

# CarboSolUZ

## Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Modernisierung des großen Solarofens (BSF) in Parkent, Usbekistan, zur Demonstration von Prozessschritten der grünen Kohlenstofffaserherstellung

<b>Antragsteller:</b>	Technische Universität Dresden
<b>Projektpartner</b>	Institute of Material Sciences (IMS), Scientific Production Association "Physics-Sun", Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Ph.D. Shavkat Rasulmatovich Nurmatov (Deputy Director) Tashkent, 100084, 2B, Ch. Aytmatov Street
<b>Förderkennzeichen:</b>	01DK22005
<b>Laufzeit:</b>	01.12.2022 – 30.11.2024
<b>Bearbeiter:</b>	Dr.-Ing. Andreas Jäger
<b>Seiten:</b>	21
<b>Anlagen:</b>	--
<b>Anhang:</b>	--

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01DK22005 gefördert

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung**

*(Hinweis: Geschwärzte Teile des Berichts wegen geplanter Patentanmeldung vertraulich)*

*Postadresse (Briefe)*  
TU Dresden, Institut für Energietechnik  
01062 Dresden

*Postadresse (Pakete u.ä.)*  
TU Dresden, Institut für Energietechnik  
Helmholtzstraße 10  
01069 Dresden

*Besucheradresse*  
Sekretariat:  
Merkel-Bau  
Zimmer 206

Helmholtzstraße 14  
01069 Dresden

*Steuernummer*  
(Inland)  
203/149/02549

*Umsatzsteuer-Id-Nr.*  
(Ausland)  
DE 188 369 991

*Bankverbindung*  
Commerzbank AG  
Filiale Dresden

*IBAN*  
DE52 8504 0000 0800 4004 00  
BIC COBADEFF850

Mitglied von:



**DRESDEN  
concept**  
Exzellenz aus  
Wissenschaft  
und Kultur

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
1 Genereller Projektverlauf	3
2 HAP1: Spezifikation der Systemanforderungen, Entwurfsparameter und Betriebsbedingungen für die Produktionsstufen von solarthermischen Carbonfasern (Leitender Partner IMS)	6
3 HAP2: Entwurf eines Solarheizsystems für die solarthermische Carbonfaserproduktion (Leitender Partner TUD)	8
3.1 AP 2.1 Entwurf und Herstellung eines Prototypen des optischen Systems (Leitender Partner IMS)	8
3.1.1 SAP 2.1.1 Entwicklung der Geometrie und Eigenschaften der fokussierenden Spiegelfacetten für die Heliostaten (Leitender Partner TUD)	8
3.1.2 SAP 2.1.2 Entwurf des Edelgascontainments (Leitender Partner TUD)	9
3.1.3 SAP 2.1.3 Entwicklung der Geometrie und Eigenschaften der fokussierenden Spiegelfacetten für den Parabolspiegel (Leitender Partner TUD)	12
3.1.4 SAP 2.1.4 Entwurf und Beschaffung geeigneter Aktuatoren und Steuergeräte (Leitender Partner TUD)	13
3.2 AP 2.2 Entwurf und Herstellung eines Solar Receiver Elements (Leitender Partner TUD)	14
4 HAP3: Prozess-/ Technologiedemonstration in der Testumgebung des Großen Solarofens in Parkent (Leitender Partner IMS)	15
4.1 AP 3.1 Messung und Validierung der Betriebsparameter (Leitender Partner IMS)	15
4.2 SAP 3.1.1 Datenerfassung, -analyse & -auswertung (Leitender Partner IMS)	15
4.2.1 SAP 3.1.2 Schlussfolgerungen (Leitender Partner TUD)	16
5 HAP4: Dissemination & Management (Leitender Partner TUD)	17
5.1 AP 4.1 Verbreitungs- & Verwertungs-/ Umsetzungsplan (Leitender Partner TUD)	17
5.2 AP 4.4 Verwaltung von geistigen Eigentumsrechten (Leitender Partner TUD)	17
5.3 AP 4.5 Qualitätskontrolle (Leitender Partner TUD)	18
6 Ergänzende Angaben	18
6.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	18
6.2 Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten	18
6.3 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	19
6.4 Der während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	19
6.5 Die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF	19
Literatur	20

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Arbeitsplan des Projekts, wie im Antrag aufgeführt .....	5
Abbildung 2: Aktualisierter Arbeitsplan laut des Zwischenberichts.....	5
Abbildung 3: Planung der Receiver-Anordnung für die verschiedenen Temperaturstufen der Carbonfaserproduktion .....	6
Abbildung 4: Big Solar Furnace in Parkent, Usbekistan.....	7
Abbildung 5: Big Solar Furnace in Parkent. Anordnung der Heliostaten (Quelle: [6]) .....	7
Abbildung 6: Anlagenschema mit geplantem Wärmemanagement .....	10
Abbildung 7: Schematische Anordnung der Container auf einem Schienensystem .....	11

## 1 Genereller Projektverlauf

Seitens der TU Dresden wurden für das Projekt CarboSolUZ folgende Gesamtziele definiert:

Übergreifendes Ziel:

- Demonstration der Nutzung von Hochtemperatur-Solarwärme für die Kohlefaserherstellung

Arbeitsziele:

- Wissenschaftliche Grundlagen zur Aufrüstung der Anlage von 1 MW auf 4 MW thermischer Leistung
- Wissenschaftliche Grundlagen zur Entwicklung einer Receiver-Technologie für einen Graphitrohrföfen für die Kohlefaserherstellung

Wie im Zwischenbericht zum Berichtszeitraum 12/2022 – 12/2023 unter Punkt 3 dargestellt, haben sich die Arbeiten des usbekischen Projektpartners IMS stark verzögert, was einerseits auf den um sechs Monate verspäteten Projektstart und andererseits auf das zunächst fehlende Budget des Partners zurückzuführen ist. Zum Ende des ersten Berichtszeitraums hatte sich abgezeichnet, dass der Projektpartner IMS aufgrund der geschilderten Umstände wahrscheinlich nicht in der Lage sein wird, die im Antrag vorgesehenen Arbeiten in der Laufzeit des Projekts der TU Dresden durchzuführen. Das betrifft insbesondere die Arbeitspakete, die laut Antrag vom IMS geleitet wurden und teils Vorarbeiten zur Durchführung der Arbeitspakete der TU Dresden liefern sollten. Die Implikationen für die Durchführung der Arbeitspakete der TU Dresden sind im Folgenden dargestellt.

### AP 2.1 Entwurf und Herstellung eines Prototyps des optischen Systems

Vorgesehen war die Herstellung eines Prototyps des optischen Systems durch den Projektpartner IMS, der die Anlagenleistung von 1 MW auf 4 MW vergrößern soll. Die Arbeiten des Projektpartners konnten aus den genannten Gründen nicht vollumfänglich in der Laufzeit des Projekts der TU Dresden durchgeführt werden. Die technischen und wissenschaftlichen Grundlagen für die Bearbeitung der Unterarbeitspakete wurden seitens der TU Dresden geliefert. Das betrifft insbesondere die Unterarbeitspakete SAP 2.1.1, SAP 2.1.2, SAP 2.1.3 und SAP 2.1.4. Ergebnisse der TU Dresden sind in den entsprechenden folgenden Abschnitten des Berichts dargestellt.

### AP 2.2 Entwurf und Herstellung eines Solar Receiver Elements

Eine besondere Herausforderung bei der geplanten Aufrüstung der Big Solar Furnace (BSF) zur kontinuierlichen Produktion von Carbonfasern liegt in den benötigten hohen Temperaturen im Herstellungsverfahren für die (Streck-)Graphitisierung von 2500 °C bis 3000 °C. Insbesondere der benötigte Hochtemperaturreceiver für die BSF (siehe Abbildung 3) muss demnach Temperaturen bis zu 3000 °C standhalten können – eine solche Technologie ist bislang noch nicht entwickelt. In der Literatur sind Receiver-elemente bis ca. 1800 °C bekannt, siehe z.B. [1–4]. Das zu entwickelnde Solar Receiver Element steht in enger Verbindung zum

Graphitrohren, der hauptverantwortlich durch das IMS in AP 2.3 zu entwickeln war sowie der Planung der Messtechnik und Beschaffung der entsprechenden Labortechnik in AP 2.4 für das ebenfalls das IMS der leitende Partner war. Die finale Ausarbeitung der AP 2.3 und AP 2.4 durch das IMS konnten aufgrund der oben beschriebenen Umstände nicht in der Projektlaufzeit des Partners TUD durchgeführt werden. Das Design des Ofens und dessen geplante Integration in die BSF durch den Projektpartner IMS steht demnach noch aus.

Analog zu AP 2.1 haben sich die Arbeiten der TU Dresden demnach darauf konzentriert die wissenschaftlichen und technischen Grundlagen für den Receiver zu erarbeiten und dem Projektkonsortium zur Verfügung zu stellen. Die Erprobung des Receivermaterials direkt an der BSF ist nicht praktikabel, es wurde alternativ die Möglichkeit zur Testung von Receivermaterialien durch einen Sonnensimulator mit hoher Energiedichte für Mikroproben erörtert, der analog zu einem bereits bestehenden und patentierten Prüfstand zur Hochtemperaturprüfung von metallischen Werkstoffen ausgeführt werden könnte [5] und noch entwickelt werden müsste. Der Aufbau, die Inbetriebnahme und der Einsatz des Prüfstands hätte aus zeitlichen Gründen nicht im Projekt CarboSolUZ erfolgen können, weswegen am ursprünglichen Arbeitsplan festgehalten wurde (siehe Abbildung 1) mit entsprechenden Anpassungen des AP 3.1.

Die im Einzelnen erzielten Ergebnisse sind in den entsprechenden folgenden Abschnitten des Berichts dargestellt.

#### AP 3.1 Messung und Validierung der Betriebsparameter

Das Ziel des Arbeitspakets ist die Demonstration der in den anderen Arbeitspaketen entwickelten Prozesse und Technologien zur Herstellung der Kohlenstofffasern mit der BSF, für den der Projektpartner IMS hauptverantwortlich ist. Laut Projektantrag ist die TU Dresden an AP 3.1 und in den Subarbeitspaketen 3.1.1 sowie 3.1.2 beteiligt, welche sich mit der Datenerfassung, -analyse & -auswertung sowie der Schlussfolgerungen aus den Messungen beschäftigen. Die Verzögerung des Projekts auf usbekischer Seite hat dazu geführt, dass das IMS bis zum Abschluss der Projektlaufzeit von CarboSolUZ keine experimentelle Validierung der Prozesse und Technologien durchführen konnte. Die wissenschaftlichen Grundlagen sowie technische Optionen zur Umrüstung der BSF wurden von der TU Dresden an den Partner geliefert. Weiterhin wurden nötige experimentelle Untersuchungen identifiziert und dem Projektpartner kommuniziert. Die entwickelten Umsetzungsstrategien und Technologien sind im folgenden Bericht beschrieben und wichtige Validierungsschritte der Technologie werden aufgezeigt.

#### Aktualisierter Arbeitsplan laut Zwischenbericht

Im Lauf des Projekts wurde der Arbeitsplan aktualisiert und mit dem Zwischenbericht 2024 eingereicht. Der aktualisierte Arbeitsplan ist in Abbildung 2 zu sehen. Die tatsächliche Bearbeitung der Arbeitspakete weicht wie oben beschrieben aufgrund des verzögerten Projektstarts des usbekischen Partners vom damaligen Planungsstand ab und ist in den Abschnitten 1, 3 und 4 beschrieben.

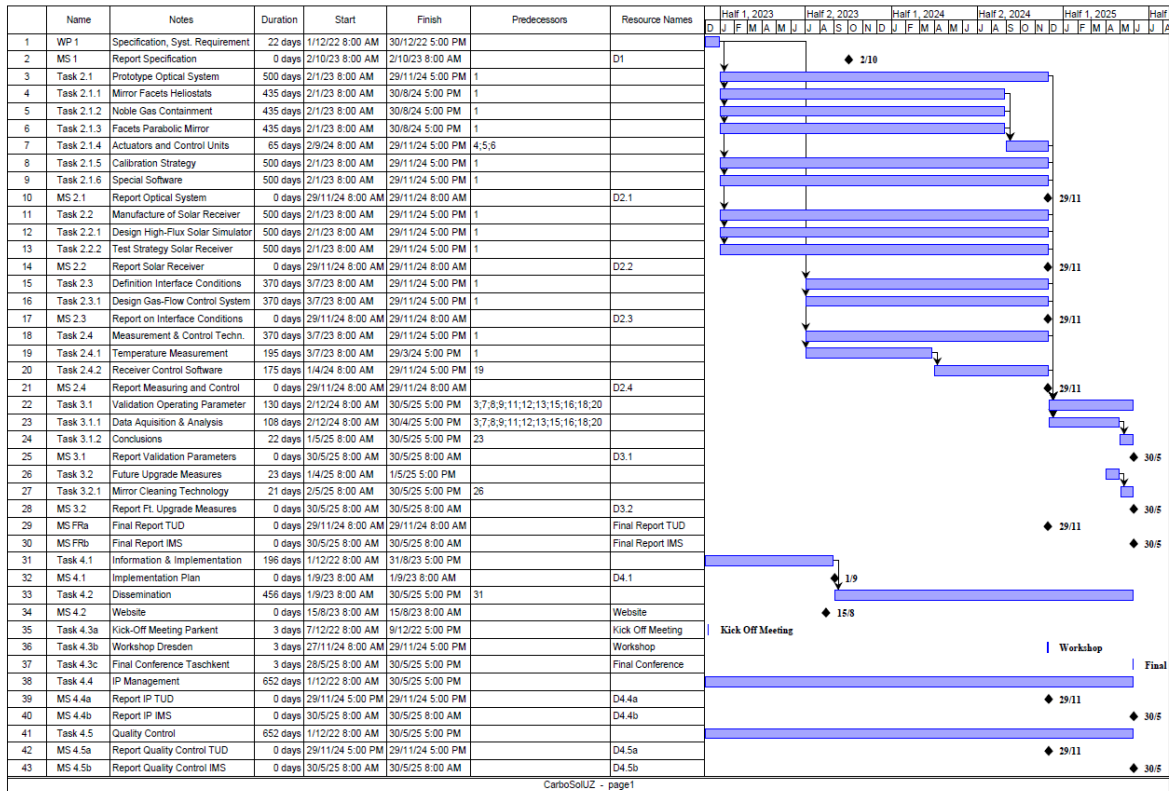


Abbildung 1: Arbeitsplan des Projekts, wie im Antrag aufgeführt

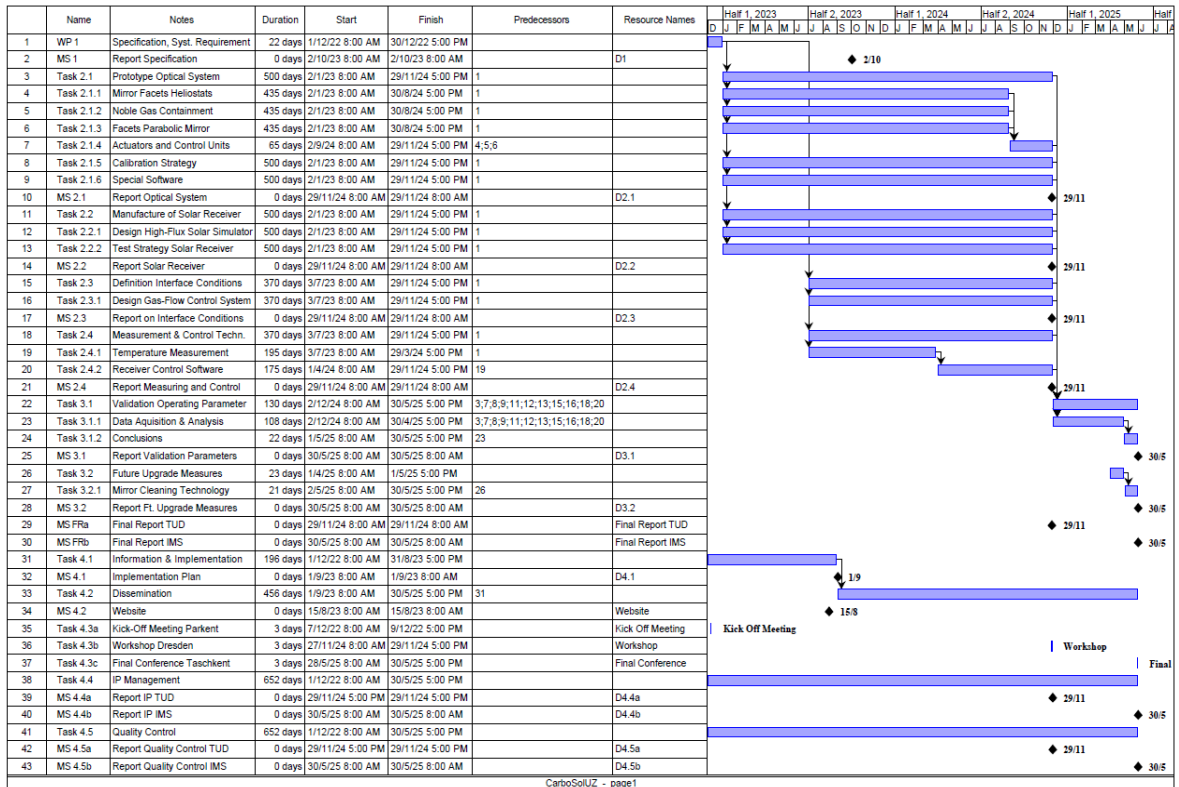


Abbildung 2: Aktualisierter Arbeitsplan laut des Zwischenberichts.

## **2 HAP1: Spezifikation der Systemanforderungen, Entwurfsparameter und Betriebsbedingungen für die Produktionsstufen von solarthermischen Carbonfasern (Leitender Partner IMS)**

### **Berichtszeitraum 12/2022 – 12/2023**

Einige Bestandszeichnungen wurden der TUD vom IMS zur Verfügung gestellt, um die Detailplanung der Produktionsstufen beginnen zu können. In Abbildung 3 ist die geplante Anordnung der Receiver und deren mögliche Integration in die Big Solar Furnace (BSF) in Parkent dargestellt. [REDACTED]

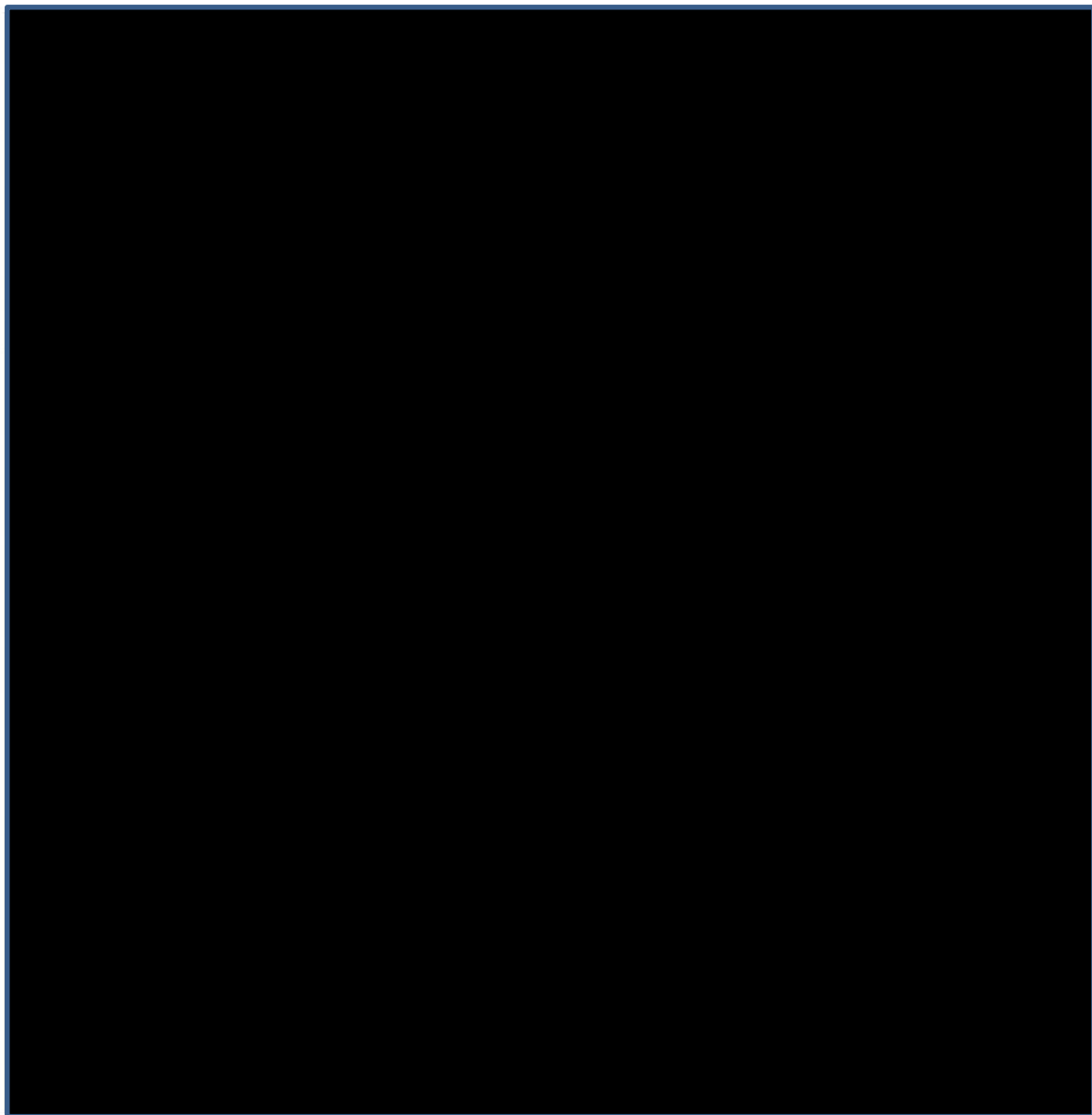
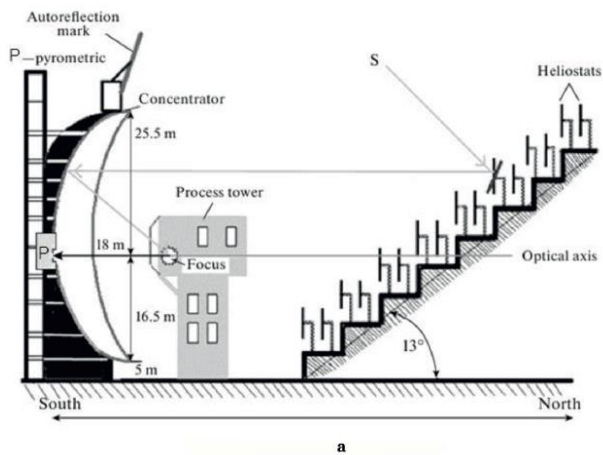


Abbildung 3: Planung der Receiver-Anordnung für die verschiedenen Temperaturstufen der Carbonfaserproduktion

In Abbildung 4 ist ein Bild der Anlage in Parkent zu sehen und Abbildung 5 zeigt die Anordnung der Heliostaten.



Abbildung 4: Big Solar Furnace in Parkent, Usbekistan



b

Abbildung 5: Big Solar Furnace in Parkent. Anordnung der Heliostaten (Quelle: [6])

### **3 HAP2: Entwurf eines Solarheizsystems für die solarthermische Carbonfaserproduktion (Leitender Partner TUD)**

#### **3.1 AP 2.1 Entwurf und Herstellung eines Prototypen des optischen Systems (Leitender Partner IMS)**

##### **3.1.1 SAP 2.1.1 Entwicklung der Geometrie und Eigenschaften der fokussierenden Spiegelfacetten für die Heliostaten (Leitender Partner TUD)**

###### **Berichtszeitraum 12/2022 – 12/2023**

Die wissenschaftlichen Grundlagen wurden zusammengetragen und mit dem Schlüsselpersonal am Institute of Material Sciences (IMS, Prof. Akbarov, Prof. Sobirov und Dr. Nurmatov) besprochen und abgestimmt. Wegen zunächst fehlendem Budget und verzögertem Projektstart seitens IMS konnten jedoch die Spiegel noch nicht bestellt und die experimentelle Untersuchung an der BSF entsprechend noch nicht umgesetzt werden. Auf Basis des aktualisierten Arbeitsplans (siehe Appendix A zum Zwischenbericht), wird die Entwicklung der Geometrie und Eigenschaften der fokussierenden Spiegelfacetten der Heliostaten bis November 2024 abgeschlossen. Die Ergebnisse von SAP 2.1.1 gehen in das geplante Patent (1) *Adaptive Single Focussing Mirror Facet Heliostat* ein, siehe AP 4.4.

###### **Berichtszeitraum 01/2024 – 11/2024**

Die aktuelle Leistung der BSF wird mit 1 MW angegeben. Für die Aufrüstung der Big Solar Furnace von 1 MW auf 4 MW Leistung ist demnach das Konzept der Anlage grundlegend zu überarbeiten und es sind weitere Heliostaten und neue Receiver erforderlich (siehe Abbildung 6). Aktuell sind 62 Heliostaten an der BSF verbaut, die rechnerisch jeweils 16 kW zur Gesamtleistung beisteuern. Ein Optimierungspotential liegt genau in diesen Heliostaten. Neben der benötigten Anschaffung neuer Heliostaten zur Erhöhung der Leistung von 1 auf 4 MW kann eine Optimierung der vorhandenen Heliostaten erfolgen, siehe [6].

Verschiedene Optionen zur Anordnung der Heliostaten sind denkbar und wurden in diesem Arbeitspaket betrachtet. Grundsätzlich soll das Konzept erhalten bleiben, dass die Heliostaten zur Erzeugung der hohen Temperaturen (bis zu 3000 °C) über den Parabolspiegel (der aus 9500 Einzelspiegeln besteht, siehe *Abbildung 4*) auf den bereits vorhandenen Fokuspunkt fokussieren. [REDACTED]

[REDACTED]. Im Vergleich zu den verbauten Heliostaten wurden in den letzten Jahrzehnten signifikante Wirkungsgradsteigerungen erzielt, siehe z.B. [7,8].

Aus der Studie von Rasul [6] wird ersichtlich, dass die vorhandenen Heliostaten tageszeitabhängig sehr unterschiedliche Anteile an der Gesamtleistung aufweisen. [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] Das gesamte Heliostatenfeld kann nun tageszeitabhängig dahingehend optimiert werden, auf welche Receiver die Heliostaten fokussieren. Die optimale Anordnung

und die Art der (zusätzlichen) Heliostaten hängt von der finalen Ausgestaltung der BSF durch den Projektpartner ab. Die (tageszeitabhängige) Steuerung und Optimierung der Heliostaten ist somit ebenfalls abhängig von der finalen Ausgestaltung der BSF durch den Projektpartner. Seitens der TU Dresden wird in der tageszeitabhängigen flexiblen Spiegelsteuerung jedoch ein sehr großes Optimierungspotential gesehen, dass in einem Folgeprojekt ergründet werden sollte.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass die Entwicklung eines Receivers für 3000 °C sowie die vorgesehene Umspülung des Receivers mit dem Wärmeträger Argon, das anschließend zum Graphitofen geleitet wird, eine sehr große technische Herausforderung darstellt (siehe SAP 2.1.2 und AP 2.2). Sollte sich die Konzeptstudie praktisch als nicht durchführbar erweisen, weil z.B. der Receiver nicht die erforderliche Temperatur bereitstellen kann oder das Material des Receivers diesen Temperaturen nicht standhält oder der Wärmetransport über das Transportmedium Argon nicht praktikabel ist, bestünden folgende Alternativoptionen:

- 1) Über geeignete Spiegelanordnungen und eine geeignete Strahlführung könnte der Fokuspunkt direkt in den Graphitofen geleitet werden. Alternativ könnte eine Aufstellung des Graphitofens in der Nähe des Fokuspunkts in Betracht gezogen werden. Auch bei dieser Variante ist jedoch mit hohen technischen Herausforderungen bzw. mit Platzproblemen zu rechnen.
- 2) Die sichere Rückfallvariante bestünde daraus, auf bestehende elektrisch geheizte Graphitrohre für die Graphitisierung zurückzugreifen. In diesem Fall würde die Herstellung der Kohlenstofffasern über ein hybrides Konzept realisiert werden. [REDACTED]

Nach der finalen Ausgestaltung des Konzepts sollte eine techno-ökonomische Analyse der verschiedenen Prozessvarianten durchgeführt werden, um das wirtschaftlichste Konzept zu ermitteln.

### **3.1.2 SAP 2.1.2 Entwurf des Edelgascontainments (Leitender Partner TUD)**

#### **Berichtszeitraum 12/2022 – 12/2023**

Eine besondere Herausforderung für die geplante Ertüchtigung der Big Solar Furnace zur Produktion von Carbonfasern ist das Wärmemanagement und der Schutz der Werkstoffe vor thermo-oxidativer Zersetzung bei Kontakt mit Sauerstoff und bei entsprechend hohen Temperaturen. In Abbildung 6 ist das ausgearbeitete Anlagenschema für die Big Solar Furnace [REDACTED]



Abbildung 6: Anlagenschema mit geplantem Wärmemanagement

Je nach gewünschtem Durchsatz der geplanten Carbonfaserproduktion und der realisierbaren Gesamtleistung der Big Solar Furnace, die auf Basis der Ergebnisse des Projektpartners IMS in den AP 2.1, AP 2.2 und AP 2.3 ermittelt wird, muss die Dimensionierung der Komponenten der Anlage nach Abbildung 6 angepasst werden. Prinzipiell stehen für die Behälter mit unterschiedlichen Temperaturniveaus unterschiedliche Designmöglichkeiten zur Verfügung, wobei das optimale Design von der finalen Ausgestaltung der BSF durch den Projektpartner abhängt. In der Produktionsstrecke sowie für die Wärmespeicher ist das Material bei angedachter druckloser Ausführung hauptsächlich durch Thermospannungen belastet und außerdem thermisch bedingter Oxidation ausgesetzt. Aufgrund der geringen mechanischen Belastungen kommen für die thermisch hochbelasteten Behälter und Anlagenteile spezielle Hochtemperaturwerkstoffe in Betracht. Für die Graphitisierung bei sehr hohen Temperaturen (2400 - 2800 °C) könnten bspw. Keramiken, Keramikfasern und Verbundwerkstoffe auf Basis von Keramikfasern zum Einsatz kommen, die teils Temperaturen bis deutlich über 3000 °C standhalten können. Im Inneren wären die Behälter durch das Argon-containment vor Oxidation geschützt und auf der Außenseite kann eine Doppel- oder Mehrfachhülle ausgeführt werden, in der ein Vakuum gezogen wird. Der Behälter, in dem die Karbonisierung bei deutlich

niedrigerer Temperatur (1400 - 1800 °C) stattfindet, könnte analog oder ggf. durch hochwarmfeste Stähle in Kombination mit gängigen Kühlverfahren gefertigt werden. Die Stufe der Stabilisierung und Oxidation bei Temperaturen kleiner als 450 °C kann nach gängiger Ingenieurpraxis mit warmfesten Stählen ausgelegt werden. Zur Ausführung des Edelgascontainments für den Hochtemperaturbereich ist die Einreichung eines Patents geplant: (2) *Noble Gas Containment*, siehe AP 4.4.

Anhand der experimentellen Ergebnisse des Projektpartners IMS wird der Entwurf des Edelgascontainments finalisiert, wobei durch den verspäteten Projektstart auf Seiten des Partners IMS eine Verzögerung der Projektergebnisse zu erwarten ist. Mit einem Abschluss von SAP 2.1.2. wird nach Appendix A zum Zwischenbericht nach August 2024 gerechnet.

### **Berichtszeitraum 01/2024 – 11/2024**

Die Anordnung der Prozessschritte „Graphitisierung“, „Karbonisierung“ und Stabilisierung & Oxidation, siehe Abbildung 6, wurde technisch weiter ausgearbeitet. Die Behälter sind aufgrund der hohen Temperaturen einer sehr starken thermischen Ausdehnung ausgesetzt. Die Anordnung der Container sollte daher in einer Linie auf einem Schienensystem erfolgen und der Kohlenfaserstrang kontinuierlich und ohne Umlenkung durch die Behälter geführt werden, um einen natürlichen thermischen Dehnungsausgleich zu realisieren. Die Container selbst sind durch Rohre miteinander verbunden. Das Konzept ist in Abbildung 7 dargestellt.

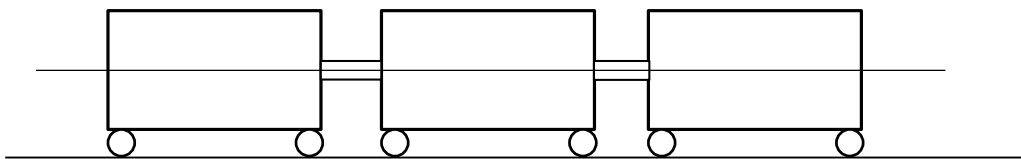


Abbildung 7: Schematische Anordnung der Container auf einem Schienensystem

Kohlenstofffasern und deren Vorprodukte weisen sehr geringe Durchmesser von 5-9 µm auf. Eine wichtige technische Fragestellung betrifft die benötigten Durchmesser der Verbindungsrohre. Während die finale Ausgestaltung der Rohrdurchmesser erst nach Erarbeitung des finalen Konzepts erfolgen kann, lassen sich bereits einige Einflussgrößen festhalten:

- 1) Die Verschwächung von Behälterwänden steigt mit größerem Rohrdurchmesser (Stützen und Ausschnitte in Behälterwänden, siehe bspw. das AD-2000-Regelwerk [9]). Durch die drucklose Anordnung sowie die Anordnung zum natürlichen Dehnungsausgleich nach Abbildung 7 werden keine kritischen Spannungen erwartet. Falls sich im finalen Design jedoch zu hohe Spannungen ergeben sollten, kann der Rohrdurchmesser angepasst werden.
- 2) Während der Niedertemperaturbehälter mit Luft und der Behälter zur Karbonisierung mit Stickstoff gefüllt sind, soll der Hochtemperaturbehälter zur Graphitisierung Argon als Schutzgas enthalten. Im Betrieb ist eine Überwachung der Reinheit der drei Gase in den jeweiligen Behältern durch Gaschromatographie

vorgesehen und eine Nachfüllung des jeweiligen Gases falls eine bestimmte Menge an Verunreinigungen überschritten wird. Der Kohlenstofffaserstrang durchläuft zunächst den mit Luft gefüllten Behälter, anschließend den mit Stickstoff gefüllten Behälter und zuletzt den mit Argon befüllten Behälter, siehe Abbildung 6. Durch die drucklose Ausführung und die Bewegung des Kohlenstoffstrangs sollte hauptsächlich Luft in den Stickstoffbehälter und Stickstoff in den Argonbehälter transportiert werden. Diese Mischvorgänge können als unkritisch angesehen werden, solange kein Sauerstoff in die Hochtemperaturzonen des Stickstoff- oder Argonbehälter gelangt. Um dies zusätzlich zu verhindern, sollten die Verbindungsrohre möglichst lang ausgeführt werden. Die Gase werden durch die Haftbedingung hauptsächlich mit der Kohlenstofffaser transportiert und es ergibt sich im Fall von abtransportiertem Gas aus einem Behälter ein Rückstrom über das Rohr zurück in den Behälter, für die ein größerer Rohrdurchmesser vorteilhaft sein könnte. Um ein Eindringen von Luft (Sauerstoff) in den Argon- und Stickstoffbehälter auszuschließen können diese Behälter zur Sicherheit mit einem Druck beaufschlagt werden, der minimal über dem Umgebungsdruck liegt, sodass gilt  $p_{\text{Ar}} > p_{\text{N}_2} > p_{\text{Luft}}$ . Weiterhin kann in den Verbindungsrohren eine Absaugung vorgesehen werden, deren Druckniveau leicht unterhalb des Druckniveaus der Behälter liegt, um ein Durchmischen der Gase zu verhindern.

Aus Platzgründen ist eine rechteckige Bauweise (Abbildung 7) der Behälter vorzuziehen. Es sei jedoch angemerkt, dass aus Stabilitätsgründen (Thermospannungen aufgrund starker Temperaturdifferenzen) eine Ausführung der Argon-, Stickstoff- und Luftcontainer als kugelförmige Behälter nötig werden könnte. Finale Aussagen zur Konstruktion und zur Gestaltung der Rohre lassen sich erst nach erfolgter experimenteller Messkampagne und finalisierten Umbauplänen des Projektpartners IMS treffen.

### **3.1.3 SAP 2.1.3 Entwicklung der Geometrie und Eigenschaften der fokussierenden Spiegelfacetten für den Parabolspiegel (Leitender Partner TUD)**

#### **Berichtszeitraum 12/2022 – 12/2023**

Die wissenschaftlichen Grundlagen wurden entwickelt und mit dem Schlüsselpersonal am Institute of Material Sciences (IMS, Prof. Akbarov, Prof. Sobirov und Dr. Nurmatov) besprochen. Wegen zunächst fehlendem Budget und einem verspäteten Projektstart seitens IMS konnten die Parabolspiegel ebenfalls noch nicht bestellt und die experimentelle Untersuchung an der BSF entsprechend noch nicht durchgeführt werden. Auf Basis des aktualisierten Arbeitsplans (siehe Appendix A zum Zwischenbericht) wird die Entwicklung der Geometrie und Eigenschaften der fokussierenden Spiegelfacetten für den Parabolspiegel bis November 2024 abgeschlossen. Die Ergebnisse von SAP 2.1.1 gehen in die geplanten Patente (1) *Adaptive Single Focussing Mirror Facet Heliostat* und (3) *Adaptive Focussing Fresnel Facet Central Concentrator* ein, siehe AP 4.4.

### **Berichtszeitraum 01/2024 – 11/2024**

Wie in Abschnitt 3.1.1 (SAP 2.1.1 Entwicklung der Geometrie und Eigenschaften der fokussierenden Spiegelfacetten für die Heliostaten (Leitender Partner TUD)) ausgeführt, [REDACTED]

[REDACTED]. Ein vielversprechendes Konzept der Aufrüstung der BSF ist die Anschaffung weiterer Heliostaten gekoppelt mit einer dynamischen Steuerung der Heliostaten, die tageszeitabhängig optimiert, welche Heliostaten auf welchen Receiver bzw. auf die 9500 Spiegelfacetten des Parabolspiegels fokussieren. Nach Rasul [6] kann durch diese Optimierung eine deutliche Leistungssteigerung der Anlage erwartet werden, weil Heliostaten die aktuell nur einen kleinen Beitrag zur Leistung der BSF liefern stattdessen [REDACTED]

Die geplante dynamische und adaptive Steuerung der fokussierenden Spiegelfacetten der Heliostaten setzt eine dynamische Justierung der 9500 Spiegelfacetten des Parabolspiegels voraus, weil im Verlauf des Tages unterschiedliche Heliostaten aus unterschiedlichen Positionen und daher mit unterschiedlichem Strahlengang auf die Spiegelfacetten des Parabolspiegels fokussieren. Die Steuerung der Spiegel wird als große Herausforderung angesehen und es sollte zunächst eine experimentelle Validierung für das Zusammenspiel zwischen Heliostaten- und Parabolspiegelfacetten durchgeführt werden, für die der Projektpartner IMS in SAP 2.1.5 und SAP 2.1.6 verantwortlich war. Die experimentelle Validierung konnte bislang aus den eingangs genannten Gründen vom Projektpartner IMS nicht durchgeführt werden. Stattdessen wurden mit dem Projektpartner Teststrategien ausgearbeitet und die Anforderungen an die experimentelle Validierung besprochen.

#### **3.1.4 SAP 2.1.4 Entwurf und Beschaffung geeigneter Aktuatoren und Steuergeräte (Leitender Partner TUD)**

##### **Berichtszeitraum 12/2022 – 12/2023**

Planmäßig noch nicht begonnen

##### **Berichtszeitraum 01/2024 – 11/2024**

Aufgrund des verzögerten Projektstarts des Partner IMS ist eine Beschaffung der Aktuatoren und Steuergeräte innerhalb der Projektlaufzeit von CarboSolUZ nicht möglich gewesen. Es wurden stattdessen mögliche hochpräzise Aktuatoren und Steuergeräte mit dem Projektpartner in Usbekistan diskutiert und anhand der vorhandenen Heliostaten erörtert. Die finale Ausarbeitung der Steuerung und Wahl passender Aktuatoren wird letztendlich anhand der finalen Ausgestaltung der BSF erfolgen.

### **3.2 AP 2.2 Entwurf und Herstellung eines Solar Receiver Elements (Leitender Partner TUD)**

#### **Berichtszeitraum 12/2022 – 12/2023**

Im Projektantrag wurde ein Solar-Receiver-Element vorgeschlagen, das den damaligen Entwicklungs- und Erkenntnisstand von 2020 darstellt. Dabei war davon ausgegangen worden, dass durch die Einbindung von Prof. Hubert Jäger, dem ehemaligen Leiter der Entwicklungsabteilung von SGL Carbon, eine enge Beziehung zu SGL Carbon und deren Entwicklungspotential hergestellt werden kann. Leider sind die Beziehungen in der gewünschten Form letztendlich nicht zustande gekommen. Daraus ergeben sich aktuell Schwierigkeiten die Nadeln des Receivers wie ursprünglich geplant gefertigt zu bekommen. Aus diesem Grund wurden alternative Optionen zum Fertigen der Nadeln erörtert. Die Universitäten Hamburg-Harburg und Kiel haben 2012 ein neues Material "Aerographit" entwickelt, welches sich möglicherweise sogar besser als Absorbermaterial im Receiver eignet als die ursprünglich geplante Lösung. Aerographit ist ebenfalls ein sehr guter Wärmeisolator und könnte für die Hochtemperaturisolierung der Rohrleitungen geeignet sein, womit sich Synergiepotentiale mit SAP 2.1.2 ergeben. Das Material ist bis 800°C getestet und beim Herstellungsprozess wird das gleiche Gasgemisch verwendet, welches in der geplanten Anlage als Wärmetransportmedium verwenden werden soll. Damit kann weitgehende Prozesskompatibilität vorausgesetzt werden. Natürlich muss dieses Material für den geplanten Anwendungszweck (3000 °C sowie 20000 Sonnen Strahlungskonzentration) qualifiziert werden. Zu diesem Zweck soll ein Prüfstand entstehen, der sich aktuell in der Patentierungsphase befindet. Die Realisierung des Prüfstandes muss aber dem Nachfolgeprojekt überlassen werden, weil die Planungen für CarboSolUZ ursprünglich keinen Prüfstand vorgesehen haben und von einer einfacheren Fertigung der Nadeln ausgegangen wurde. Für den Aufbau des Prüfstands laufen bereits gemeinsam mit den Ministerien in Usbekistan Bestrebungen ein Special Purpose Vehicle (SPV) für das Nachfolgeprojekt aufzusetzen, welches auch die Finanzierung des Prüfstandes übernehmen kann. [REDACTED]

[REDACTED]. Die Anlage ist optimal an die vorhandene Struktur der BSF in Parkent angepasst (siehe Abbildung 3 und Abbildung 6) und lässt sich beliebig für größere Anlagen hochskalieren. [REDACTED]

[REDACTED]. Der Patentantrag für diese Anlage ist ebenfalls in Ausarbeitung: (7) *Solar Furnace and Solar Tower with Triple Receiver System*, siehe AP 4.4.

### **Berichtszeitraum 01/2024 – 11/2024**

Wie bereits in Abschnitt 3.1.1 und in Abschnitt 3.2 zum vorherigen Berichtszeitraum beschrieben, konnte der ursprünglich angedachte Hochtemperaturreceiver mit „Needle-Pad“-Struktur auf Basis von Graphitnadeln nicht gefertigt und getestet werden. Stattdessen wurden Alternativstrategien entwickelt, die entweder eine direkte Leitung der fokussierten Strahlen aus dem Parabolspiegel in den Graphitrohren vorsehen (AP 2.3, durchgeführt durch den Projektpartner IMS) oder als sichere Rückfalloption könnten elektrisch geheizte Graphitrohre für die Graphitisierung genutzt werden. [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

Für die Validierung der Reivertechnologie bis zu 3000 °C ist ein neuer Prüfstand zu konstruieren und in Betrieb zu nehmen, weil Tests im Labormaßstab wesentlich praktikabler erscheinen als Tests direkt an der BSF.

## **4 HAP3: Prozess-/ Technologiedemonstration in der Testumgebung des Großen Solarofens in Parkent (Leitender Partner IMS)**

### **4.1 AP 3.1 Messung und Validierung der Betriebsparameter (Leitender Partner IMS)**

### **4.2 SAP 3.1.1 Datenerfassung, -analyse & -auswertung (Leitender Partner IMS)**

### **Berichtszeitraum 12/2022 – 12/2023**

Planmäßig noch nicht begonnen

### **Berichtszeitraum 01/2024 – 11/2024**

Wie im Zwischenbericht zum Berichtszeitraum 12/2022 – 12/2023 unter Punkt 3 dargestellt, haben sich die Arbeiten des usbekischen Projektpartners massiv verzögert, was einerseits auf den um sechs Monate verzögerten Projektstart und andererseits auf das fehlende Budget des Partners zurückzuführen ist. Zum Ende des ersten Berichtszeitraums hatte sich, wie im Zwischenbericht dargestellt, abgezeichnet, dass der Projektpartner IMS aufgrund der geschilderten Umstände wahrscheinlich nicht in der Lage sein wird die im Antrag vorgesehenen Arbeiten fristgerecht durchzuführen. Eine Messung der Betriebsparameter ist dementsprechend nicht erfolgt. Stattdessen wurden mit dem Partner experimentelle Strategien zur Validierung und Auslegung der geplanten Technologie abgestimmt.

Es wurden gemeinsam mit dem Projektpartner Forschungsbedarfe identifiziert und Teststrategien für experimentelle Kampagnen entwickelt. Ebenfalls wurden Rückfalloptionen zur finalen Ausführung der Umrüstung der BSF zur grünen Kohlenstofffaserproduktion entwickelt, falls sich einzelne Technologien nicht oder nur unter erheblichem Aufwand

realisieren lassen, siehe die Abschnitte 3.1 und 3.2. Für das geplante Konzept der Aufrüstung der BSF mit einem neuartigen [REDACTED]

- Versuchsaufbau im Labormaßstab für das Edelgascontainment. Insbesondere muss die Festigkeit des Hochtemperaturcontainments mit Argon bei 3000 °C experimentell nachgewiesen werden. Weiterhin sollten Versuche zu den optimalen Größen und Längen der Verbindungsrohre (Abbildung 7) bei verschiedenen Drücken und Temperaturen und der Einfluss einer Absaugung untersucht werden. Diese Untersuchungen sind von großer Wichtigkeit für die Umsetzbarkeit der geplanten Umrüstung, weil das Eindringen von Sauerstoff in die Hochtemperaturbehälter unbedingt vermieden werden muss. (SAP 2.1.2)
- Versuchsaufbau im Labormaßstab zur Validierung eines Receiverlements für Temperaturen bis 3000 °C. Der Prüfstand muss noch entwickelt werden und kann ggf. analog zu einem Prüfstand für metallische Werkstoffe ausgeführt werden, den die Arbeitsgruppe für Thermische Energiemaschinen und -anlagen betreibt und patentiert hat [5]. Als Alternative sollte im Labormaßstab die direkte solare Beheizung des Graphitrohrofens untersucht werden (AP 2.2)

#### **4.2.1 SAP 3.1.2 Schlussfolgerungen (Leitender Partner TUD)**

##### **Berichtszeitraum 12/2022 – 12/2023**

Planmäßig noch nicht begonnen

##### **Berichtszeitraum 01/2024 – 11/2024**

Wie im Zwischenbericht zum Berichtszeitraum 12/2022 – 12/2023 unter Punkt 3 dargestellt, haben sich die Arbeiten des usbekischen Projektpartners massiv verzögert, was einerseits auf den um sechs Monate verzögerten Projektstart und andererseits auf das fehlende Budget des Partners zurückzuführen ist. Zum Ende des ersten Berichtszeitraums hatte sich, wie im Zwischenbericht dargestellt, abgezeichnet, dass der Projektpartner IMS aufgrund der geschilderten Umstände wahrscheinlich nicht in der Lage sein wird die im Antrag vorgesehenen Arbeiten fristgerecht durchzuführen. Eine Messung der Betriebsparameter ist dementsprechend nicht erfolgt und die Schlussfolgerungen aus den Messungen konnten nicht

gezogen werden. Stattdessen wurden gemeinsam mit dem Partner experimentelle Strategien zur Validierung und Auslegung der geplanten Technologie abgestimmt, siehe Abschnitt 4.2.

## **5 HAP4: Dissemination & Management (Leitender Partner TUD)**

### **5.1 AP 4.1 Verbreitungs- & Verwertungs-/ Umsetzungsplan (Leitender Partner TUD)**

#### **Berichtszeitraum 12/2022 – 12/2023**

Die erzielten Ergebnisse werden primär im Nachfolgeprojekt "Green Technologies Valley" verwertet und umgesetzt. Darin enthalten ist auch ein Weltklasse-Laborkomplex der es ermöglicht Wissenschaftlern aus aller Welt Hochtemperaturesperimente in Schutzgasatmosphäre durchzuführen. Die TU Dresden soll dabei mit einer permanenten Außenstelle partizipieren. Daneben sind noch Pilotlinien für das solare Schmelzen und die solare Wasserstoffgewinnung vorgesehen. Die erzielten Ergebnisse werden auch für Deutschland und die Europäische Union im Rahmen der Energiewende relevant. Die dort entwickelten Verfahren eignen sich besonders für die kostengünstige Bereitstellung von Industriewärme, insbesondere von Hochtemperaturwärme.

#### **Berichtszeitraum 01/2024 – 11/2024**

AP 4.1 wurde im vorherigen Berichtszeitraum abgeschlossen.

### **5.2 AP 4.4 Verwaltung von geistigen Eigentumsrechten (Leitender Partner TUD)**

#### **Berichtszeitraum 12/2022 – 12/2023**

Verschiedene Patentanträge befinden sich in Bearbeitung. Der Projektbezug ist in den nachstehenden Klammern gegeben.

- (1) Adaptive Single Focussing Mirror Facet Heliostat (Task 2.1.1, Task 2.1.4)
- (2) Noble Gas Containment (Task 2.1.2, Task 2.1.4)
- (3) Adaptive Focussing Fresnel Facet Central Concentrator (Task 2.1.3, Task 2.1.4)
- (4) High-Temperature Ceramic Impinging Receiver up to 1800°C (Air/Nitrogen) (Task 2.2)
- (5) Ultra-High-Temperature Volumetric Receiver with Recuperation (Task 2.2)
- (6) Ultra-High Temperature Pipeline (Task 2.2)
- (7) Solar Furnace and Solar Tower with Triple Receiver System (Air  $\leq 1000^{\circ}\text{C}$ , Nitrogen  $\leq 1800^{\circ}\text{C}$ , Argon  $\leq 3000^{\circ}\text{C}$ )

#### **Berichtszeitraum 01/2024 – 11/2024**

Während des Projekts sind verschiedene technische Lösungen für die Umrüstung der BSF in Parkent zur kontinuierlichen Carbonfaser-Produktion ausgearbeitet worden. Die Patentanträge befinden sich in Bearbeitung.

### **5.3 AP 4.5 Qualitätskontrolle (Leitender Partner TUD)**

#### **Berichtszeitraum 12/2022 – 12/2023**

Die Qualitätskontrolle wird laufend und projektbegleitend durch den Partner TUD durchgeführt. Der Projektbearbeiter von Seiten der TU Dresden, Herr Ralf Heger, befindet sich in engem und regelmäßigem Austausch mit den Akteuren des IMS.

#### **Berichtszeitraum 01/2024 – 11/2024**

Es wurde während der Projektlaufzeit enger Kontakt zu den Partnern des IMS gepflegt und der verantwortliche Projektbearbeiter, Herr Heger, hat das Projekt sowohl von Deutschland aus als auch während verschiedener Dienstreisen vor Ort koordiniert und begleitet. Ein reger Austausch mit dem IMS vor Ort war zwingend nötig, um den verspäteten Projektstart des Projektpartners so weit wie möglich kompensieren zu können. Für die geplanten Umrüstmaßnahmen der BSF in Parkent ist ein direkter Eindruck von den Gegebenheiten vor Ort sowie der damit zusammenhängenden Möglichkeiten von entscheidender Bedeutung.

## **6 Ergänzende Angaben**

### **6.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Als Projektbearbeiter war Herr Heger durchgehend auf dem Projekt beschäftigt und die Personalkosten wurden vollständig ausgeschöpft. Herr Heger konnte während der gesamten Laufzeit des Projektes nicht zu 100 % auf dem Projekt beschäftigt werden, weil die Personalmittel dafür nicht ausreichend bemessen waren (Grund hierfür waren Tarifsteigerungen während der Projektlaufzeit sowie eine höhere tarifliche Eingruppierung von Herrn Heger als ursprünglich angenommen). Von März – Juli 2024 war er nur zu 52,5 % auf dem Projekt beschäftigt. Die offenen Personenmonate wurden durch Haushaltspersonal der TU Dresden ausgeglichen.

Für die Durchführung der Projektarbeiten waren längere Aufenthalte des Projektbearbeiters Herrn Heger vor Ort in Usbekistan zwingend erforderlich, um sich selbst ein Bild der Big Solar Furnace machen zu können und um in direktem Kontakt mit dem Projektpartner IMS vor Ort die Umrüstmöglichkeiten der BSF zu erörtern.

### **6.2 Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten**

Die Umrüstung der Big Solar Furnace in Parkent, Usbekistan für die grüne Kohlenstofffaserproduktion stellt eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Weiterverwendung der bestehenden Anlage dar. In dem Vorhaben CarboSolUZ wurden die Grundlagen für die Umrüstung erarbeitet und mit dem Projektpartner vor Ort in Usbekistan diskutiert. Die enge Zusammenarbeit vor Ort hat die direkte Diskussion von Umsetzungskonzepten ermöglicht. Die wissenschaftlichen Grundlagen sowie verschiedene Vorschläge zur Umrüstung der BSF wurden erarbeitet und mit dem Projektpartner diskutiert. Die Umsetzung der Ergebnisse und die experimentelle Validierung direkt an der BSF liegt in der Hand des Projektpartners IMS. Auf usbekischer Seite sind Folgeprojekte zur weiteren Ausarbeitung der Konzeptstudien geplant.

### **6.3 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Im Rahmen der Energiewende und des Klimawandels ist ein schrittweiser Umstieg der Produktion von energieintensiven Gütern weg von fossilen Energieträgern hin zu regenerativen Energieträgern geboten. Die Kohlenstofffaserproduktion ist ein hochenergieintensiver Prozess, insbesondere die ersten Prozessschritte erfordern sehr hohe Temperaturen, welche nach Stand der Technik vor allem über fossil-generierten Strom bereitgestellt werden und mit entsprechend hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen einhergehen. Der Grundstein für eine auf Solarenergie basierende, CO<sub>2</sub>-neutrale Kohlenstofffaserproduktion mit der BSF in Parkent wurde in diesem Projekt gelegt.

### **6.4 Der während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Es ist uns kein Vorhaben von anderer Stelle bekannt, dass ein ähnliches Konzept verfolgt.

### **6.5 Die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF**

Für die Projektergebnisse ist eine Ausarbeitung von Patenten geplant, siehe Abschnitt 5.2. Teile der Projektergebnisse wurden außerdem von Herrn Heger in Seminaren und Konferenzen beim Partner in Usbekistan präsentiert.

Die Ergebnisse des Projekts fließen zudem in Lehrveranstaltungen an der TU Dresden ein (insbesondere in die Lehrveranstaltung „Umweltaspekte von Energieanlagen“).

## Literatur

- [1] G. Ambrosetti, P. Good, A novel approach to high temperature solar receivers with an absorbing gas as heat transfer fluid and reduced radiative losses, *Solar Energy* 183 (2019) 521–531. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.004>.
- [2] A. Kribus, P. Doron, R. Rubin, J. Karni, R. Reuven, S. Duchan, E. Taragan, A Multistage Solar Receiver: The Route to High Temperature, *Solar Energy* 67 (1999) 3–11.
- [3] F. Nie, F. Bai, Z. Wang, X. Li, R. Yang, Solid particle solar receivers in the next-generation concentrated solar power plant, *EcoMat* 4 (2022) e12207. <https://doi.org/10.1002/eom2.12207>.
- [4] R. Bertocchi, J. Karni, A. Kribus, Experimental evaluation of a non-isothermal high temperature solar particle receiver, *Energy* 29 (2004) 687–700. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2003.07.001>.
- [5] M. Thiele, U. Gampe, Prüfvorrichtung und hochfokussierende Heizvorrichtung zur Erzeugung hoher Wärmestromdichten, 10 2013 113 600, n.d.
- [6] A. Rasul, Thousand kW High-Temperature Solar Furnace in Parkent (Uzbekistan) – Energetical Characteristics, in: *A Guide to Small-Scale Energy Harvesting Techniques*, IntechOpen, 2019. <https://doi.org/10.5772/intechopen.83411>.
- [7] S.O. Fadlallah, T.N. Anderson, R.J. Nates, Fluid-structure interaction analysis of a lightweight sandwich composite structure for solar central receiver heliostats, *Mechanics Based Design of Structures and Machines* 51 (2023) 5737–5766. <https://doi.org/10.1080/15397734.2021.2011744>.
- [8] SAHEL Wirtschaftlichere Heliostaten mit Sandwichkonzentrator, Karusselnachführung und optischer Closed-Loop-Regelung, 2022.
- [9] T.-V. e.V, AD 2000-Regelwerk: Taschenbuch - Ausgabe 2021, Beuth Verlag GmbH, 2022.