

NoLimits

Test des CentRec-Partikelreceivers mit maximaler solarer Flussdichte

Schlussbericht

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Zuwendungsempfänger:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) – Institut für Solarforschung

Förderkennzeichen

03EE5004

Laufzeit des Vorhabens

Oktober 2019 – September 2022

Projektleitung DLR

Matti Lubkoll, Martina Neises-von Puttkamer, Eckhard Lüpfer

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 03EE5004 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhalt

I.	Kurzdarstellung	3
I.1	Aufgabenstellung	3
I.2	Voraussetzung bei Beginn des Vorhabens	3
I.3	Planung und Ablauf	4
I.3.1	AP1: Definition der Entwicklungsziele	4
I.3.2	AP2: Modifikation des CentRec-Partikelreceivers	4
I.3.3	AP3: Anpassung der Schnittstellen, Integration in NSTTF Infrastruktur	5
I.3.4	AP4: CentRec Receiver-Tests bei hoher Leistung an der NSTTF	5
I.3.5	AP5: Auswertung der Solartests und Modell-Validierung	5
I.3.6	AP6: Rücktransport und nachträgliche Receiver-Analyse	5
I.3.7	Ablaufplanung	6
I.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Beginn	7
I.4.1	Solarturm-Technologie	7
I.4.2	CentRec – rotierender Partikel-Receiver	7
I.4.3	verwendete Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte	9
I.4.4	Fachliteratur	10
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
II.	Eingehende Darstellung	12
II.1	Verwendung, Ergebnisse, Gegenüberstellung der Ziele	12
AP1	Spezifikationen	12
AP2	Modifikation des CentRec-Partikelreceivers	14
AP3	Testinfrastruktur	20
AP4	bis AP6 Testdurchführung, Analyse und Rücktransport	23
II.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	24
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	24
II.4	Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit gemäß Verwertungsplan	24
II.5	Fortschritt bei anderen Stellen	25
II.6	Veröffentlichungen des Ergebnisses	25

I. Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

Ziel des Projektes war der Betrieb des zuvor erfolgreich getesteten, rotierenden CentRec-Solarturm-Receivers unter deutlich höheren maximalen Betriebsbedingungen als bisher, von mindestens 2 MW thermischer Leistung bei Auslass-Temperaturen der Partikel bis zu 1000°C. Außerdem sollte der solare Testbetrieb über längere Zeit erfolgen und ein Simulationsmodell des DLR für den Receiver validiert werden.

Der erfolgreiche Test des Receivers unter den genannten Bedingungen sollte das Potenzial der Partikeltechnologie (keramische Partikel als Wärmeträgermedium) und dieses Receiver-Typs belegen und als Referenz für die nächsten Schritte bei der Markteinführung dienen. Damit wäre ein wichtiger Schritt Richtung Finanzierbarkeit von entsprechenden kommerziellen Projekten erreicht.

Für die Tests bei den hohen solaren Bestrahlungsstärken und der hohen Strahlungsleistung war Sandia National Labs (SANDIA) assoziierter Partner des Projektes. Die Tests sollten auf der Anlage in Albuquerque, USA, in den dafür zu errichtenden Aufbauten auf dem vorhandenen Solarturm durchgeführt werden. Das amerikanische Department of Energy stellte für den Projektpartner Sandia eine Finanzierung von mehr als 700.000\$ für fehlende partikel-spezifische technische Komponenten zur Verfügung.

Einzelne Aufgaben im Rahmen des Projektes waren

- Auswertung der Erkenntnisse aus den vorausgegangenen Tests des CentRec500 Partikel-Receivers am Solarturm Jülich
- Anpassungen des CentRec-Receivers für die Testphase bei Sandia
- Vorbereitung der Tests im Solarturm durch Sandia
- Testplan
- Transport nach USA und Einbau des Receivers auf dem Solarturm, Anschluss an den Partikel-Kreislauf, sowie an die Steuerungstechnik und Messtechnik
- Tests des Partikel-Receivers unter Vollast-Bedingungen bei einer Leistung vom Solarfeld von mindestens 2 MW (thermisch)
- Testbetrieb mit Solarstrahlung für mehr als 200h (2 Monate)
- Messung des Receiver-Wirkungsgrads bei Betriebstemperaturen bis 1000°C
- Validierung des Receiver-Simulationsmodells des DLR mit den Ergebnissen der Testphase
- Demontage, detaillierte Analyse und Rücktransport des Receivers zum DLR.

I.2 Voraussetzung bei Beginn des Vorhabens

In das Projekt flossen folgende bisherigen Arbeiten zum Partikelreceiver ein:

- Erfolgreicher Proof-of-Concept Test bei 10 kW und 900°C [1] in künstlichem Sonnenlicht im DLR-Sonnensimulator
- Entwicklung, Fertigung und Test des Receiver-Prototyps CentRec500 (500 kW_{th} [1]); im Solarturm Jülich bei Partikel-Temperaturen bis 965°C und einer Leistung von 100 kW

- Entwicklung, Fertigung und Test des kleineren Receiver-Prototyps CentRec300s im Sonnensimulator Synlight in Jülich
- Beteiligung von Sandia mit eigenen F&E-Arbeiten zu Receivern mit Partikel-Fallfilm.

Im Rahmen des F&E-Projektes KOSTPAR erfolgten parallel Entwicklungsarbeiten zu den Komponenten Receiver, Wärmeübertrager, thermischer Speicher, Partikel-Transportsystem, Backup-Partikelerhitzer sowie hocheffizienten Dampfprozessen.

Die technische Reife des Receiver-Systems lag zu Projektbeginn bei TRL 5. Die Entwicklungsarbeiten und Tests gingen an bisher nicht erreichte Grenzen der Betriebsbereiche und waren daher mit deutlichen Risiken verbunden. Im Speziellen liegen die Entwicklungsrisiken im Bereich der Partikeltechnologie bei den hohen Leistungsdichten und Temperaturen und damit einhergehenden thermomechanischen und konstruktiven Herausforderungen.

Das DLR Institut für Solarforschung bzw. seine Vorläufer-Einrichtungen gehört seit den 1980er Jahren zu den weltweit führenden Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet der solarthermischen Kraftwerke (CSP). Insbesondere in der Berechnung, Entwicklung und Erprobung von Solarturmsystemen mit hohen Prozessdrücken und -temperaturen sowie Hochtemperatur-Speichertechnologien ist das DLR führend. Zahlreiche verwandte Entwicklungen laufen im DLR und in anderen Einrichtungen. Das DLR betreibt außerdem seit 2011 den Solarturm in Jülich mit einem kürzlich fertiggestellten zweiten Turm, um parallele Tests mehrerer Technologien ohne zusätzliche Umbauten zu ermöglichen.

Sandia National Laboratories mit seiner Solar-Testplattform (National Solar Thermal Test Facility, NSTTF) ist eine staatliche Großforschungseinrichtung in den USA mit ebenfalls jahrzehntelangen Erfahrungen und Aktivitäten im Bereich CSP und Partikeltechnologie. In USA wird der Schwerpunkt auf den fallenden Partikelfilm gelegt (falling particle, particle curtain), der jedoch nur schlecht auf wechselnde Einstrahlungsbedingungen reagieren kann.

Der Stand der Technik ist in einigen vorausgegangenen Arbeiten gut dokumentiert. Eine Auswahl findet sich in der Literatur in Abschnitt I.4.4.

I.3 Planung und Ablauf

I.3.1 AP1: Definition der Entwicklungsziele

In Arbeitspaket 1 erfolgt die Definition der Entwicklungsziele sowie eine Abstimmung der Infrastruktur-Randbedingungen im NSTTF-Solarturm bei Sandia (National Solar Thermal Test Facility).

Die vorausgegangenen Solartests des Receivers CentRec500 im Solarturm Jülich des DLR werden dazu detailliert analysiert und Randbedingungen und notwendige Modifikationen hinsichtlich des Einsatzes des Receivers bei Sandia analysiert. Daraus werden die Spezifikationen der Betriebsparameter, Schnittstellen, Messtechnik und notwendigen Modifikationen am Receiver hinsichtlich der NSTTF Infrastruktur, sowie notwendige Anpassungen der Infrastruktur der NSTTF festgelegt. Ein Testplan wird entworfen.

I.3.2 AP2: Modifikation des CentRec-Partikelreceivers

In Arbeitspaket 2 wird der vorhandene CentRec-Partikel-Receiver an die Bedingungen der NSTTF Infrastruktur entsprechend der Spezifikationen aus AP1 angepasst. Neben dem Beseitigen von Schwachstellen des Receivers aus den vorangegangenen Versuchen am

Solarturm Jülich werden Komponenten für den Betrieb bis 1000°C und die höhere Eintrittstemperatur der Partikel von 400°C angepasst. Die elektrischen Komponenten (Antrieb und Steuerung) werden an die US-Bedingungen angepasst. Die Messtechnik wird modifiziert und kalibriert. Nach Funktionstests im DLR wird der Receiver verpackt und nach USA versendet.

I.3.3 AP3: Anpassung der Schnittstellen, Integration in NSTTF Infrastruktur

Die Schnittstellen zwischen den DLR Komponenten und der Sandia/NSTTF Infrastruktur werden nach den Spezifikationen aus AP1 detailliert geplant und umgesetzt. Dazu gehören neben den mechanischen Schnittstellen wie Aufhängung und Partikel-Zu- und Abfuhr auch die elektrischen Anschlüsse zur Verwendung in USA und messtechnische und Steuerungs-Schnittstellen.

Der Receiver wird in die NSTTF Infrastruktur integriert und ein Funktionstest (Antrieb, Sicherheitskette, Messdatenerfassung) durchgeführt.

I.3.4 AP4: CentRec Receiver-Tests bei hoher Leistung an der NSTTF

Der modifizierte CentRec-Receiver wird bei Sandia in Betrieb genommen. Dies erfolgt anfangs ohne Solarstrahlung, um die Funktion des Partikeltransports unter den Randbedingungen zu überprüfen und das Fließverhalten der Partikel im Receiver bei verschiedenen Massenströmen charakterisieren zu können. Nach schrittweiser Anhebung der Temperatur und Leistung bis zur Designleistung von 2 MW (thermisch) werden mindestens 200h Solarbetrieb durchgeführt.

I.3.5 AP5: Auswertung der Solartests und Modell-Validierung

Die Solartests werden detailliert ausgewertet und mit einem Receiver-Simulationsmodell des DLR verglichen. Dazu wird das Simulationsmodell an die Randbedingungen der Sandia-Tests angepasst. Simulationen werden auf Basis der stationären Testdaten durchgeführt und somit das Simulationsmodell validiert.

I.3.6 AP6: Rücktransport und nachträgliche Receiver-Analyse

Nach der Demontage des Receivers aus der NSTTF Infrastruktur wird der Receiver für den Versand vorbereitet und zum DLR zurückgesendet. Die Komponenten und Materialien des Receivers werden nach Demontage des Receivers detailliert analysiert. Eventuell vorhandene Problemstellen können so identifiziert und künftige Verbesserungen vorgeschlagen werden. Dabei stehen vor allem Außenmantel, Blende, Isolierung und Sammelring hinsichtlich Schäden, Verzug und Verschleiß im Blickwinkel.

I.3.7 Ablaufplanung

Im Zeitplan des Antrags war die Dauer von 3 Jahren und die zentrale Testkampagne im zweiten Jahr (Anfang 2021) vorgesehen.

	geplantes Quartal	Q4/19	Q1/20	Q2/20	Q3/20	Q4/20	Q1/21	Q2/21	Q3/21	Q4/21	Q1/22	Q2/22	Q3/22
AP-Nr.	laufendes Quartal	Q 1	Q 2	Q 3	Q 4	Q 5	Q 6	Q 7	Q 8	Q 9	Q 10	Q 11	Q 12
AP1	Spezifikation												
AP2	Receiver-Modifikation												
AP3	Test-Infrastruktur												
AP4	Receiver-Test												
AP5	Validierung Receiver-Charakteristik												
AP6	Rücktransport and Analyse Receiver												

Ein modifizierter, verlängerter Zeitplan wurde wegen sehr deutlicher pandemie-bedingter Verzögerungen bei den Projektbeteiligten erforderlich.

	2019	2020				2021				2022				2023			
Projektplan (Stand Juli 2022)	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
AP1 Spezifikationen																	
AP2 Modifikationen Receiver																	
AP3 Testinfrastruktur																	
AP4 Receiver-Test																	
AP5 Validierung der Receiver-Charakteristik																	
AP6 Analyse Receiver																	

Die folgende Tabelle 1 stellt die Aufgabenverteilung zwischen DLR und Sandia dar.

Tabelle 1: Übersicht der geplanten Aufgabenverteilung im Projekt

Bezeichnung	Aufgaben	Design/ Spezifikation	Beschaffung	Fertigung
Receiver	Receiver Modifikation	DLR	DLR	DLR
	Versand Receiver zu NSTTF	DLR	DLR	DLR
	Strahlungsschutz Receiver	DLR	NSTTF	NSTTF
	Aufhängung	SANDIA		
	Installation des Receivers	SANDIA		
Transport-System	Installation und Inbetriebnahme Becherwerk	SANDIA, mit vorhandenen Komponenten		
Partikel-Speicher	Aufbereitung vorhandener oder Neufertigung der Speicherbehälter.	SANDIA, mit vorhandenen Komponenten		
Massenstrom-Regelung	Design und Integration der Ventile	SANDIA, mit vorhandenen Komponenten		
Partikelkühler	Design und Beschaffung	SANDIA, mit vorhandenen Komponenten		
Flussdichte-Messsystem	Definition und Beschaffung Sensoren und Datenerfassung	SANDIA, mit vorhandenen Komponenten		
Testsystem	Turm, Heliostatenfeld und Datenerfassung	SANDIA, mit vorhandenen Komponenten		
Partikel	Saint Gobain, 1 mm Durchmesser, 10 t	DLR		
Testdurchführung	Receivertests	SANDIA		

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Beginn

I.4.1 Solarturm-Technologie

Solarturmkraftwerke sind wegen ihres hohen Wirkungsgrades eine aussichtsreiche Technologie zur regenerativen Energieerzeugung. Die Technologie bietet ein großes Potenzial für kostengünstige Energiespeicherung bzw. flexible Produktion mit integrierten Pufferspeichern. Um zunehmende Anteile an der erneuerbaren Energieversorgung erschließen zu können, ist eine weitere Kostenreduzierung erforderlich.

Den aktuellen Stand der Technik bei Solarturm-Anlagen stellen Systeme in der Leistungsklasse von 20 - 150MW_e dar, die Flüssigsalz als Wärmeträger- und Speichermedium verwenden (GemaSolar Spanien, Crescent Dunes USA, Noor3 Marokko, Khi Südafrika, Cosinsolar China). Die eingesetzte Salzschnelze („solar salt“, 60% NaNO₃, 40% KNO₃) hat sich auch in thermischen Speichern für Parabolrinnen-Kraftwerke bewährt. Es ist oberhalb von etwa 230°C eine glasklare Flüssigkeit, ist jedoch aus Stabilitätsgründen nur bis etwa 565°C einsetzbar. Damit können Dampfprozesse mit bis zu 540°C Frischdampf Temperatur betrieben werden. Eine Integration mit modernen sub- oder superkritischen Dampfprozessen mit Frischdampf Temperaturen von 600°C/620°C (Hoch- bzw. Niederdruckdampf) ist hier nicht möglich.

Ein wesentliches Ziel der Weiterentwicklung der CSP-Technologie ist die Erhöhung des Temperaturniveaus, um einen höheren Kraftwerkswirkungsgrad zu erreichen und die Stromgestehungskosten zu senken. Die in diesem Projekt betrachtete Technologie verwendet Partikel in Form von 1 mm großen keramischen Kugeln als Medium für die direkte Absorption der Sonnenstrahlung und den Transport zum Wärmetauscher. Partikel-Systeme werden im Rahmen des US-DoE-SunShot-Programms als eine von drei Technologie-Optionen zum Erreichen höherer Betriebsparameter und der Zielkosten der Solarstromerzeugung von 0,06 \$/kWh angesehen [6].

Die Partikeltechnologie zeichnet sich vor allem durch folgende Vorteile aus:

- Extrem weiter Anwendungstemperaturbereich von unter 0°C bis mindestens 1000°C
- Kostengünstige Receiver-Technologie (offene Receiver und direkte Bestrahlung möglich)
- Kostengünstige thermische Speicherung.

I.4.2 CentRec – rotierender Partikel-Receiver

Der CentRec Partikel-Receiver ist ein Direktabsorptions-Receiver, bei dem kleine keramische Partikel direkt solar bestrahlt und dadurch erhitzt werden. Das folgende Bild 1 zeigt das verwendete dunkel gefärbte Granulat (Partikel, Durchmesser 1 mm) sowie ein Schema der rotierenden Receiver-Trommel. Die Receiver-Trommel auf dem Turm wird von den Heliostaten im Solarfeld mit konzentrierter Sonnenstrahlung erhitzt. Die Strahlung tritt durch die stirnseitige Öffnung des nach unten geneigten, drehenden Zylinders auf die Innenseite dieser drehenden Trommel. Die Drehgeschwindigkeit ist hoch genug, dass an der Innenseite der Trommel langsam nach unten fließende Partikel an die Zylinderwand gedrückt bleiben. Dort werden die direkt bestrahlten Partikel heißer als die dahinter liegende metallische Trommel. Durch dieses Konzept werden nur geringe Mengen hochtemperaturfester Materialien benötigt, und entsprechend sinken die spezifischen Receiver-Kosten im Vergleich zu anderen Bauarten. Gleichzeitig sind Temperaturen der austretenden Partikel von 1000°C erreichbar.

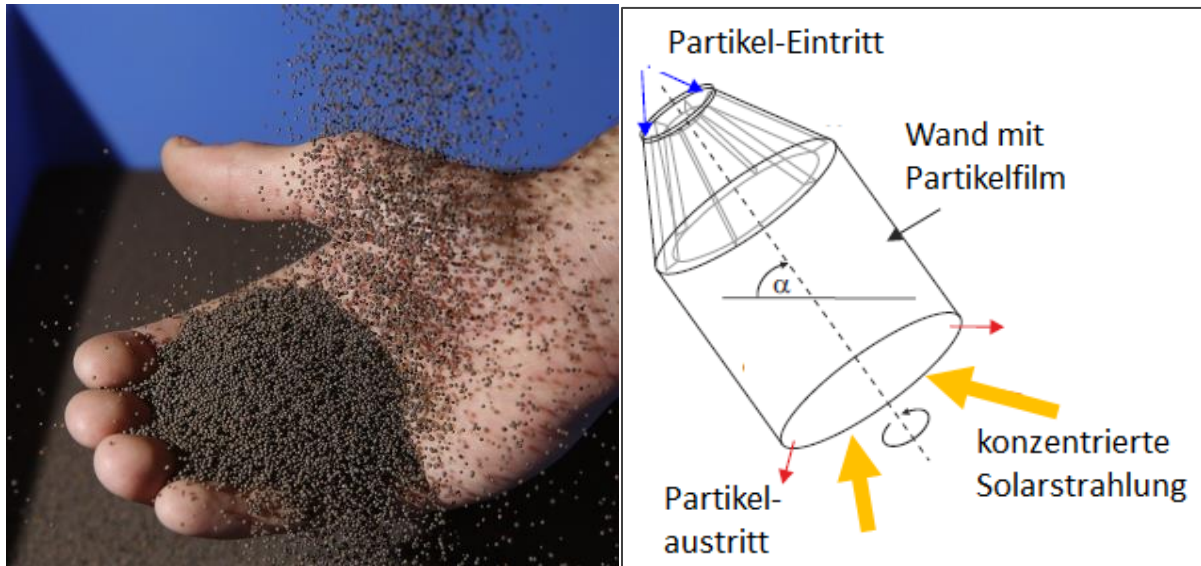


Bild 1: Keramische Bauxit-Partikel (links), Schema des Zentrifugal-Receivers CentRec (rechts)

Durch die Direktabsorption werden Übertemperaturen an Bauteilen vermieden, was zu deutlich geringerer thermischer Abstrahlung und einem verbesserten Wirkungsgrad führt. Dieses Direktabsorptions-Konzept erlaubt auch dadurch wesentlich höhere solare Strahlungsflussdichten in der Receiver-Apertur, was ebenfalls höhere Receiver-Wirkungsgrade möglich werden lässt.

Die Entwicklung des rotierenden CentRec Partikel-Receivers hat über mehr als ein Jahrzehnt bereits relevante Niveaus erreicht: Nach einem kleinen Technikumsmaßstab (10 kW_{th}, 900°C) [1] folgte im Frühjahr 2018 der erfolgreiche Test des 500 kW-Prototyps („CentRec500“) im Solarturm Jülich (Bild 2). Aufgrund der speziellen Einbausituation in der niedrigen Testplattform des Solarturms in Jülich konnte der Receiver nur im unteren Teillastbereich bei Einstrahlungsleistung bis 300 kW betrieben werden, der erreichbare Wirkungsgrad konnte nicht demonstriert werden. Das Potenzial der Technologie (hohe Leistung, hohe Temperatur, hoher Wirkungsgrad) war also noch nicht verifiziert.

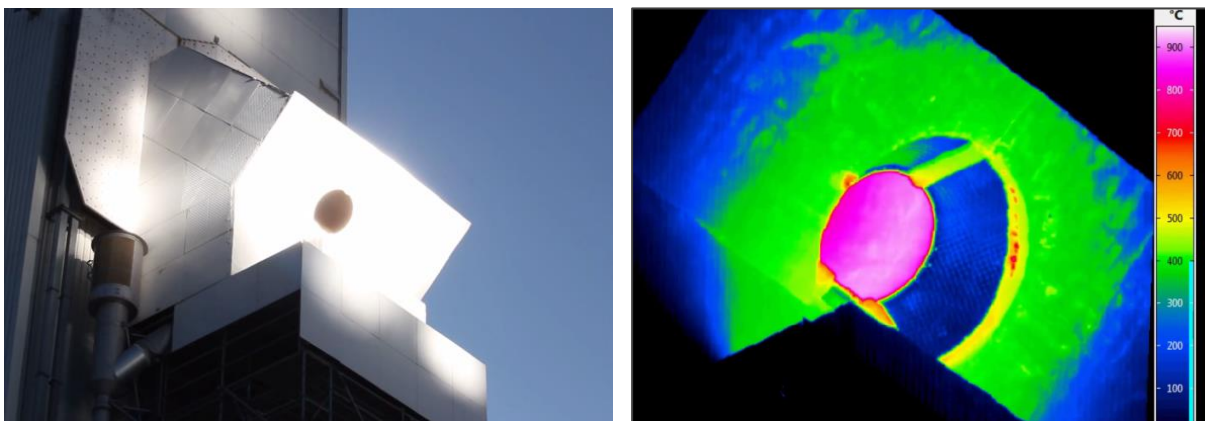


Bild 2: Test des CentRec500 im Solarturm Jülich (links), und Infrarot-Bild im Solar-Betrieb (rechts)

Im Projekt NoLimits war nun vorgesehen, das CentRec-Partikelsystems in den Solarturm von Sandia zu integrieren. Sandia führt seit mehreren Jahren eigene Entwicklungsarbeiten mit Partikelsystemen durch und hatte daher bereits wesentliche Teile der notwendigen Infrastruktur an ihrem Solarturm zur Verfügung. Vor allem aber ermöglichen die dortige Einbausituation und die Leistung des Heliostatfeldes einen Betrieb des Receivers bei hohen

solaren Flussdichten und damit bei hoher Receiver-Leistung. Bild 3 und Bild 4 zeigen schematisch den Testaufbau sowie die Solarturm-Testanlage von Sandia.

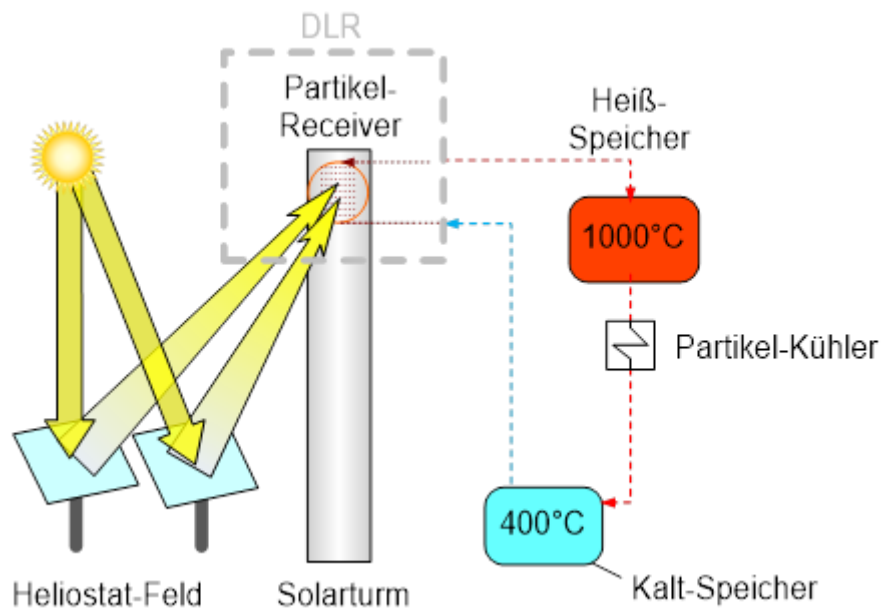


Bild 3: Schema des geplanten Solarturm-Testsystems bei Sandia mit Partikel-Zirkulation und integriertem CentRec-Receiver des DLR



Bild 4: Solarturm-Anlage (National Solar Thermal Test Facility, NSTTF) von Sandia, Albuquerque USA

I.4.3 verwendete Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte

Es kommt die CentRec® Technologie des DLR zur Anwendung. Der CentRec Receiver (Zentrifugal-Partikelreceiver) dient der Erhitzung kleiner keramischer Partikel. Der rotierende Receiver ist auf dem Solarturm installiert und nach unten geneigt. Die konzentrierte Solarstrahlung aus dem Heliostatfeld tritt durch eine Öffnung am unteren Ende des Receivers ein. Er besteht aus einem rotierenden Zylinder mit Innenisolierung. Durch die Rotation werden von oben axial einfließende Partikel an die Zylinderwand geführt und bilden eine geschlossene, optisch dichte, mehrlagige Partikel-Schicht auf der Innenseite des

Receiver-Hohlraums. Durch die Schwerkraft werden die Partikel während der Drehung in Richtung Receiver-Auslassöffnung bewegt. In dieser Bewegung im Receiver werden die Partikel mit konzentrierter Solarstrahlung beaufschlagt, die sie absorbieren und sich dabei stark erhitzen. Durch passende Wahl der Drehzahl und damit des Verhältnisses zwischen Zentrifugal- und Schwerkraft kann die Verweilzeit der Partikel im Bereich der Solarstrahlung gesteuert werden. Dies ermöglicht in Verbindung mit einer kontrollierten Partikelzufuhr eine gewünschte Austrittstemperatur über einen sehr breiten Betriebsbereich auch bei wechselnder Einstrahlung zu erreichen. Am Receiver-Auslass werden die heißen Partikel gesammelt und über isolierte Rohrleitungen zu einem Speicherbehälter weitergeführt. Die in den Partikeln gespeicherte Wärmeenergie kann zur Stromerzeugung oder für Prozesswärme-Anwendungen genutzt werden. Abgekühlte Partikel werden wieder zum Receiver gefördert.

Für die CentRec-Technologie hat die HelioHeat GmbH, Offenburg, eine nicht-exklusive Lizenz vom DLR erworben, die auch für die neuen Eigentümer, die Amerikanische Muttergesellschaft Heliogen, von Interesse war.

Die Technologie wurde zwischenzeitlich auch in einer Pilotanlage am Solarturm Jülich installiert, für die HelioHeat den Receiver liefert. Diese Pilotanlage des DLR wird in 2023 in Betrieb gehen.

I.4.4 Fachliteratur

- [1] Wu, Wei and Trebing, David and Amsbeck, Lars and Buck, Reiner and Pitz-Paal, Robert (2015) Prototype Testing of a Centrifugal Particle Receiver for High-Temperature Concentrating Solar Applications. Journal of Solar Energy Engineering, 137 doi.org/10.1115/1.4030657
- [2] Ebert M., Amsbeck L., Jensch A., et al. Upscaling, Manufacturing and Test of a Centrifugal Particle Receiver. ASME. Energy Sustainability 2016, V001T04A007. [doi:10.1115/ES2016-59252](https://doi.org/10.1115/ES2016-59252)
- [3] Miriam Ebert: CentRec Zentrifugal-Partikelreceiver: Vom Labor bis zum Technikumsmaßstab. Sonnenkolloquium Köln 2017 www.dlr.de/sf/Portaldaten/73/Resources/dokumente/soko/soko2017/presentationen/DLR-Sonnenkolloquium2017_CentRec_-_Miriam_Ebert.pdf
- [4] DLR Solarforschung: Direktabsorbierende Receiver dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-10695/18601_read-43763/
- [5] 6. Energieforschungsprogramm, Kapitel 4, Abschnitt 4.5 und Unterabschnitt 4.5.3.
- [6] Mehos, M. et. al., Concentrating Solar Power Gen3 Demonstration Roadmap, Technical Report NREL/TP-5500-67464, January 2017 nrel.gov/docs/fy17osti/67464.pdf
- [7] Ho, C.K., 2016, A Review of High-Temperature Particle Receivers for Concentrating Solar Power, Applied Thermal Engineering, 109(Part B), p. 958-969. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.103
- [8] Ho, C.K., J.M. Christian, J. Yellowhair, K. Armijo, and S. Jeter, 2016, Performance Evaluation of a High-Temperature Falling Particle Receiver, in ASME Power & Energy Conference, Charlotte, NC, June 26-30, 2016 doi.org/10.1115/ES2016-59238
- [9] Wu, W., L. Amsbeck, R. Buck, R. Uhlig, and R. Ritz-Paal, 2014, Proof of concept test of a centrifugal particle receiver, Proceedings of the SolarPaces 2013 International Conference, 49, p. 560-568 doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.060

- [10] Johnson, Evan; Hicdurmaz, Serdar; Buck, Reiner; Hoffschmidt, Bernhard (2022) *Beam Radiation Penetration in Particle Beds for Heat Transfer Modeling of a Centrifugal Solar Particle Receiver*. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. Elsevier. doi: [10.1016/j.jqsrt.2022.108403](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2022.108403). ISSN 0022-4073.
- [11] Ebert, Miriam; Lubkoll, Matti; Bertoni, Gabriele; Salladini, Annarita; Amsbeck, Lars; Alfieri, Lucia; Guillick, Antoine; Smolders, Manuel; Misse, Kevin; Hertel, Julian; Akcura, Deniz; Duermeier, Thorsten; Schewtschenko, Wladislaw; Wu, Wei (2021) *Detailed Engineering of a High Storage Density Solar Power Plant for Flexible Energy Systems*. ASME ES 2021, 16.-18.06.2021, elib.dlr.de/189990
- [12] Buck, Reiner (2021) *G3P3 Techno-Economic Analysis of UpScaled CentRec® Receiver*. elib.dlr.de/140177
- [13] Frantz, Cathy; Buck, Reiner; Amsbeck, Lars (2020) *Design And Cost Study Of Improved Scaled-Up Centrifugal Particle Receiver Based On Simulation*. Journal of Energy Resources Technology. American Society of Mechanical Engineers (ASME). ISSN 0195-0738 ASME 2020 - 14th International Conference on Energy Sustainability ES 2020, 8.-10. June 2020, Denver, CO, USA. doi: [10.1115/ES2020-1626](https://doi.org/10.1115/ES2020-1626).
- [14] Gobereit, Birgit; Amsbeck, Lars; Happich, Christoph; Schmücker, Martin (2020) *Assessment and improvement of optical properties of particles for solid particle receiver*. Solar Energy (199), Seiten 844-851. Elsevier. doi: [10.1016/j.solener.2020.02.076](https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.076). ISSN 0038-092X.
- [15] Ebert, Miriam; Amsbeck, Lars; Buck, Reiner; Rheinländer, Jens; Schlögl, Bärbel; Schmitz, Stefan; Sibus, Marcel; Uhlig, Ralf (2019) *Operational Experience of a Centrifugal Particle Receiver Prototype*. In: 24th SolarPACES International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPACES 2018, 2126 (030018), 030018-1. AIP Publishing. SolarPACES 2018, 2.-5. Oct. 2018, Casablanca, Morocco. doi: [10.1063/1.5117530](https://doi.org/10.1063/1.5117530). ISSN 0094-243X. elib.dlr.de/124511/

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Bearbeitung des Projektes erfolgte in Zusammenarbeit mit der NSTTF (National Solar Thermal Test Facility) <https://energy.sandia.gov/programs/renewable-energy/csp/nsttf/> von Sandia in Albuquerque, USA. Das vom DoE parallel für Sandia geförderte Projekt stand unter dem Titel „Development and Full Load Demonstration of a >900°C Solid Particle Receiver for Concentrating Solar Power Applications“. Damit wurde vor allem der Austausch auf dem Gebiet des Handlings von Partikeln für Solar-Receiver gestärkt. Außerdem ermöglicht diese Anlage höhere Leistung im Betrieb mit Solarstrahlung als andere in Frage kommende Anlagen mit Solarturm und Heliostatenfeld.

Der Kooperationsvertrag zwischen DLR und Sandia wurde über das Projektende hinaus nochmal verlängert, um die Schwelle zu künftigen Kooperationen dieser Art in dem Fachgebiet vorläufig niedrig zu halten.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung, Ergebnisse, Gegenüberstellung der Ziele

AP1 Spezifikationen

Ziel der Tests des CentRec Partikel-Receivers war es, die bisher nur berechnete hohe Leistungsfähigkeit des Receivers unter Beweis zu stellen. Zu Beginn des Projektes war dafür der zuvor auf dem Solarturm Jülich getestete CentRec500 mit 1,13 m Aperturdurchmesser, also 1,0 m² Aperturfläche vorgesehen. Bild 5 zeigt ein Schnittbild eines CentRec-Receivers. Die Solarstrahlung aus dem Heliostatfeld tritt durch die untere Öffnung der drehenden Trommel in den Receiver ein und wird von der Partikelschicht an der Innenwand absorbiert. Die Partikel werden am oberen Ende des Zylinders durch einen Verteiler zugeführt, der die Partikel zur Innenwand leitet. Dort werden die Partikel durch die Zentrifugalkraft an der Wand gehalten. Unter Einfluss der Schwerkraft bewegen sie sich allmählich abwärts. Die Verweilzeit hängt von der Drehgeschwindigkeit des Receivers ab. Die aufgeheizten Partikel verlassen am unteren Rand die drehende Trommel und werden von einem stehenden Ring gesammelt (Sammelring) und nach unten abgeführt.

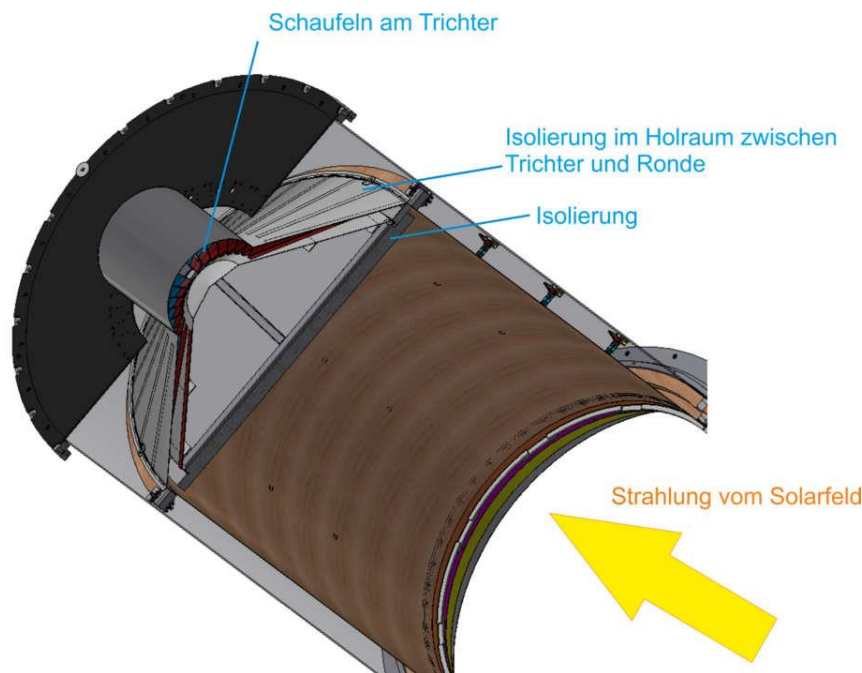


Bild 5: Schnittbild CentRec-Receiver

Im Rahmen der Tests waren Partikelströmungsmengen von 3-4 kg/s vorgesehen. In der kommerziellen Anwendung ist es das Ziel, hohe Temperaturen von 900 bis 1000°C („Vorlauf“) zu erreichen. Die Rücklauftemperatur hängt stark von den nachfolgenden thermodynamischen Anlagen, also den Wärmetauschern ab. Typischerweise wird eine Rücklauftemperatur von etwa 300°C erwartet.

Diese Vorbetrachtungen sind wesentlich für die Auslegung der Partikelförderanlage, die bei Sandia gebraucht wurde. Dort wurden zunächst 4 kg/s und Rücklauftemperaturen von 400°C spezifiziert. Der Kühler für die heißen Partikel muss in der Lage sein, auch bei kontinuierlichem Betrieb die vom Receiver aufgenommene Leistung von >2 MW abzuführen. Dafür kamen wassergekühlte und luftgekühlte Varianten in Betracht.

Außerdem sind Pufferbehälter und Regelorgane für den Partikelmassenstrom erforderlich, die einen sicheren und kontinuierlichen Betrieb des Receivers ermöglichen.

Im Betrieb sind vor allem Messungen des Massenstroms, der Partikeltemperatur und der Bauteiltemperaturen im drehenden Receiver erforderlich, um das Betriebsverhalten charakterisieren und auswerten zu können. Die drehende Receiver-Trommel wird dazu mit Funkmodulen ausgestattet, die akkubetrieben die Messsignale im Betrieb aufnehmen und an die Datenerfassung übermitteln.

Auch um die Receiver-Öffnung herum herrscht noch hohe Bestrahlungsstärke, für die entsprechend robuste Keramikplatten und auch wassergekühlte Varianten zu untersuchen sind.

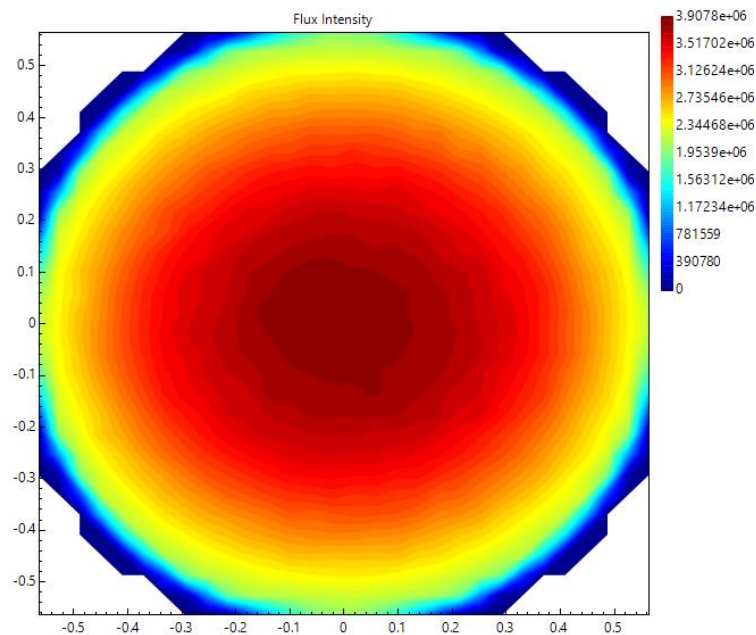


Bild 6: Berechnete Flussdichteverteilung auf dem Sandia-Turm bis 4 MW/m²

Alle Versuchsspezifikationen wurden mit den Mitarbeitenden des Projektpartners bei Sandia abgestimmt und schrittweise festgelegt.



Bild 7: Untersuchungen am CentRec500

Im Rahmen des Arbeitspakets wurde der CentRec500 Receiver aus der Einlagerung in Jülich an den DLR Standort Stuttgart geholt. Dort wurde er im Gelände der Materialprüfanstalt (MPA) der Uni Stuttgart untersucht. Es wurden auch Werkstoff-Untersuchungen und zerstörungsfreie Prüfungen an Bauteilen durchgeführt. Die

notwendigen Modifikationen des Receivers zum Einsatz im NSTTF Solarturm wurden definiert.

Tabelle 2: Vergleich der Centrec-Receiver 300S und 500

	unit	CentRec300S	CentRec500
Aperture area	m ²	0.28	1
Aperture diameter	m	0.6	1.13
Peak load in test campaign	kW	~250	<500
Design load	kW	600	2500
Part load in test campaign	%	~42	<20
Design temperature	°C	900	1000

Die Analysen zeigten nach und nach, dass der CentRec500 für den Testbetrieb bei Sandia aufgrund von festgestellten Mängeln und Schäden einschließlich Transportschäden an der Lagerung nicht einsetzbar sein würde. Aus diesem Grund wurde der deutlich kleinere Receiver CentRec300S, der zuvor in Versuchen im DLR Sonnensimulator SynLight in Betrieb gewesen war, als Kandidat für die Tests bei Sandia weiter untersucht. Tabelle 2 zeigt den Größenvergleich der beiden Receiver.

AP2 Modifikation des CentRec-Partikelreceivers

Aus der Analyse des CentRec500 Receivers sind folgende Erkenntnisse hervorgegangen:

- I. Der Strahlungsschutz um die Receiver-Apertur muss für den Betrieb des Receivers bei Sandia neu entwickelt werden, da ein bestehender Strahlungsschutz für die hohen Flussdichten nicht geeignet ist.
- II. Neuaufbau Receiver-Auslass: Die Inspektion hat ergeben, dass die Innenstruktur des CentRec Receivers im Auslassbereich Schäden an der sogenannten „Blende“ vorweist. Die Blende wurde ursprünglich verbaut, um einen Betrieb mit dicken Partikelschichten zu ermöglichen, was mittlerweile nicht mehr verfolgt wird; die Blende ist somit überflüssig. Während der wichtige innere Zylinder des Receivers („Inliner“) schadenfrei erscheint, sollte der Receiver um den Bereich der Blende gekürzt werden, da sie zum Betrieb nicht mehr benötigt wird.
- III. Entwicklung Sammelring: Der Partikelsammelring liegt zwischen dem Inliner und dem Strahlungsschutz am unteren Ende der Receivertrömmel. Ein Neubau des Sammelrings war vorgesehen, um bekannte Leckagemassenströme von Partikeln zu unterbinden. Weiterhin sollte die Aperturöffnung des Receivers vergrößert werden und der Wegfall der Blende am Receiverabschluss konstruktiv integriert werden.
- IV. Reparatur einer Schweißnaht: Der Inliner des Receivers wurde im Solarturm Jülich in einer Reparaturmaßnahme an den Trichter angeschweißt, nachdem Schrauben versagt hatten. Diese Schweißnaht hat während des Betriebs im Solarturm Jülich jedoch ebenfalls teilweise versagt. Eine genaue Analyse durch die Materialprüfanstalt der Universität Stuttgart sollte die anschließende Reparatur unterstützen.
- V. Aufhängung des Inliners im äußeren Receivermantel: Die zum Aufnehmen der thermischen Dehnung konstruierte Doppelfederaufhängung des Inliners im Receivermantel hat versagt. Die Kinematik der Doppelfederaufhängung hatte sich

verklemmt, wodurch höhere Lasten in den heißen Inliner eingeleitet wurden. Deformationen des Inliners wurden sichtbar.

- VI. Partikelleckagen und Flanschverbindungen: Es hat sich gezeigt, dass zahlreiche Verbindungen in der Partikelführung nicht dicht genug waren und Partikel unerwünschter Weise in Spalten und Isolationen eingedrungen sind. Es waren sowohl dünne Blechstreifen zur Abdichtung von Spalten als auch mechanisch robust ausgelegte Flanschverbindungen betroffen. Konstruktive Änderungen wurden erforderlich.

Untersuchungen am Prüfstand im DLR zeigen, dass der Partikelfilm bei geringem Massenstrom weniger homogen ist. An Stellen mit zu dünnem Partikelfilm kommt es zu erhöhter Temperatur der metallischen Receiver-Innenwand (Inliner) mit der Gefahr von thermomechanischen Spannungen. Umfangreiche Messungen wurden mit variierten Zuführungen der Partikel in die drehende Trommel durchgeführt. Die Arbeiten an weiteren Varianten der Partikelzufuhr (Geometrie, Durchfluss) und den Einflüssen auf die Partikel-Schichtdicke werden fortgesetzt.

Die Spannungen des Inliners (Receiver-Innenwand) wurden mit Laserscans untersucht. Es zeigte sich eine Schrumpfung um bis zu 2 mm im Radius (Bild 8), die auf die thermischen Spannungen im heißen Receiverbetrieb zurückgeführt werden.

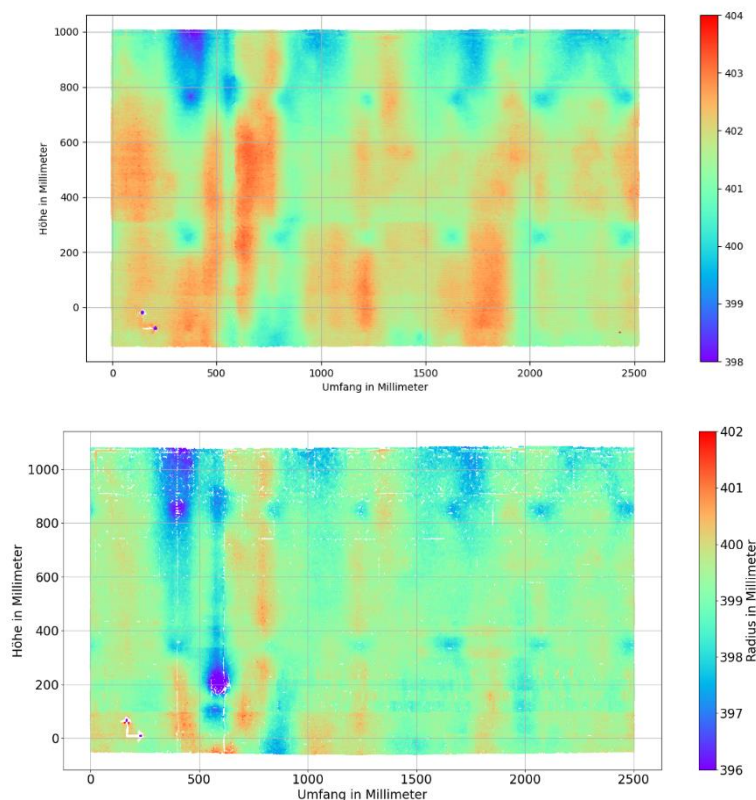


Bild 8: Schrumpfung Inliner Radius -2 mm

Bild 9 zeigt in Schliffbildern von Materialproben, wie hohe Temperaturen beim verwendeten Material Inconel 617 eine Zunahme der Korngröße bewirken. Die Anzahl der Körner nimmt dadurch ab, und immer weniger Korngrenzen erhöhen die Dichte bzw. das Material schrumpft.

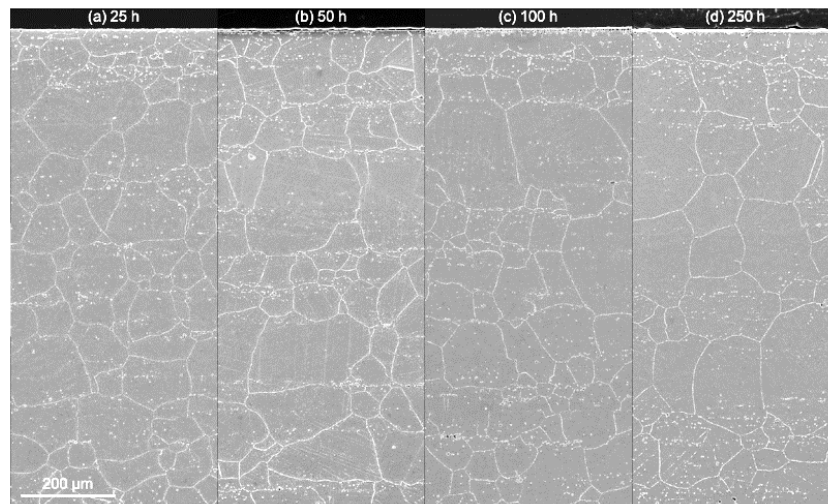


Bild 9: Zunahme der Korngröße beim thermischen Versuch mit Inconel 617

Bild 10 zeigt weitere Materialanalysen im Elektronenmikroskop an der Inconel-Oberfläche. Im Inneren und an der Außenseite bilden sich Oxidschichten. Innere Oxidschichten enthalten Aluminiumoxid, während äußere Oxidschichten Chromoxid und Titanoxid aufweisen. Je höher die Temperatur ist und je länger die Zeit, desto dicker werden die Oxidschichten. Auswirkungen von Abplatzen in der mechanischen Belastung sind noch nicht geklärt.

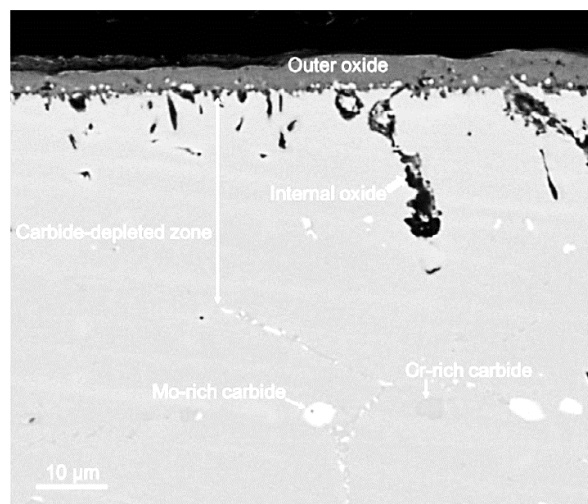


Bild 10: Korrosion beim thermischen Versuch mit Inconel 617

Künftig ist ein Anlassen des Bauteils (Wärmebehandlung des Inliners) vorgesehen, um diese Effekte deutlich zu reduzieren. Alternativ kommen auch gewalzte Bleche in Frage, die weniger anfällig sind.

Die in Bild 8 dargestellten Unebenheiten der Receiver-Innenwand führen zu unerwünschten Schwankungen in der Schichtdicke der Partikellagen im Receiver-Betrieb. Daher wurde an Methoden gearbeitet, die Partikelströmung messtechnisch zu erfassen. Parallel dazu wurde in einem anderen Vorhaben die Strömung der Partikel mit detaillierter Modellierung simuliert.

Eine Art der Untersuchung der Partikelschichtdicke erfolgte an einem Receiver-Mockup bei annähernd Raumtemperatur. Hier wird mit einem Infrarotstrahler die Innenseite des Receivers beheizt, um dann mit einer Infrarot-Kamera die Temperaturverteilung auf den strömenden bzw. drehenden Partikeln und der ggf. sichtbaren Inliner-Metallfläche zu beobachten. Bild 11 zeigt den Versuchsaufbau mit drehendem Receiver und dem Infrarot-Kamerasystem, Bild 12 zeigt ein Detail bei leuchtendem Strahler.

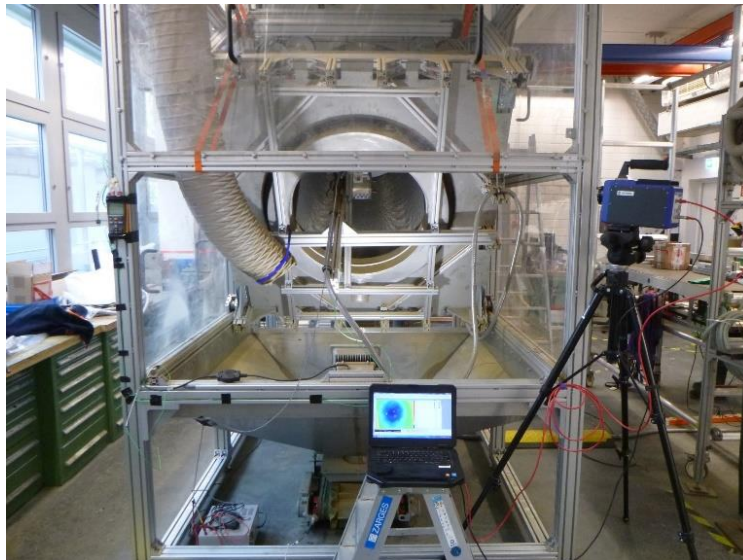


Bild 11: Versuchsaufbau im DLR mit eingebautem thermischem Strahler für Infrarot-Untersuchungen an der Partikel-Schichtdicke



Bild 12: Infrarot-Untersuchung Partikelfilm

Die Ergebnisse dieser Messungen werden erneut verglichen mit den Ergebnissen von 3D-Messungen mit einem Laserscanner in Bild 13.

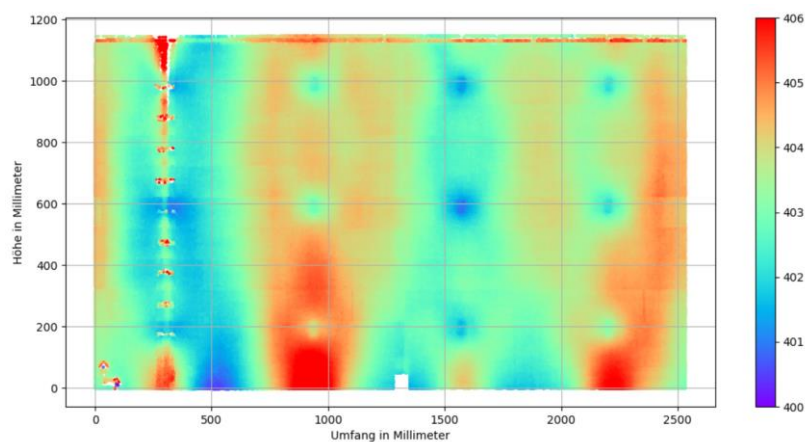


Bild 13: Laser-Scan der Receiver-Innenwand

Wesentlich detaillierter sind die Messungen mit mehreren Kameras im Innern des Receivers, die die Partikelfront-Verläufe über der Zeit aufnehmen können. Bild 14 zeigt ein

zusammengesetztes Bild dieser Fronten, wie sie sich im Receiver abwärts bewegen. Es wurden Bilderkennungsmethoden entsprechend angepasst.

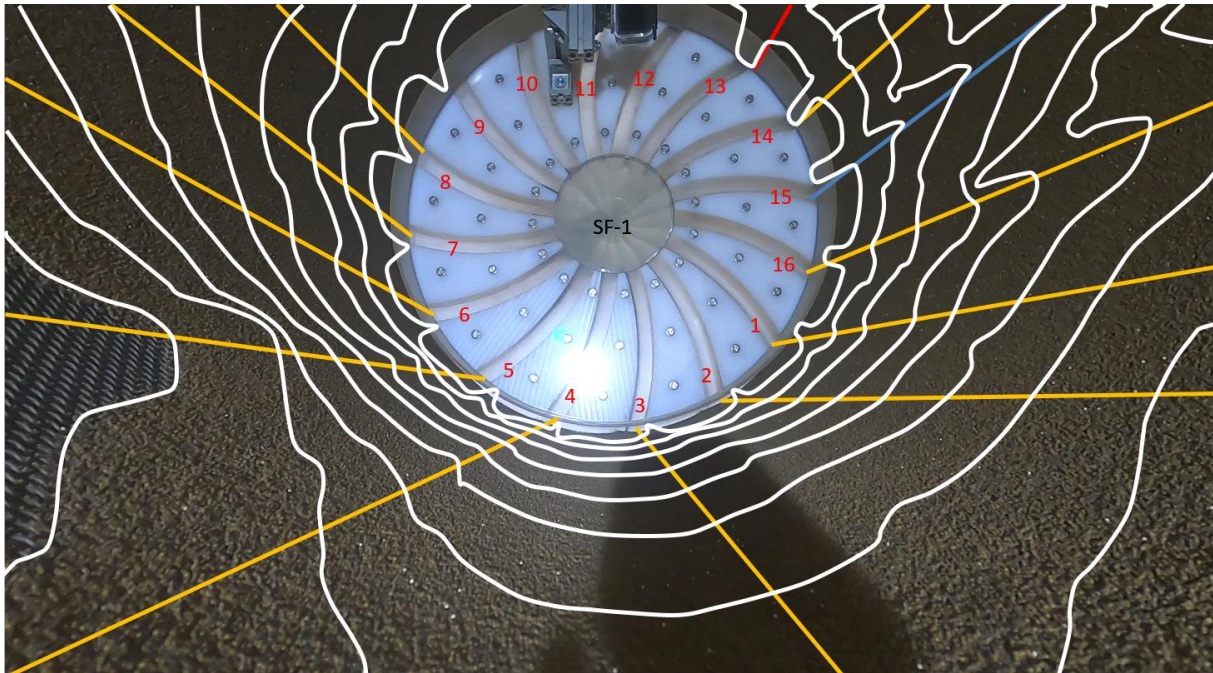


Bild 14: Partikel-Fließgeschwindigkeit aus Kamera-Auswertungen

Weitere Messungen wurden mit Tracer-Partikeln durchgeführt, eingestreuten weißen Partikeln, deren Bewegung mit particle image velocimetry (PIV) ebenfalls berührungslos aufgezeichnet wird. Der Vergleich der erhaltenen Messdaten dient der Beurteilung, welche Anforderungen an die Rundheit und Oberflächeneigenschaften der Receiver-Innenseite gestellt werden müssen, um einen effizienten Receiver-Betrieb zu erreichen.

Außerdem wurde der Einfluss der Struktur von glatter oder mit Gittern und anderen Strukturen versehener Receiver-Innenwand untersucht. Dabei sind Konstruktionen zu wählen, die unter den thermischen Beanspruchungen eine hohe Stabilität, Homogenität und Lebensdauer aufweisen.

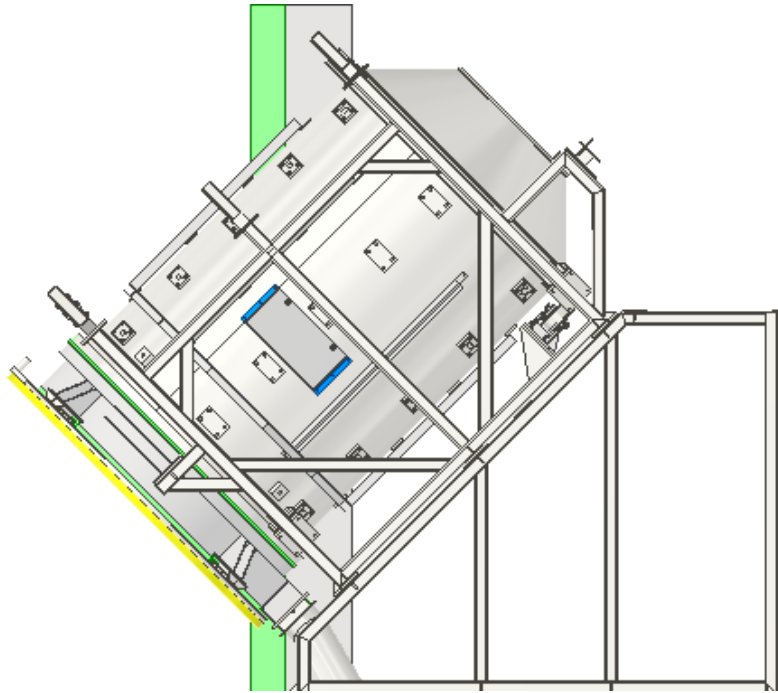


Bild 15: Skizze des aktualisierten Centrec Receiver-Designs 1600T in Betriebsposition

Das neue Design des CentRec 1600T konnte die Erkenntnisse aus den Untersuchungen zu einem großen Teil berücksichtigen. Materialien, Oberflächen, Übergänge, Lagerkonstruktionen und Isolation wurden in Auslegung und Konstruktion aktualisiert und damit ein neuer Stand der Technik des CentRec erreicht.

Aus den Arbeiten an der Partikelzuführung mit verschiedenen Designs an der Rückwand des Receivers (Doppeltrichter mit Leitblechen, viele gekrümmte Rohre, Einzelrohr) wurde auf der Basis von Versuchen im DLR die Lösung mit einem einzelnen Zuführrohr ausgewählt. Es ermöglicht die hohen Massenströme bis zu 20 kg pro Sekunde, die für hohe Rücklauftemperaturen angepasst sind. Die Unsicherheit, dass möglicherweise eine größere Menge an Partikeln aus dem Film und der Apertur herauspringen und verloren gehen, wurde als gering genug eingestuft.

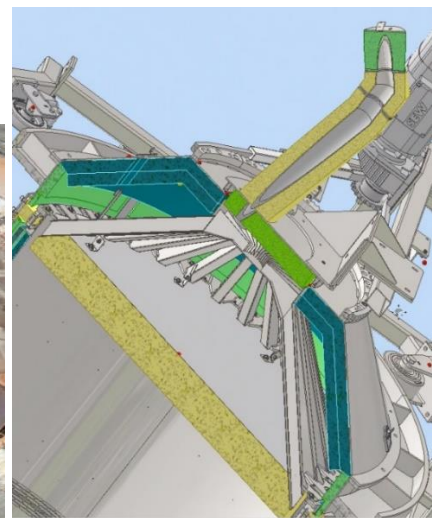


Bild 16: Bisheriges und geändertes Design der Partikelzuführung in die drehende Trommel

Die Fertigung für den Receiver CentRec 1600T für die Tests auf der Turmanlage bei Sandia wurde begonnen.



Bild 17: Gefräste Oberfläche des Inliners im CR1600T

AP3 Testinfrastruktur

Die Planungen für den Prüfstand auf der Anlage bei Sandia schritten im Detail voran. Sandia hat ein Rohrbündel-Design des kanadischen Lieferanten Solex für die Rückkühlung der Partikel beauftragt (Bild 18). Weitere Schlüsselkomponenten sind der letztlich durch Heliogen gefertigte Centrec-1600T-Receiver und das Partikelförder-System (Becherwerk). Bei Sandia wurde an Details der Integration des Receivers in den Turm gearbeitet. Dabei waren statische und dynamische Lasten, Verfahrwege, Zugänglichkeit und Einbausituation zu berücksichtigen. Für die hohen Strahlungsflussdichten um den Receiver herum wird ein zusätzlicher Schutz benötigt, für den nicht feststand, ob er eine Wasserkühlung benötigen wird. Im DLR wurden dazu Berechnungen mit Strahlverfolgungsprogrammen durchgeführt, um die geeigneten technischen Schlüsse zu ziehen.

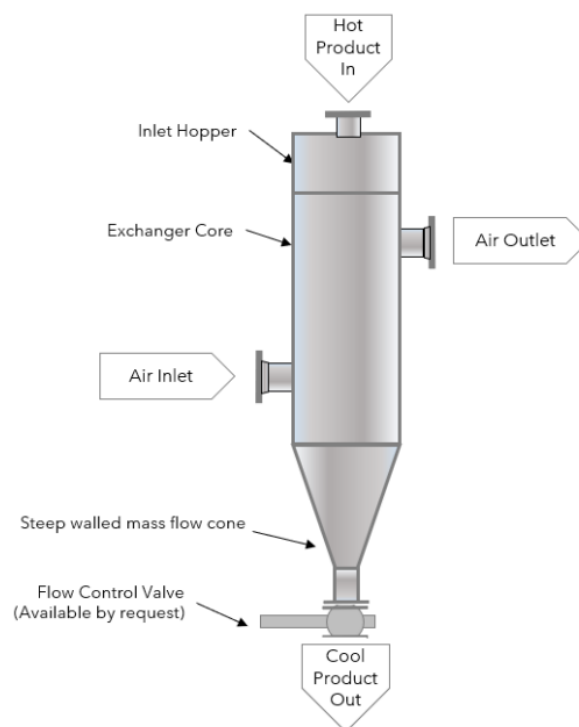


Bild 18: Luftgekühlter Partikel-Kühler (Sandia)

Das folgende Bild 22 zeigt ein Schema der verfahrenstechnischen Integration des CentRec-Receivers für die Tests auf dem Solarturm von Sandia.

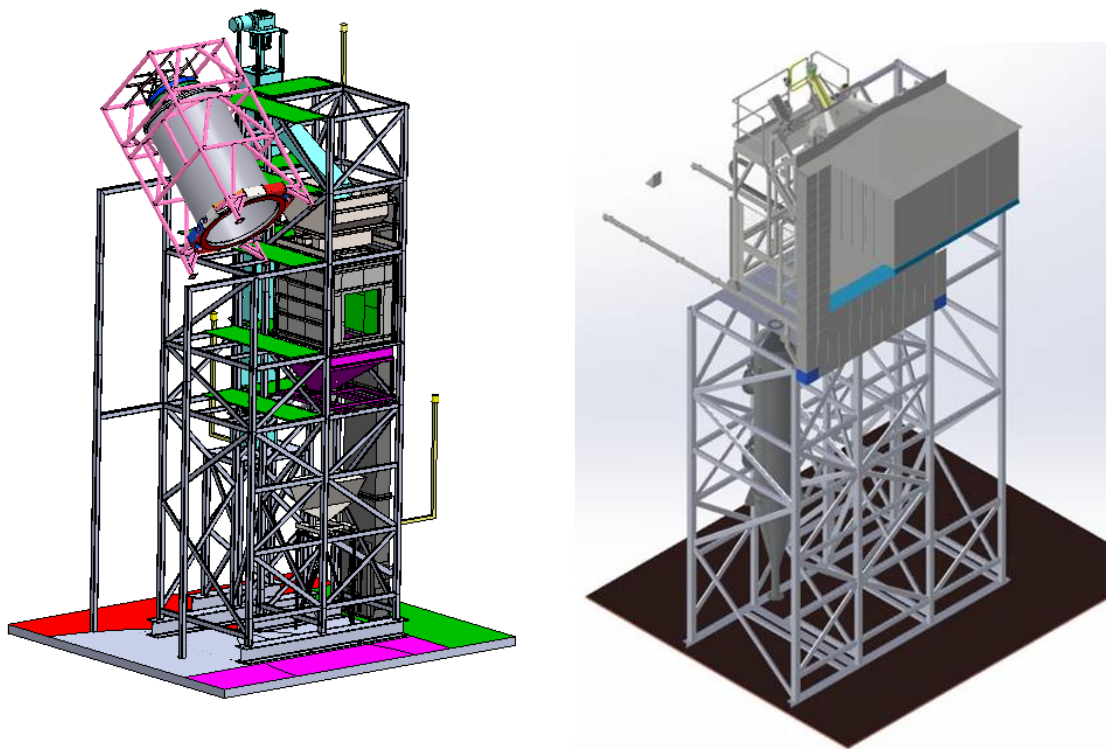


Bild 19: Sandia Solar-Turm mit skizzierten CentRec (links) und mit verkleideter Testplattform (rechts)

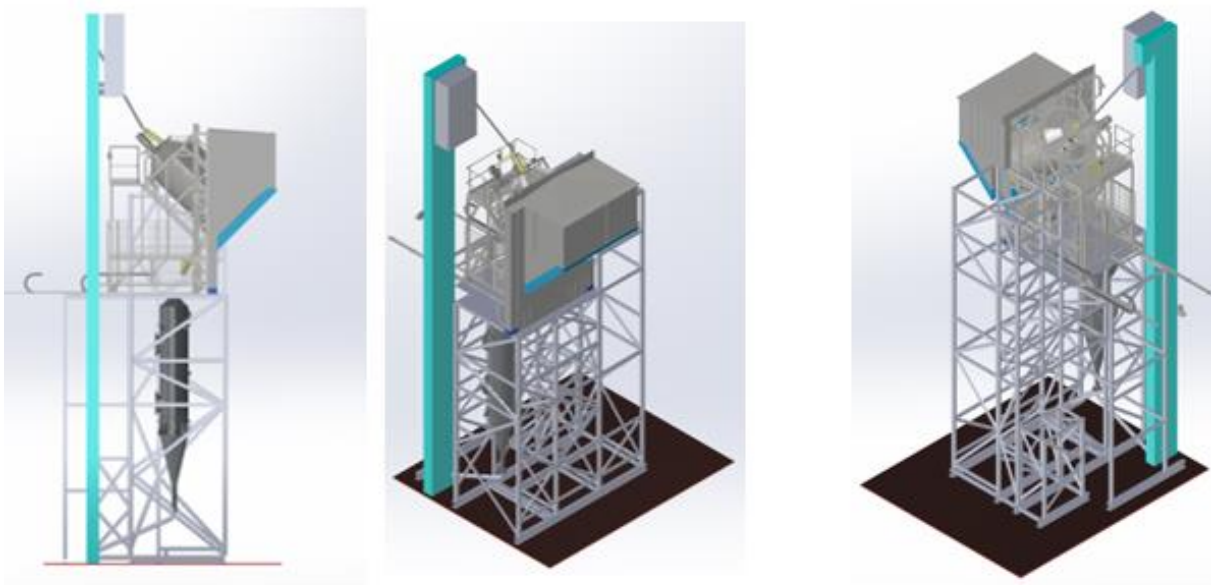


Bild 20: Ansichten des Sandia Solarturms mit ergänztem Partikel-Förderturm

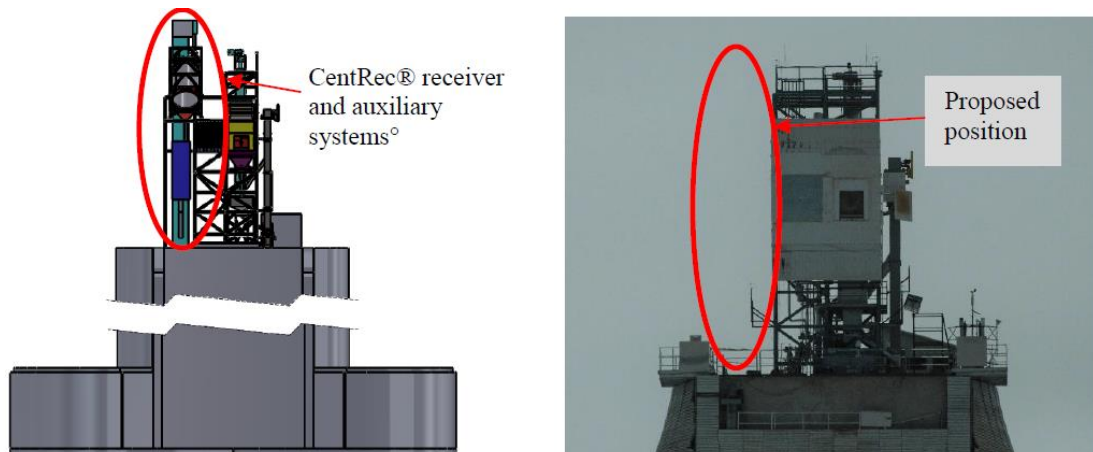


Bild 21: Einbauposition auf dem Sandia Solarturm

Bild 22 zeigt das Schema der Gesamtanlage auf dem Stand im Jahr 2022. Neben den Hauptkomponenten Receiver, Becherwerk und Kühler sind auch Regelemente dargestellt.

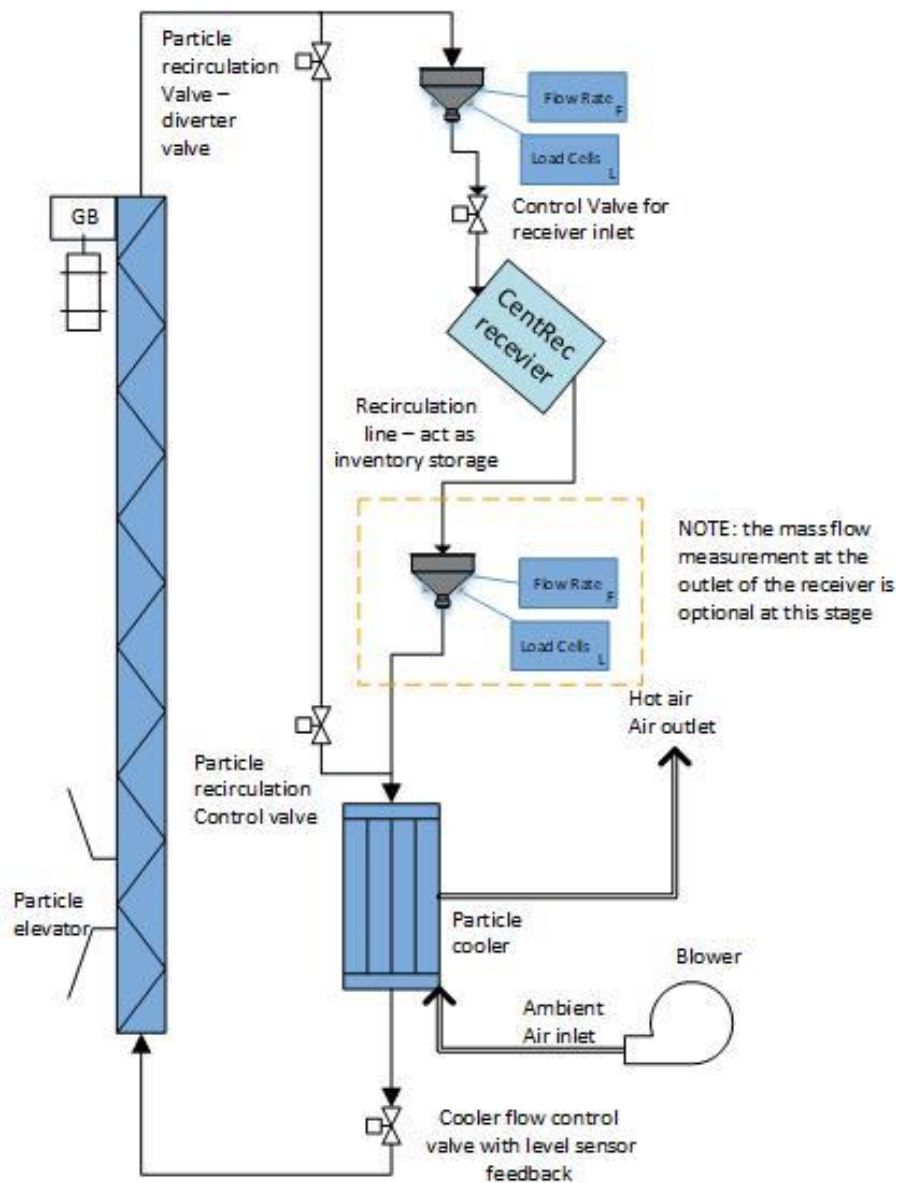


Bild 22: Anlagenschema für die Testanlage bei Sandia mit Becherförderwerk, Vorlagebehälter und Rückkühler

AP4 bis AP6 Testdurchführung, Analyse und Rücktransport

Im Rahmen des Projektes haben keine der geplanten Tests des CentRec auf dem Solarturm bei Sandia stattgefunden. Die Implementierung der Infrastruktur auf Sandia-Seite war nicht zuletzt wegen der Pandemie-Auswirkungen mehr als 2 Jahren verzögert. Auf DLR-Seite stand der Receiver nicht wie erwartet für die Tests zu Verfügung. Auch der Test eines von Heliogen weiterentwickelten Receivers 1600T wurde im Moment des Projektendes aus zeitlichen Gründen unmöglich.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Wichtigste Kostenpositionen sind die Personalkosten für die aufgewendeten Untersuchungen an den Receiver-Bauarten und die umfangreichen Abstimmungen mit dem amerikanischen Partner Sandia.

Sachmittel wurden aufgewendet sowohl für Transportkosten, Materialien für die durchgeführten Tests, und Werkstoffuntersuchungen durch die Materialprüfanstalt als Fremdleistungen. Da letztlich keine Tests bei Sandia stattfanden, wurden dafür vorgesehen Sachmittel und Personalmittel nicht ausgeschöpft. Eine beantragte Verlängerung der Laufzeit mit dem verbliebenen Restbudget von einem Drittel der Projektsumme wurde nicht bewilligt.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten, Analysen, Planungen und Spezifikationen in den Arbeitspaketen AP1 bis AP3 haben signifikante Weiterentwicklungen der CentRec Technologie und des Knowhows beim DLR ermöglicht. Die unerwartet weitreichenden Schäden an CentRec500 und CentRec300S haben jedoch keine fristgemäße Durchführung von Tests bei Sandia ermöglicht. In der während des Projektes hinzukommenden Kooperation mit dem Unternehmen Heliogen ergaben sich erneut Möglichkeiten, die anspruchsvollen Tests durchführen zu können. Da eine beantragte Verlängerung des Projektes nicht bewilligt wurde, konnten Hauptziele des Projektes nicht erreicht werden. Aus den geleisteten Arbeiten des DLR wird es jedoch möglich sein, weitere Entwicklungen der Technologie abzuleiten und die erwarteten Ziele in nachfolgenden Aktivitäten zu erreichen.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit gemäß Verwertungsplan

Durch einen erfolgreichen Test bei Maximalbedingungen steigen die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten für die CentRec-Technologie stark an, da bestehende Vorbehalte gegen die Vorteile der Partikeltechnologie reduziert werden können. In Verbindung mit dem komplementären KOSTPAR-Projekt, bei dem weitere Systemkomponenten entwickelt und demonstriert werden, erreichen alle relevanten Systemkomponenten einen Reifegrad, der eine vorkommerzielle Anlagen-Demonstration ermöglicht. Sie hätte die Finanzierbarkeit (Bankability) solcher Systeme für die kommerzielle solarthermische Stromerzeugung und auch für solare Prozesswärme-Anwendungen deutlich verbessert.

Die vorausgegangenen Entwicklungsarbeiten im DLR hatten zur Gründung der Spin-Off-Firma HeliHeat GmbH geführt, die unter Verwendung von DLR-Lizenzen die Partikel-Receiver-Technologie für Prozesswärme-Systeme vermarktet.

Nach erfolgreichen Tests hätte die Technologie sowohl wissenschaftlich als auch wirtschaftlich weiterverfolgt werden können. Wissenschaftliche Aspekte beinhalten die Anpassung des Konzeptes auf weitere, auch nicht-solare Anwendungen, z.B. industrielle Prozesswärme. Folgearbeiten umfassen beispielsweise Fallstudien für diverse Anwendungsoptionen. Wesentlich für die wirtschaftliche Verwertung ist die Vorbereitung eines vorkommerziellen Demonstrationsprojektes. Dafür wäre die Errichtung einer kleinen Solarturmanlage mit Partikelsystem insbesondere für Prozesswärme-Anwendungen zielführend, da in diesem Bereich auch kleinere Anlagen sinnvoll einsetzbar sind. Das EU-Projekt HIFLEX sieht den Bau einer 2 MW Pilotanlage im italienischen Foggia bei der Firma Barilla vor. Der Baubeginn wird nun in 2023 erwartet. Tests werden in 2024 stattfinden.

II.5 Fortschritt bei anderen Stellen

Das DLR hat an seiner Solarturm-Anlage in Jülich in den Jahren 2020-2023 eine Pilot-Anlage für die CentRec Partikel-Technologie errichtet. Außer dem von der HelioHeat GmbH gelieferten CentRec-Receiver ist eine komplette Partikel-Anlage mit Fördersystemen, Pufferspeichern, Wärmetauscher, Regelorganen, Messtechnik und Steuerungstechnik am westlichen Turm installiert worden. Der Betrieb der Anlage ist für 2023 geplant. Der Receiver wird jedoch bei weitem nicht die hohe Leistung erreichen, die im Projekt NoLimits bei Sandia möglich geworden wäre.

Die amerikanische Firma Heliogen Inc. (heliogen.com) hat die deutsche HelioHeat GmbH im Jahr 2021 von den Gründern gekauft und plant mit der australischen Woodside Energy / BHP ihr Capella-Projekt (ceganet.opr.ca.gov/2022040342) mit dieser Technologie und superkritischem CO₂ als Fluid mit 5 MW Leistung in Kalifornien in 2024 zu errichten. Damit würde ein wichtiger Schritt in Richtung Kommerzialisierung von Hochtemperaturreceivern voraussichtlich mit der CentRec Technologie erreicht.

II.6 Veröffentlichungen des Ergebnisses

1. Laubscher, Hendrik F.; Ebert, Miriam; Lubkoll, Matti: Project Development for Testing a High Temperature Full Load Centrifugal Particle Receiver at the NSTTF. SAND2020-11360C 691580 Abstract SolarPaces 2020 osti.gov/biblio/1826999