials statt. Bei einer Probe wurde eine maximale Bestrahlungsstärke von  $1000 \text{ kW/m}^2$  eingestellt, wodurch ein Loch in die Probe geschmolzen wurde. Die Endtemperatur bei diesem Test betrug  $1450 \pm 100 \text{ °C}$ .



**Abbildung 34:** Links: SoBo-Keramik nach 20 Minuten Bestrahlung mit  $500 \text{ kW/m}^2$ . Der Bereich mit der höchsten Flussdichte (2 und 3) ist verfärbt. Absorptionsspektren an den 3 Stellen sind in Abbildung 35 gezeigt. Rechts: Mikroskopbild der Probenoberfläche nach der Bestrahlung. Im oberen Bildteil ist eine Verdunkelung der Oberfläche gegenüber dem Ausgangszustand sichtbar, während im unteren Teil (mit geringerem Fluss) die Oberfläche heller wurde.

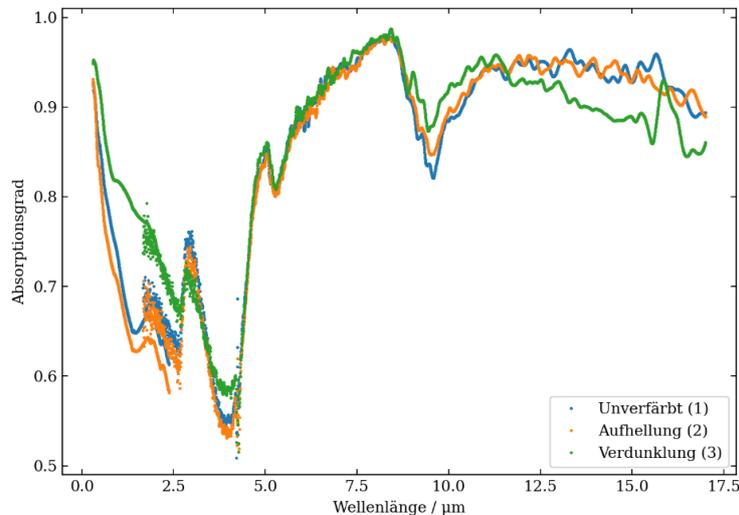
### Mechanische Stabilität bei Zyklisierung und Schocks

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Langzeitexperimenten unter zeitlich konstanter und räumlich inhomogener Bestrahlungsstärke wurden Tests durchgeführt, bei denen die Probe periodisch in den Strahlungsfluss hinein- und herausbewegt wurde, mit einer Aufheizphase von 30 Sekunden und einer Abkühlphase von 30 Sekunden. In keinem der Tests kam es zu einem plötzlichen Materialversagen aufgrund von thermischer Belastung. In den Proben, die auf sehr hohe Temperaturen erhitzt wurden, wurden nach der Abkühlphase kleine Risse festgestellt. Dies wird auf das Schmelzen und Erstarren bei hohen Temperaturen und die anschließende Volumenänderung aufgrund der thermischen Ausdehnung zurückgeführt.

### Spektrale Veränderungen

Während der Tests wurden die Proben zunächst heller und dann mit zunehmender Bestrahlungsstärke dunkler als im Ausgangszustand (siehe Abbildung 34). Dies deutet auf eine Veränderung des solaren Absorptionsvermögens und des thermischen Emissionsvermögens hin. Um diese Veränderungen zu quantifizieren, wurden spektrale Absorptionsmessungen durchgeführt (Abbildung 35). Im Spektrum ist die Aufhellung durch einen Rückgang der Absorption im Bereich bis  $2 \mu\text{m}$  sichtbar. Im IR entsteht keine Veränderung. Die Verdunklung der Probe bei stärkerer Bestrahlungsstärke entspricht einer deutlichen Erhöhung des Absorptionsgrades im sichtbaren Bereich. Gleichzeitig kommt es zu einer Verringerung der thermischen Emission im mittleren IR.

Die Tests im Solarsimulator haben gezeigt, dass das Material im Prinzip für den vorgesehenen Einsatz geeignet ist. Gleichzeitig wurden Aspekte identifiziert, die eine Weiterentwicklung des Materials erlauben um verbesserte Eigenschaften zu erreichen.



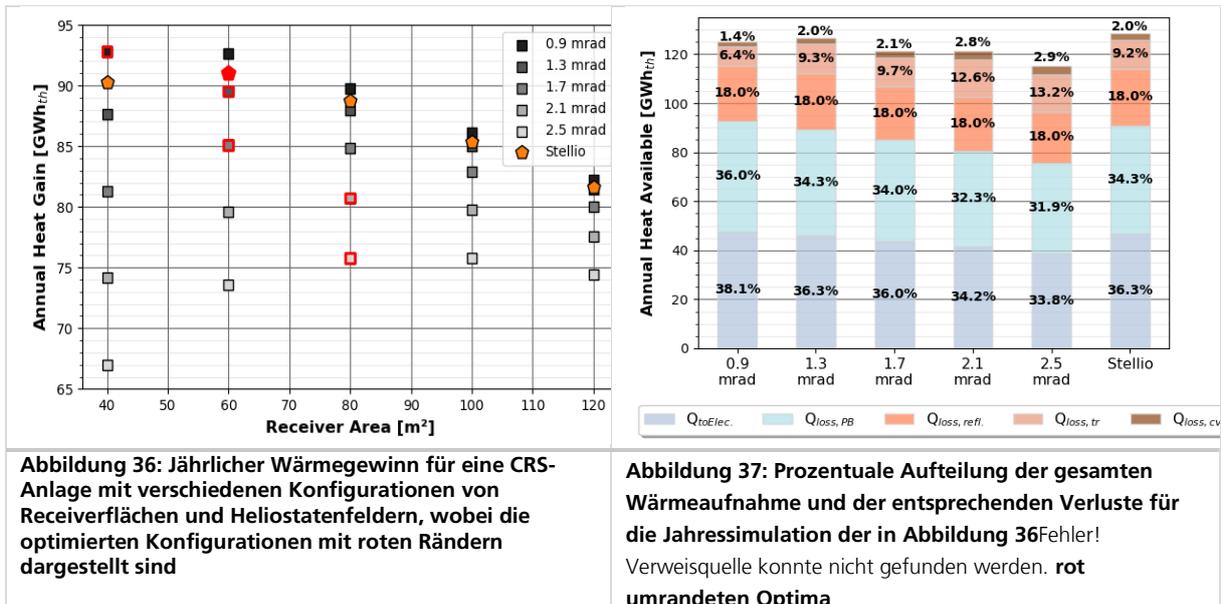
**Abbildung 35: VIS- und IR-Absorptionsspektren der SoBo-Keramik nach Bestrahlung mit  $0,5 \text{ MW/m}^2$ . Die 3 Messpunkte sind in Abbildung 34 gezeigt. Eine Bestrahlung mit hoher Intensität führt zu einer Zunahme der Absorption im Bereich bis  $2 \mu\text{m}$  und gleichzeitiger Abnahme der thermischen Emission im IR um  $15 \mu\text{m}$ .**

### 2.1.6. AP 6 Planung und Vorbereitung zur Verwertung

Die Auslegung der Gesamtanlage wurde grundlegend für verschiedene Anwendungen betrachtet. Eingehender wurde jedoch die Umsetzung im Kraftwerk mit  $\text{sCO}_2$ -Kreislauf analysiert (Vergl. Systemintegration in Abschnitt 2.1.4). Hier wurden die unterschiedlichen Entwicklungen zusammengefügt und die Modelle erweitert, um Solarfeld mit Stellio-Heliostaten, Receivermodell mit SoBo-Charakteristik und Luftwand, sowie Wärmetauscher und  $\text{sCO}_2$ -Kreislauf abzubilden:

Die jährliche optische Effizienz des Stellio-Heliostatenmodells liegt in der Simulation zwischen 61,9% und 68% und übertrifft rechteckige Heliostate mit Oberflächenfehlern von mehr als 1,3 mrad. Dies zeigt die fortschrittliche Leistung des Stellio, dessen Ertrag durch eine weitere Optimierung des Felddesign-Algorithmus noch verbessert werden könnte. Wenn die sechs verschiedenen Heliostatenfelder (vergl. Abschnitt 2.1.4) in eine CRS-Anlage mit einer Receiver-Austrittstemperatur ( $\text{Rec}_{T, \text{out}}$ ) von  $850^\circ\text{C}$  und einer  $\text{sCO}_2$  TIT von  $700^\circ\text{C}$  integriert werden, können die lokalen Optima für verschiedene Oberflächenfehler und Receiverflächen bestimmt werden. Diese Optima stellen den Kompromiss zwischen Spillage (erhöht für kleinere Receiver) und thermischen Verlusten (erhöht für größere Receiver) dar. In Abbildung 36 zeigen die rot umrandeten Optima den größten jährlichen Wärmegewinn pro Heliostatentyp für eine CRS-Anlage. Insgesamt weicht der jährliche Wärmegewinn des optimierten Stellio bei rechteckigen Heliostaten mit Oberflächenfehlern von weniger als 1,3 mrad um etwa  $\pm 1,8\%$  ab, während der Stellio bei einer Neigungsabweichung von mehr als 1,3 mrad 7% bis 20,4% besser abschneidet.

In Abbildung 37 werden 33,8 % bis 38,1 % der gesamten potenziellen Wärme am Receiver in Strom umgewandelt, wobei die in Raytrace3D berechneten optischen Verluste nicht berücksichtigt sind. Während die größten Verluste des Systems im Kraftwerksblock entstehen, ist die reflektierte Sonnenstrahlung die Hauptursache für Verluste in der „Solar Island“ und wird in der ColSim CSP-Simulation als fester Prozentsatz berechnet. Um die Leistung zu verbessern, könnte der SoBo mit (im Solarspektrum) schwarzer Farbe eingefärbt oder beschichtet werden, um die Reflexionsverluste weiter zu verringern.



Der zweitgrößte Verlust entsteht durch Wärmestrahlung, welcher zwischen 6,4% bei einer kleineren Receiverfläche (40 m<sup>2</sup>) und 12,6 - 13,2% bei einer Verdoppelung der Receiverfläche liegt. Die konvektiven Verluste schließlich machen weniger als 3 % aus, wobei die Empfänger mit kleinerer Fläche die geringsten konvektiven Verluste aufweisen. Da die Berechnungen der Wärmestrahlungs- und Konvektionsverluste von der Empfängerfläche abhängen, würde eine kleinere Empfängerfläche zu geringeren thermischen Verlusten führen, könnte aber – je nach Leistung des Heliostaten – auch zu größerem Spillage führen.

Wenn die  $sCO_{2,TIT}$  erhöht wird, besteht ein Optimierungsgleichgewicht zwischen der Erhöhung des Gesamtwirkungsgrads der thermisch-elektrischen Umwandlung und dem Anstieg der thermischen Verluste aufgrund einer größeren Receiverfläche. Wenn die Receiveraustrittstemperatur ( $Rec_{T,In}$ ) und der Heliostat-Oberflächenfehler zunehmen, sinkt gleichzeitig die optimale Empfängerfläche. Daher könnten die Ergebnisse durch eine Erweiterung des Parameterbereichs für die Empfängerfläche und mit mehr Schritten weiter optimiert werden.

In Abbildung 38 wurden die Auswirkungen auf den Jahresertrag durch Variation der  $Rec_{T,out}$  und  $sCO_{2,TIT}$  Temperaturen für die optimierten Stellio-Heliostat/Receiverflächen-Konfigurationen in Abbildung 39 bewertet. Mit steigendem  $Rec_{T,out}$  erhöht sich der Ertrag zwischen 1,6 % und 1,8 %. Für jedes betrachtete  $\Delta T$  ist ein Maximum in der jährlichen Ertragssteigerung zu erkennen. Zwei Gründe für diese Maxima: die Erhöhung von  $Rec_{T,out}$  trotz der Erhöhung des Wirkungsgrads des  $sCO_2$ -Zyklus nicht unbedingt den Gesamtertrag erhöht und dass eine kleinere Empfängerfläche in Betracht gezogen werden sollte. Wie in Abbildung 38 zu sehen ist, führt ein niedrigeres  $\Delta T$  zwischen  $Rec_{T,out}$  und  $sCO_2 TIT$  zu einem höheren Gesamtertrag. Der SoBo-Massendurchsatz, der erforderlich ist, um dieses niedrige  $\Delta T$  zu erreichen, könnte jedoch für die Wärmetauscherkonstruktion physikalisch unmöglich oder wirtschaftlich nicht realisierbar sein. Daher ist die Dimensionierung des Wärmetauschers ein begrenzender Faktor im Optimierungsprozess.

Es wurde eine parametrische Analyse zur Einführung einer Luftwand für zwei verschiedene Solarfelder, einen rechteckigen Heliostaten mit einem Oberflächenfehler von 2,5 mrad und den Stellio, durchgeführt, wobei zwei Receiver-Austrittstemperaturen berücksichtigt wurden. Bei der Stellio-Heliostatenkonfiguration mit einer kleineren Empfängerfläche erhöht die Luftwand den Ertrag um 0,63 % bei einem konservativen  $C_{A,C}$ -Wert und um 1,12 % bis 1,36 % bei einem optimistischen Wert. Aus den in Abbildung 38 dargestellten Ergebnissen ist der Einfluss des Luftwand ersichtlich.

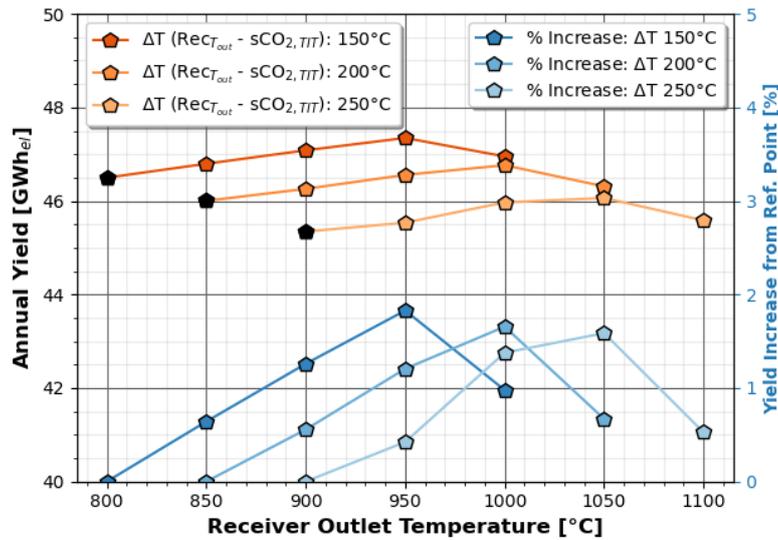


Abbildung 38: Jährlicher Ertrag bei unterschiedlichen Temperaturen von  $Re_{CT,out}$  und  $sCO_2$  TIT für die optimierten Stellio-Konfigurationen

Im Fall eines rechteckigen Heliostaten mit einer geringen Oberflächengüte ist der Jahresertrag der Konfiguration erheblich geringer als bei der Stellio-Konfiguration. Allerdings ist der Einfluss der Luftwand bei dieser Heliostatkonfiguration um 1,47 % bis 1,56 % für einen konservativen  $C_{A.C.}$ -Wert und 2,46 % bis 2,61 % für einen optimistischen Wert größer. Diese größere Verbesserung kann auf die größere Receiverfläche zurückgeführt werden, die für die Heliostatenkonfiguration mit niedriger Leistung benötigt wird (die konvektiven Verluste sind dabei insgesamt größer).

Basierend auf den vielversprechenden Ergebnissen wurden Nachfolgevorhaben entwickelt. Eines der Nachfolgevorhaben ist zum Zeitpunkt der Anfertigung dieses Berichts bereits zum Antrag aufgefördert, ein zweites Verfahren ist in der Bewertung der Projektskizze.

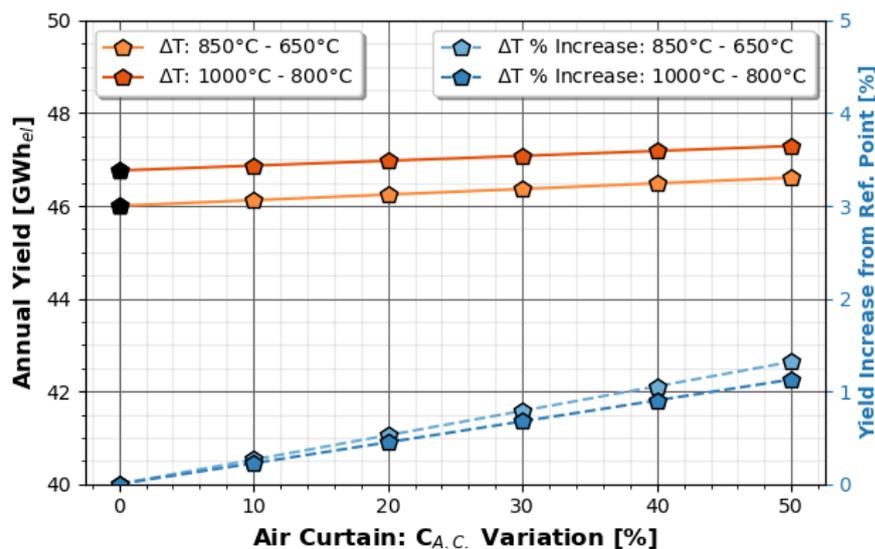


Abbildung 39: Jährlicher Ertrag bei Einführung eines Luftvorhangs in eine optimierte Stellio-Heliostat-Konfiguration mit einem  $Re_{CT,out}$  von 850°C und 1000°C und  $\Delta T$  von 200°C

## 2.2. Zahlenmäßiger Nachweis

Der zahlenmäßige Nachweis wird von den Projektpartnern separat von diesem Schlussbericht über die Zentrale Verwaltung / Buchhaltung erbracht.

## 2.3. Notwendigkeit der Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig für das Erreichen der in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse.

## 2.4. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die erzielten Ergebnisse lassen sich für die Arbeitspakete und Themen separat beurteilen:

AP2 – Heliostatenentwicklung:

Die Ergebnisse zur Heliostatenentwicklung wurden zum größten Teil im Teilprojekt C erzielt und im separaten Schlussbericht erläutert.

AP3 – Receiverentwicklung:

In diesem Arbeitspaket lassen sich die Arbeiten in drei Unterthemen kategorisieren. Die Ergebnisse zu AP3.1 wurden maßgeblich im Teilprojekt D im separaten Schlussbericht erläutert. Fraunhofer ISE hatte hierbei beraten unterstützt und hinsichtlich der Anwendbarkeit im Receiver, Formfaktoren und erforderliche Materialparameter beigetragen. Die Ergebnisse aus den Arbeiten seitens Kraftblock zeigen vielversprechende Speicherkapazitäten, während die Wärmeleitung weiterhin eine Herausforderung darstellt. Mehr hierzu wurde im AP5.2 im Rahmen der experimentellen Untersuchung erarbeitet.

Im AP3.2 wurde das Luftwandsystem optimiert und auf die Anforderungen für die Hochtemperaturanwendung angepasst und ein Prototyp wurde entwickelt. Durch die Installation und Untersuchung der Luftwand konnte erstmalig direkt der Einfluss der Luftwand auf die Abschottung bei hohen Temperaturen gemessen werden. Die Entwicklungen können direkt für Hochtemperaturanwendungen übertragen werden.

Im AP3.3 konnte lediglich ein Konzept für den Receiver erstellt werden, welches nicht mehr als praktischer Prototyp umgesetzt werden konnte. Die im Laufe des Projekts ermittelte Herausforderung der Entladung und Übertragung der gespeicherten Wärme in den Kraftwerksprozess wurde intensiv untersucht und die vielversprechendsten Verfahren wurden durch umfassende Modellierung analysiert. Neben den direkten Ergebnissen, welche in die Gesamtsystemsimulation einfließen, konnte die notwendige Größe und Effizienz abgeschätzt werden. Die Ergebnisse bilden eine Grundlage für weitere Forschungsprojekte. Eine direkte kommerzielle Verwertung ist im direkten Anschluss noch nicht möglich.

AP4 – Systemintegration

Die Arbeiten in AP4 umfassen vorwiegend die Erweiterung der Modellierungstools des Fraunhofer ISE um die entwickelten Technologien und Lösungen, namentlich die Einbindung der Luftwand, des SoBo-Konzepts und des Stellio-Heliostatenfelds. Darüber hinaus wurde das Wärmetauscherkonzept sowie der sCO<sub>2</sub>-Kraftwerksblock implementiert. Die Modelle und Komponenten stehen in Zukunft auch für andere Forschungs- und Entwicklungsprojekte zur Verfügung.

AP5 – Komponententests

Die Heliostatentests konnten nicht wie ursprünglich geplant durchgeführt werden, da die Untersuchungen in AP2 ergaben, dass die Neuerungen nicht den Mehraufwand für einen zusätzlichen Prototypen rechtfertigen. Die am bestehenden Prototyp in Jülich durchgeführten Messungen bestätigten einerseits die Oberflächengüte, andererseits konnte das Messverfahren über 3D-Laserscanning weiter erprobt und entwickelt werden. Das Fraunhofer ISE nutzt die Erkenntnisse aus der Entwicklung weiter in laufenden

und zukünftigen Projekten zur flexiblen und schnellen Vermessung von konzentrierenden Kollektoren im Feld.

In AP5.2 wurden wesentliche Materialtests und experimentelle Untersuchungen der Luftwand durchgeführt, auf welche aufgebaut werden wird. Die Materialtests zeigen eine grundsätzliche Eignung der Materialien, weisen aber auch den weiteren Entwicklungsbedarf für hohe Strahlungsdichten und erhöhte Leitfähigkeit auf. Bei der Luftwand zeigt die Erprobung und Demonstration am Prototyp den Nutzen direkt auf. Eine Einsparung von 30% der konvektiven Wärmeverluste bestätigt die erwarteten Ergebnisse und unterstützt die Produktentwicklung und die Vermarktung der patentierten Luftwandtechnologie durch die LWT GmbH.

#### AP6 – Planung und Vorbereitung zur Verwertung

Die laut der Gesamtsystembetrachtung erreichbaren Einsparungen bilden eine vielversprechende Basis für die Weiterentwicklung und Optimierung des Systems. Andererseits zeigen sie auch Potentiale der einzelnen Technologien auf. Konkret werden die erreichten Entwicklungsstufen in nachfolgenden Forschungsprojekten weiterverfolgt. Hierzu sind Projektskizzen, bzw. Anträge in Vorbereitung oder wurden bereits eingereicht.

#### LWT GmbH

Die Verwertung der Projektergebnisse bei der LWT GmbH erfolgt direkt in der Umsetzung mit Kunden. Das verbesserte Verständnis der Luftwand auf Basis der Experimente und die konkreten zahlenmäßig nachgewiesenen Einsparungen können auf Hochtemperaturanwendungen in der Industrie übertragen werden. Für den Einsatz im Bereich CSP bilden die Ergebnisse eine vielversprechende Grundlage für die weitere Entwicklung, welche nach erfolgreichem Beleg des positiven Effekts erfolgen kann. Für diese weitere Entwicklung ist ein Nachfolgeprojekt, gemeinsam mit dem Fraunhofer ISE geplant.

#### Fraunhofer ISE

Die Verwertung der Projektergebnisse durch Fraunhofer ISE besteht nicht in erster Linie in einer direkten kommerziellen Verwertung, sondern vielmehr in einer wissenschaftlichen Verwertung sowie der Verwertung in nachfolgenden Arbeiten und Projekten zur Unterstützung der Industrie.

Die wissenschaftliche Verwertung wurde bereits während des Projekts durch die Ausbildung von Nachwuchskräften begonnen. Studierende hatten die Möglichkeit im Rahmen des Projekts Praktika durchzuführen oder Abschlussarbeiten zu erstellen. Die wissenschaftlichen Ergebnisse wurden und werden auf Konferenzen und in wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht, wie in Abschnitt 2.6 aufgeführt. Die im Projekt weiterentwickelten Modelle und Softwaremodule zur Simulation und Bewertung von Turmkraftwerken und deren Komponenten können nicht nur in geförderten Projekten, sondern auch in direkten Industriaufträgen verwertet werden.

Die Projektarbeiten und erzielten Ergebnisse lieferten wichtige Grundlagen für mehrere Projekte und Projektvorschläge zu Entwicklungen im Bereich solarthermischer Turmkraftwerke, sowohl auf nationaler (BMWK) wie auch internationaler (EU) Ebene.

## 2.5. Relevante Ergebnisse von dritter Seite

Während der Projektlaufzeit wurde in der internationalen Forschungswelt an verwandten Lösungen gearbeitet. Die Ergebnisse befassen sich vor allem mit simulativer Analyse von Luftwänden an Solarturmreceivern. Im Folgenden wird eine Übersicht der bekannten Veröffentlichungen von dritter Seite gegeben, die im Laufe des Projekts entstanden sind.

- Experimental investigation on the influence of an air curtain on the convective heat losses from solar cavity receivers under windy condition  
E. Alipourtarzanagh, A. Chinnici, G. J. Nathan, and B. B. Dally  
AIP Conference Proceedings 2303, 080001 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0028630>
- Experimental insights into the mechanism of heat losses from a cylindrical solar cavity receiver equipped with an air curtain  
E. Alipourtarzanagh, A. Chinnici, G. J. Nathan, and B. B. Dally  
Solar Energy Volume 201, 1 May 2020, Pages 314-322  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.004>
- An adaptive aerodynamic approach to mitigate convective losses from solar cavity receivers  
E. Alipourtarzanagh, A. Chinnici, G. J. Nathan, and B. B. Dally  
Solar Energy Volume 224, August 2021, Pages 1333-1343  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.077>
- Air curtains for reduction of natural convection heat loss from a heated plate: a numerical investigation  
Mondal, R.; Torres, J. F.; Hughes, G.; Pye, J.  
International Journal of Heat and Mass Transfer Volume 189 15 June 2022, 122709  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122709>
- Optimal configuration of oblique air curtains for heat loss suppression from vertical solar-thermal receiver surfaces  
Mondal, R.; Torres, J. F.; Hughes, G.; Pye, J.  
Elsevier, in press. October 2022
- An air curtain surrounding the solar tower receiver for effective reduction of convective heat loss  
Wang, Q; Yao, Y.; Hu, M.; Cao, J.; Qiu, Y.; Yang, H.  
Sustainable Cities and Society Volume 71, August 2021, 103007  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103007>

## 2.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

### Abschlussarbeiten

- Mukesh Tolani. Assessment and comparison of heat exchanger concepts for heat transfer from solid bodies to supercritical carbon-dioxide based power cycles for application in an innovative solar tower plant.  
Masterarbeit am Fraunhofer ISE, Hochschule Stralsund. Januar 2022.

### Veröffentlichungen

- N. Chandler, P. Schöttl, M. Bitterling, G. Bern, T. Fluri. „Impact of Component Improvements within a Next Generation sCO<sub>2</sub> CSP Plant“. SolarPACES Conference, Sept 27-30 2022, Albuquerque NM.

- M. Bitterling, G. Bern, H. Fugmann, M. Karl, C. Cohnen, T. Sonnabend, T. Fluri.  
„Experimental Test Setup of an Airwall to Reduce the Convective Heat Loss in Solar Thermal Cavity Receivers“. SolarPACES Conference, Sept 27-30 2022, Albuquerque NM.

### Geplante Veröffentlichungen

- Geplantes Journal Paper für Anfang 2023: Der Einfluss von Wind auf die Luftwand.
- Geplantes Patent zur weiteren Reduktion von Wärmeverlusten.

### 3. Literaturangaben

- [1] T. Kodama *et al.*, "Particles fluidized bed receiver/reactor with a beam-down solar concentrating optics: 30-kWth performance test using a big sun-simulator," in *AIP Conference Proceedings 1734*, 2016, p. 120004.
- [2] K. Schwaiger, M. Haider, M. Haemmerle, P. Steiner, and M.-D. Obermaier, "Concept of a utility scale dispatch able solar thermal electricity plant with an indirect particle receiver in a single tower layout," in *AIP Conference Proceedings 1734*, 2016, p. 60004.
- [3] L. Amsbeck, R. Buck, and T. Prosin, "Particle tower technology applied to metallurgic plants and peak-time boosting of steam power plants," in *AIP Conference Proceedings 1734*, 2016, p. 70001.
- [4] R. Buck, L. Amsbeck, M. Roeger, B. Gobereit, and W. Wu, "Solar radiation receiver device for use in solar thermal power plant for transmission of energy of falling solar radiation into solid particles, has actuator actuating heat carrier medium during rotation of container against direction," DE102010063116 (A1), Deutschland DE20101063116 20101215, Jun 21, 2012.
- [5] A. J. Hunt, "Radiation Receiver," US4403601A, United States of America US243396, Sep 13, 1983.
- [6] J. Grobbel, "Development and Numerical Investigation of Reduction Strategies for Convective Heat Losses of Cavity Receivers Used in Solar Thermal Power Towers," Masterthesis, RWTH Aachen, 2014.
- [7] B. D. Kelly and R. L. Lessley, "SOLAR RECEIVER HAVING WIND LOSS PROTECTION," 4913129.
- [8] E. Franck, "Hohlraum-Solarerhitzer für ein Sonnenturmkraftwerk," DE 2948355 A1.
- [9] P. Schöttl, G. Bern, P. Nitz, F. Torres, and L. Graf, *Raytrace3D by Fraunhofer ISE: Accurate and Efficient Ray Tracing for Concentrator Optics*. [Online]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/raytrace3d.pdf> (accessed: Apr. 30 2022).
- [10] Christof Wittwer, "ColSim - Simulation von Regelungssystemen in aktiven solarthermischen Anlagen," Universität Karlsruhe, Fakultät für Architektur, 1999. [Online]. Available: [http://www.opticontrol.ethz.ch/Lit/Witt\\_99\\_PhD-UnivKarlsruhe.pdf](http://www.opticontrol.ethz.ch/Lit/Witt_99_PhD-UnivKarlsruhe.pdf)
- [11] D. L. Siebers and J. S. Kraabel, "Estimating Convective Energy Losses From Solar Central Receivers," Sandia National Laboratories SAND-84-8717, 1984.
- [12] Siala, F. M. F. and M. E. Elayeb, "Mathematical formulation of a graphical method for a no-blocking heliostat field layout," (in English), *Renew. Energ.*, vol. 23, no. 1, pp. 77–92, 2001.
- [13] N. Chandler, P. Schöttl, M. Bitterling, G. Bern, and T. Fluri, "Impact of Component Improvements within a Next Generation sCO<sub>2</sub> CSP Plant," *Proceedings of the SolarPACES conference Albuquerque, USA*, In press., 2022.
- [14] M. A. Reyes-Belmonte, A. Sebastián, M. Romero, and J. González-Aguilar, "Optimization of a recompression supercritical carbon dioxide cycle for an innovative central receiver solar power plant," *Energy*, vol. 112, pp. 17–27, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.06.013.
- [15] S. Trevisan, R. Guédez, and B. Laumert, "Thermo-economic optimization of an air driven supercritical CO<sub>2</sub> Brayton power cycle for concentrating solar power plant with packed bed thermal energy storage," *Solar Energy*, vol. 211, pp. 1373–1391, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.10.069.