Schlussbericht

Verbundprojekt FKZ 03EE5142A

Air2Fuel:

Großtechnisch skalierbare Direct Air Capture Technologie für die Produktion von eFuels auf Basis von Luft-CO_2

Ela Industriegas GmbH

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg

atmosfair gGmbH

Projektzeitraum
01.12.2022 bis 29.02.2024

Oktober 2024

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Schlussbericht zum Verbundprojekt „Air2Fuel“

Allgemeine Angaben zum Projekt:

Projekttitel:	Großtechnisch skalierbare Direct Air Capture Technologie für die Produktion von eFuels auf Basis von Luft-CO_2	
Antragsteller/ Verbundkoordinator:	Ela Industriegas GmbH	
Art des Vorhabens:	Einzel ☐	Verbund ☒
Förderkennzeichen:	03EE5142A	
Ansprechpartner/ Projektkoordinator:	Christian Zuber	
Straße, Nr., PLZ:	Loruper Straße 80, 49757 Werlte	
Telefon:	+49 160 / 98633374	
E-Mail:	christian.zuber@kiwih2.com	
Projektpartner: (ZSW)	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW), 70563 Stuttgart	
Ansprechpartner	Dr. Ulrich Zuberbühler	
Telefon:	+49 711 / 7870-239	
E-Mail:	ulrich.zuberbuehler@zsw-bw.de	
Projektpartner: (Atmosfair)	atmosfair gGmbH, 12059 Berlin	
Ansprechpartner	Dr. Dietrich Brockhagen	
Telefon:	+49 30 / 12084800	
E-Mail:	brockhagen@atmosfair.de	

Angaben zum geplanten Budget (Tsd. Euro gesamt; Budgetverteilung auf Partner unter Kategorie 8)

Gesamtbudget:	Eigenmittel:	Fördermittel:	mittlere angestrebte Förderquote aus Kostenplan:
3.628	1.581	2.046	56,41 %

Laufzeit des Vorhabens:

	Start (MM/JJ)	Ende (MM/JJ)	Monate gesamt
Geplant (Antrag)	01.12.2022	30.11.2025	36

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Kurzbeschreibung:

In dem vorliegenden Verbundprojekt „Air2Fuel“ soll eine bereits erprobte, effiziente und für die Synthese von eFuels ausgelegte DAC-Technologie des ZSW, die bislang als Demonstrator im Maßstab 1 kg_{CO2}/h (DAC1) validiert wurde, aufgegriffen in Kooperation mit den Projektpartnern industrialisiert und erstmalig in den Maßstab 100 kg_{CO2}/h (DAC100) umgesetzt werden.

Die ela Industriegas GmbH übernimmt die Gesamtprojektkoordination, Begleitung Engineering DAC-Gesamtprozess, Skalierungskonzepte in den t_{CO2}/h-Maßstab, Integration DAC-Anlage in die e-gas-Produktionsanlage am Standort Werlte, Testbetrieb und Technologiebenchmark.

Das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung übernimmt das Engineering des DAC-Gesamtprozess und Subsysteme, Beschaffung des DAC-Absorbers im Maßstab 100 kg_{CO2}/h, Vorvalidierung von CO_2-Sorbentien und Prozessanpassungen in Pilotanlage 1 kg_{CO2}/h, Erforschung von Materialien und Konzepten für die großtechnische Technologies-kalierung, technisches Monitoring DAC-Testbetrieb am Standort Werlte.

Atmosfair gGmbH begleitet das Engineering des DAC-Gesamtprozess, Unterstützung beim Engineering Absorber und Desorber sowie Testbetriebs am Standort Werlte, Beschaffung des DAC-Desorbers und Markt- und Wirtschaftlichkeitsanalysen.

Inhaltsverzeichnis

I. Kurze Darstellung 5
1 Aufgabenstellung 5
2 Projektvoraussetzungen 5
3 Planung und Ablauf des Projekts 6
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand 8
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 11
II. Eingehende Darstellung 12
1 Erzielte Ergebnisse des Forschungsprojekts 12
1.1 AP 1: Konzeption DAC100 Gesamtprozess 12
1.2 AP 2: Engineering DAC100 Absorbereinheit und Absorbens 17
1.3 AP 3 Engineering DAC100 CO_2-Desorbereinheit 19
1.4 AP 4 Beschaffung DAC100 Subsysteme und FAT 19
1.5 AP 5 Integration und Inbetriebnahme DAC100 19
1.6 AP 6 Testbetrieb DAC100 und Monitoring 20
1.7 AP 7 Skalierung und Industrialisierung 20
2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 20
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 20
4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertung der Ergebnisse 20
5 Bekannt gewordener Fortschritt während des Projekts 21
6 Erfolgte/geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses 21

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

I. Kurze Darstellung

1 Aufgabenstellung

Mit dem Klimaschutzabkommen von Paris im Jahr 2015 hat die Weltgemeinschaft beschlossen, die globale Erwärmung auf unter 2 C° bzw. möglichst unter 1,5 C° seit Beginn der Industrialisierung zu begrenzen. Aufgrund mangelnder Fortschritte hinsichtlich der Reduktion der weltweiten Treibhausgasemissionen, der spürbar zunehmenden Bedrohung durch den Klimawandel und den wachsenden öffentlichen Druck, stärkere Klimaschutzmaßnahmen zu ergreifen, hat die EU-Kommission im Herbst 2019 als neues Leitbild für Europa das Erreichen der Klimaneutralität bis spätestens 2050 formuliert, verbunden mit der ehrgeizigen Zielsetzung, weltweit der erste klimaneutrale Kontinent zu werden. Ohne grünen Wasserstoff und seine Folgeprodukte wie synthetische Kraftstoffe ist jedoch weder ein klimaneutraler Verkehrssektor noch eine klimaneutrale Produktion in sämtlichen Industriesparten erreichbar. Das Kohlenstoffdioxid kann dabei aus existierenden und nicht vermeidbaren fossilen oder biogenen Punktquellen, wie beispielsweise Zementwerken oder anderen Industrieanlagen, Biogasanlagen, Müllheizkraftwerken oder fossilen Kraftwerken stammen oder es wird mittels Direct Air Capture (DAC) direkt aus der Luft gewonnen. Die Notwendigkeit von DAC ist in den letzten Jahren immer stärker in den Fokus geraten und es wurden deutliche Fortschritte hinsichtlich der technischen Reife erzielt. Allerdings existieren bislang industrieseitig in Deutschland noch wenig bis keine technologischen Entwicklungen im Bereich DAC.

2 Projektvoraussetzungen

Im Rahmen des beantragten Vorhabens soll eine bereits validierte und für die Synthese von eFuels optimierte DAC-Technologie des ZSW – die bisher als Demonstrator im Maßstab von 1 kg_{CO2}/h (DAC1) erfolgreich getestet wurde (siehe Abbildung 2-1) – in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern industrialisiert und erstmals im Maßstab von 100 kg_{CO2}/h (DAC100) umgesetzt werden.

Abbildung 2-1: Containeraufbau des DAC1 Demonstrators mit Innen- (links) und Außenansicht (rechts)

Die wäscherbasierte Technologie zeichnet sich durch einen kontinuierlichen Betrieb (keine Totzeiten, niedriger Regelungstechnischer Aufwand, konstante CO_2-Qualität etc.), die Nutzung einer niedrigen Desorptionstemperatur in Form von Prozessabwärmen (bspw. Syntheseprozessen), eine hohe CO_2-Reinheit (99,5 %) sowie eine gute Skalierbarkeit aus.

Ziel des Vorhabens ist es, die DAC100-Technologie in realer Einsatzumgebung im e-gas-Anlagenkomplex in Werlte zu betreiben und durch die Messung der Leistungsdaten zu validieren. Hierfür soll die DAC-Technologie zur CO_2-Bereitstellung in den Produktionsstandort für regeneratives Methan und LNG des Projektpartners Ela Industriegas GmbH integriert (siehe Abbildung 2-2) und im Demonstrationsbetrieb über mehrere tausend Stunden getestet und nach Abschluss des Projektes im Anlagenkomplex weiterbetrieben werden.

Bei der vorausgehenden Entwicklung des DAC100-Prototyps sollen insbesondere industrialisierungsrelevante Aspekte wie Serienfertigung, Robustheit und Recyclingfähigkeit der eingesetzten Materialien berücksichtigt werden.

Das Projekt und die begleitenden Wirtschaftlichkeitsanalysen zielen darauf ab, die ökonomische Effizienz des Verfahrens nachzuweisen und die nächsten Skalierungsschritte in den energietechnisch relevanten Tonnen-Maßstab vorzubereiten.

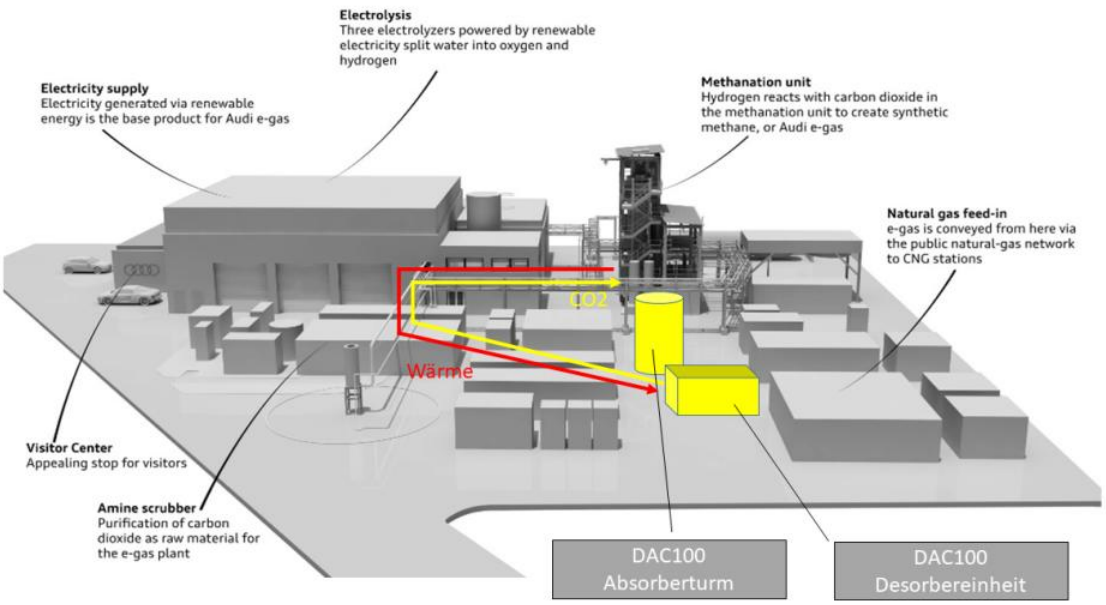

Abbildung 2-2: Geplante Integration des DAC100 Prototypen in die e-Gas Anlage in Werlte

3 Planung und Ablauf des Projekts

Das Projekt untergliedert sich in insgesamt sieben Arbeitspakete (siehe Abbildung 3-1), welche mit unterschiedlichen Gewichtungen der einzelnen Projektpartner bearbeitet werden. Eine Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse findet sich im Kapitel „Erzielte Ergebnisse des Forschungsprojekts“

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

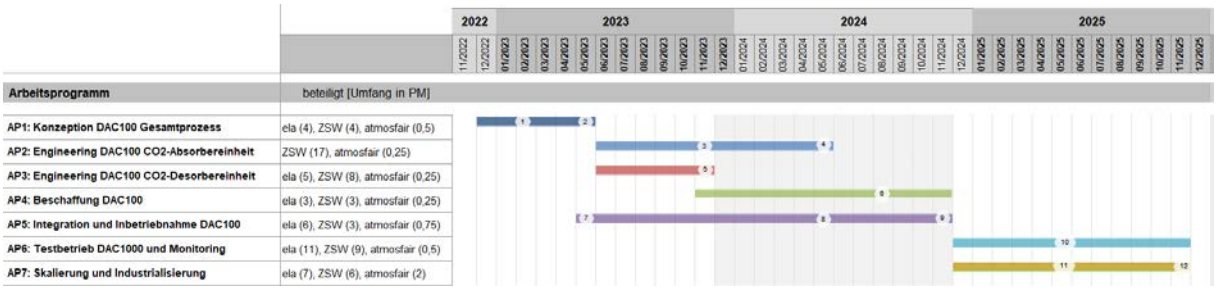

Abbildung 3-1: Übersicht der Arbeitspakete mit dem jeweils geplante Personaleinsatz der Projektpartner und der zeitlichen Einordnung in das Gesamtprojekt

AP1: Konzeption DAC100 Gesamtprozess

Ziel des Arbeitspaketes ist es, auf Grundlage des Prozessdesigns des bestehenden DAC1-Demonstrators des ZSW ein in ein Industrieprodukt überführbares, in den e-gas-Anlagenkomplex integrierbares und perspektivisch in den multi-Tonnenbereich skalierbares Designkonzept zu entwickeln, welches Aspekte wie eine kostengünstige Fertigbarkeit, Robustheit sowie Recyclingfähigkeit der eingesetzten Materialien berücksichtigt. Auf dieser Basis erfolgten dann die weiteren Planungen und das Detailed Engineering des in dem Vorhaben umzusetzenden Prototyps DAC100 in AP2. Mögliche material- und verfahrenstechnische Anpassungen können in dieser Phase in Testläufen in dem DAC1-Demonstrator des ZSW am ZSW voruntersucht werden.

AP2: Engineering DAC100 CO_2-Absorbereinheit und CO_2-Absorbens

Ziel des Arbeitspaketes ist es, auf Grundlage des in AP1 entwickelten Prozessdesigns das Detailed Engineering für die CO_2-Absorbereinheit des in dem Vorhaben umzusetzenden Prototyps DAC100 zu erarbeiten als Basis für die Beschaffung dieses Subsystems in AP4. Ziel des Arbeitspaketes ist außerdem die Weiterentwicklung des bislang eingesetzten CO_2-Absorbens für den Waschprozess in Hinblick auf Effizienz, Langlebigkeit, Kosten und großtechnische Verfügbarkeit). Die untersuchten Materialien sollen in Laborumgebung auch in Hinblick auf die Recyclingfähigkeit und Regenerierbarkeit vorvalidiert werden.

AP3: Engineering DAC100 CO_2-Desorbereinheit

Ziel des Arbeitspaketes ist es, auf Grundlage des in AP1 entwickelten Prozessdesigns das Detailed Engineering für die CO_2-Desorbereinheit des in dem Vorhaben umzusetzenden Prototyps DAC100 zu erarbeiten als Basis für die Beschaffung dieses Subsystems in AP4.

AP4: Beschaffung DAC100 Subsysteme und FAT

Ziel des Arbeitspakets ist die externe Fertigung der CO_2-Absorptionseinheit sowie CO_2-Desorptionseinheit für den Prototyp DAC100 und die Beschaffung der hierfür erforderlichen Bauteile und Komponenten inkl. der für die Prozessvalidierung erforderlichen Messtechnik auf Grundlage der Vorplanungen in AP1. Die Subsysteme sollen dann am Standort Werlte aufgestellt und im Rahmen eines FAT abgenommen werden.

AP5: Integration und Inbetriebnahme DAC100

Ziel des Arbeitspaketes ist die bau- und genehmigungsseitige sowie verfahrens- und steuerungstechnische Vorbereitung sowie die Integration und Inbetriebsetzung des Prototyp DAC100 im e-gas-Anlagenkomplex in Werlte.

AP6: Testbetrieb DAC100 und Monitoring

Ziel des Arbeitspaketes ist der Praxisbetrieb des Prototyps DAC100 über ca. 3000 h im Rahmen des kommerziellen Anlagenbetriebs der e-gas-Anlage mit Produktion von insgesamt ca. 300 t_{CO2} und daraus insgesamt ca. 110 t eFuel (eMethan). Über das technisches Monitoringsystem sollen die Performancedaten im Anlagenverbund validiert werden als Grundlage für die Durchführung bzw. Validierung von Markt- und Wirtschaftlichkeitsanalysen.

AP7: Skalierung und Industrialisierung

Ziel des Arbeitspaketes ist die Ausarbeitung und Bewertung von Konzepten für die weitere Skalierung des Prozesses in den multi-t_{CO2}/h-Maßstab (DAC1000, DAC10000 usw.). Hierzu zählen insbesondere Untersuchungen in Hinblick auf fertigungsseitige Möglichkeiten und Grenzen der Modulskalierung von CO_2-Absorber- und CO_2-Desorbereinheit (z.B. Aufbau in Segmenten). Für die verschiedenen Konzepte sollen Wirtschaftlichkeitsanalysen und ein Technologiebenchmark durchgeführt werden. Im Ergebnis soll ein DAC10000-Prozess konzipiert und ein Basic Engineering ausgearbeitet werden (Bauweise Wäschersystem z.B. segment- oder modulweise, R&I, Komponentenliste und mögliche Fertiger, Kostenstruktur) als Grundlage für eine Industrialisierungs-Roadmap.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

CO_2-Gewinnung aus Luft

CO_2 wird heute bereits großtechnisch als Lösungs- und Reinigungsmittel, Schweißgas, Düngemittel und als Rohstoff in der chemischen Industrie eingesetzt. Für eine zukünftige Produktion von eFuels und synthetischen Rohstoffen werden große CO_2-Mengen benötigt. Das international für DAC stark angestiegene Interesse zeigt sich unter anderem an den in die Firmen getätigten Investments (siehe Abbildung 4-1).

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

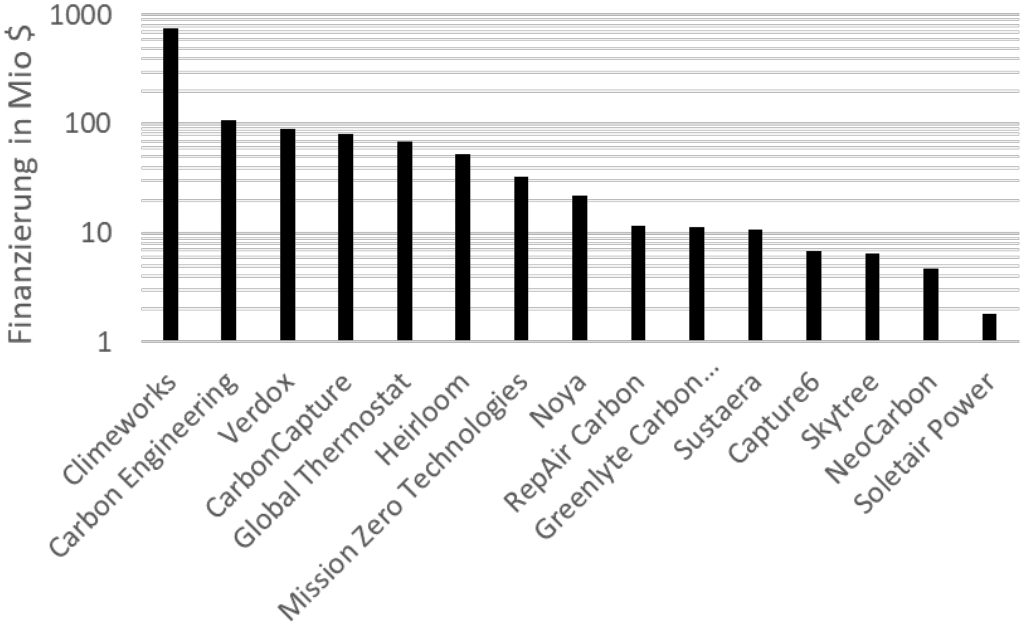

Abbildung 4-1: Eingeworbenes Kapital verschiedener DAC-Firmen und StartUps (Quelle: Tracxn)

Abbildung 4-2 gibt einen Überblick zu den wesentlichen DAC-Technologien, welche bereits im Demonstrator-Maßstab von mindestens 1 kg_{CO2}/h umgesetzt wurden. Die Technologien werden hierbei nach dem Aggregatzustand (fest, flüssig) und Art (Hydroxide, Amine) der Sorbentien sowie ihrer Regenerierung mittels elektrochemischer (Elektrolyse, Elektrodialyse) oder thermischer (Niedertemperatur, Hochtemperatur) Verfahren unterteilt. Zusätzlich ist jedem Verfahrensansatz noch jeweils ein exemplarischer Firmenvertreter zugeordnet.

	Absorption (flüssiges Sorbens)				Adsorption (festes Sorbens)	
Sorbens	Hydroxide	Hydroxid/Amine	Amine	Hydroxide	Amine	Calcium-hydroxid
Desorption	Elektrolyse	Elektrodialyse	Nieder-temperatur	Hoch-temperatur	Nieder-temperatur	Hoch-temperatur
Firma	Greenlyte Carbon	Mission Zero	ZSW	Carbon Engineering	Climeworks	Heirloom

Abbildung 4-2: Überblick und Einteilung wesentlicher DAC-Technologien nach charakteristischen Verfahrensgrößen (Sorbens, Desorption) und Firmenvertretern

In einer im Jahr 2020 veröffentlichten Studie des KIT im Auftrag des Ministeriums für Verkehr Baden-Württemberg wurden unterschiedliche Verfahren zur CO_2-Bereitstellung aus der Luft

mit denen aus Punktquellen im Verhältnis zum theoretisch mindestens erforderlichen Trennaufwand gegenübergestellt (siehe Abbildung 4-3). Daraus wird deutlich, dass die heute verfügbaren DAC-Verfahren hinsichtlich des Energieaufwandes nahe beieinanderliegen und es noch Optimierungspotenzial gibt. Die Abbildung zeigt auch, dass bei konzentrierten Quellen der theoretisch erforderliche Trennarbeit erheblich kleiner ist, aber die Angaben zum Energieverbrauch teilweise in der gleichen Größenordnung liegen wie die DAC-Verfahren. Der Energiebedarf für die CO_2-Bereitstellung setzt sich aus einem elektrischen und thermischen Anteil zusammen, wobei für die eFuels-Produktion hauptsächlich der Stromverbrauch die dominierende Rolle spielt, da der Wärmebedarf aus Abwärmen der Elektrolyse und Synthese gedeckt werden kann.

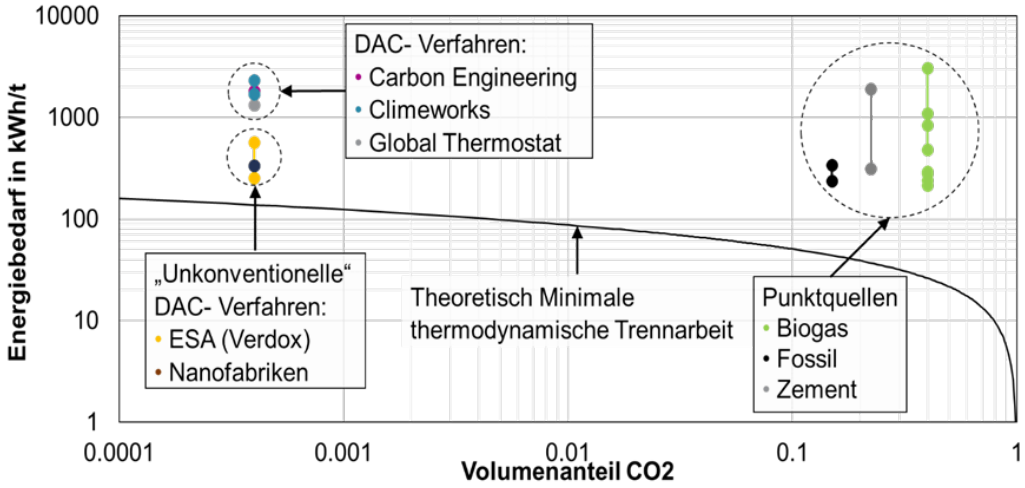

Abbildung 4-3: Vergleichend Gegenüberstellung der Energieverbräuche von DAC und CO_2-Bereitstellung aus Punktquellen (Quelle Heß 2020: IMVT Institut für Mikroverfahrenstechnik KIT)

Zusammengefasst sind die Vorteile des in dem beantragten Vorhaben betrachteten DAC-Verfahrens gegenüber den in Abbildung 4-2 benannten Alternativprozessen:

- Verfahrensführung mit geringem Stromverbrauch (< 1,5 kWh/kg_{CO2}) durch hohe Prozessintegration mit Nutzung der Abwärmen aus Elektrolyse bzw. eFuels-Synthese
- Hohe synthesetaugliche und konstante CO_2-Qualität (99,5 % CO_2)
- Einfache Skalierbarkeit des Wäschersystems auch in große Leistungsklassen

Ein valider Machbarkeitsnachweis des Verfahrens wurde bereits erbracht (siehe Abbildung 2-1). Für die Weiterentwicklung hin zu einem kommerziellen, großtechnisch einsetzbaren Produkt bestehen nun insbesondere die folgenden Entwicklungsbedarfe:

- Weitere Industrialisierung des Prozesses und der darin verbauten Subsysteme und Materialien in Hinblick auf Robustheit/Lebensdauer, Skalierbarkeit, Standfestigkeit und Verfügbarkeit der Sorbentien, automatisierte Prozessführung, Serientauglichkeit des Herstellprozesses.
- Erarbeitung von Konzepten für eine weitere Skalierung in den multi-t_{CO2}/h-Maßstab

<u>eFuels-Synthese in Kombination mit DAC</u>

Für die globale eFuels-Produktion, besonders an Standorten mit sehr guten Bedingungen für erneuerbare Energien und wenigen hochkonzentrierten CO_2-Quellen, ist die wärmetechnische Einbindung von DAC in Power-to-X Prozesse von entscheidender Bedeutung. Ziel hierbei ist eine möglichst effiziente Abwärmenutzung aus Elektrolyse und Synthese, um damit maßgeblich den Energiebedarf für die CO_2-Bereitstellung aus der Luft zu decken. Am Standort Werlte

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

gibt es bereits ein Wärmemanagement-System und eine CO_2-Versorgung aus der benachbarten Biogasanlage das allerdings auf ca. 300 m^3_{CO2}/h limitiert ist. Durch die geplante Erweiterung mit der DAC100 würden weitere 50 m^3_{CO2}/h für die eFuels-Produktion bereitgestellt. Die Abwärmen aus der vorhandenen Elektrolyse und Synthese werden als ausreichend erachtet, um den Wärmebedarf für das geplante DAC100-Aggregat grundsätzlich zu decken. Dies erfordert jedoch eine effiziente Anlagenintegration, wie sie im Rahmen der Umsetzung in diesem Projekt geplant ist.

<u>e-gas-Anlage in Werlte</u>

Im Jahr 2013 ging die Power-to-Gas Anlage im emsländischen Werlte in Betrieb. Auf dem Gelände der e-gas Anlage werden drei drucklose alkalische Elektrolyseure mit einer Anschlussleistung von jeweils 2 MW und einer Wasserstoffproduktionsleistung von insgesamt 1300 Nm^3_{H2}/h bzw. 117 kg_{H2}/h betrieben. Dafür ist die Anlage direkt an das 20 kV Netz angebunden und verfügt über eigene Transformatoren und Gleichrichter, um die für die Elektrolyseure nötige Gleichspannung bereitzustellen. Der produzierte Wasserstoff wird gewaschen, verdichtet und getrocknet und in einem 120 m³ großen Mitteldrucktank zwischen gespeichert. Mit ionischen Kompressoren kann der gereinigte Wasserstoff auf bis zu 350 bar verdichtet und direkt in Wasserstofftrailer abgefüllt werden. Dabei liegt die maximale Füllleistung bei 50 kg/h. Neben der zusätzlichen Möglichkeit zur direkten Abfüllung des Wasserstoffs in Wasserstofftrailer, besteht die Option, den Wasserstoff mit dem Sabatier-Prozess zu methanisieren. Gemischt mit überschüssigem biogenem CO_2 aus einer benachbarten Biogasanlage wird der aufbereitete Wasserstoff vor Ort einem Methanisierungs-Rohrbündelreaktor zugeführt. Dabei werden bis zu 1300 Nm^3/h Wasserstoff und 350 Nm^3/h Kohlendioxid mittels einem Nickelkatalysators chemisch in 350 Nm^3/h bzw. 230 kg/h synthetisches Methan umgewandelt. Nach der anschließenden Aufbereitung des synthetisierten Methans kann es direkt in das regionale oder überregionale Erdgasnetz eingespeist. Damit ist die e-gas Anlage die weltweit größte Power-to-Gas Anlage ihrer Art. Seit Mitte des Jahres 2021 besteht die Option, das Methan einer Verflüssigungsanlage zuzuführen und bis zu 210 kg/h synthetisches LNG zu produzieren. Dabei wird das Methan mit flüssigem Stickstoff auf bis zu -160 °C herunter gekühlt. Nach der Verflüssigung wird das LNG in einem 60 m³ LNG-Tank gesammelt.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im vorliegenden Verbundprojekt gab es bei den regelmäßigen Projekttreffen einen regen Austausch und Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Projektpartnern. Hierbei bestand die Möglichkeit die Arbeitsgebiete der Partner kennenzulernen und Einblicke in deren Arbeitsweisen zu bekommen. Aufgrund des vorzeitigen Abbruchs des Projektes zum 29.02.2024 war der Austausch in erster Linie auf die theoretischen Arbeitspakete 1-3 bezogen.

II. Eingehende Darstellung

1 Erzielte Ergebnisse des Forschungsprojekts

1.1 AP 1: Konzeption DAC100 Gesamtprozess

Analyse des Prozessdesigns (M1.1)

Die gegenwärtig bereits im Rahmen von Pilotanlagen umgesetzten Direct Air Capture (DAC) Technologien, können hauptsächlich in Nieder- und Hochtemperaturverfahren differenziert werden. Hochtemperaturverfahren verwenden hierbei alkalische Kalium- oder Natriumhydroxidlösungen als Sorbens und arbeiten mit Desorptions-Temperaturen von etwa 900 °C. Im Gegensatz dazu werden bei Niedertemperaturverfahren Amine als Sorbens eingesetzt, und die Desorptions-Temperatur liegt lediglich bei circa 100 °C. Aufgrund des wässrigen Sorbens können Hochtemperaturverfahren als kontinuierliche Prozesse konzipiert werden, während Niedertemperaturverfahren in der Regel auf den Einsatz von feststoffgebundenen Aminen zurückgreifen. Aufgrund ihrer immobilen Eigenschaften resultiert dies typischerweise in einem Batch-Betrieb.

Die am ZSW entwickelte DAC-Technologie stellt einen Hybridansatz der beiden Verfahren dar und kombiniert den Vorteil eines kontinuierlichen Prozessablaufs mit einer niedrigen Desorptionstemperatur. Durch den kontinuierlichen Prozess werden Totzeiten, hohe Materialbelastungen und schwankende CO_2-Qualitäten vermieden, und der Aufwand für die Regelung ist vergleichsweise gering. Darüber hinaus weist das Verfahren aufgrund seiner robusten Technologie geringe Wartungskosten und eine gute Skalierbarkeit auf. Die hohe Reinheit des abgeschiedenen CO_2 ermöglicht neben der Sequestrierung auch die Weiterverwertung des CO_2 als Rohstoff für beispielsweise eine eFuels-Produktion.

Abbildung 1-1 stellt eine schematische Darstellung der aus Ab- und Desorber bestehenden ZSW-Technologie dar. Als Sorbens kommt hierbei eine auf Polyethylenimin (PEI) basierende Waschlösung zum Einsatz. Im Absorber wird nun CO_2-reiche Luft mittels Ventilatoren im Gegenstrom zur PEI-Waschlösung geführt, wobei sich das CO_2 an das Sorbens bindet und die Luft abgereichert wird. Mithilfe von Füllkörper-Schüttungen bzw. Packungen wird die Phasengrenzfläche im Absorber selbst vergrößert, um den Absorptionsprozess zu unterstützen. Die mit CO_2 angereicherte PEI-Waschlösung wird mittels einer Förderpumpe in den Desorber geleitet, wo das CO_2 unter erhöhter Temperatur aus der Waschlösung abgetrennt wird. Das noch feuchte CO_2 wird in einem nachgelagerten Schritt mittels Kondensationstrocknung aufbereitet, um die Feuchtigkeit zu entfernen. Die CO_2-abgereicherte PEI-Waschlösung wird vom Desorber wieder in den Absorber geleitet, wo der Prozess von vorne beginnt. Durch die Ausführung des Absorbers als eine Art „Gaswäscher“ kommt es zu einer Erhöhung der Luftfeuchtigkeit der einströmenden Luft bis zur Sättigungsgrenze – es wird also Wasser verdampft. Dieses muss im Umkehrschluss über eine Wassernachspeisung wieder nachgespeist werden, um die PEI-Konzentration im Prozess konstant zu halten.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

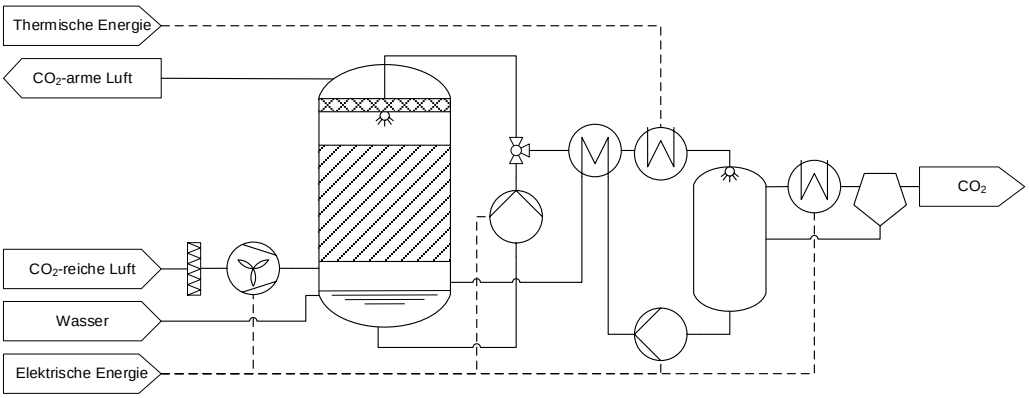

Abbildung 1-1: Schematische Darstellung des ZSW-DAC-Prozesses

Während der Absorptionsprozess in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur bei etwa 15 bis 20 °C stattfindet, liegt das Temperaturniveau im Desorber knapp über 100 °C. Ein Wärmeübertrager zwischen dem Absorber und dem Desorber wird verwendet, um den Flüssigkeitsstrom, der aus dem Absorber kommt, vorzuwärmen und den Flüssigkeitsstrom, der aus dem Desorber abgeht, abzukühlen. Dadurch wird einerseits die zusätzlich benötigte Wärme im Desorber reduziert und gleichzeitig die abzuführende Wärme im Absorber verringert. Die Abkühlung der PEI-Waschlösung vor ihrer Rückkehr in den Absorber ist erforderlich, um eine zusätzliche Wärmezufuhr zu vermeiden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hohe Temperaturen im Absorber sowohl zu einer geringeren CO_2-Aufnahme in der Waschlösung als auch zu einer erhöhten Verdunstung von Wasser führen.

<u>Ausarbeitung des Konzeptdesigns (M1.2)</u>

Aufgrund der niedrigen CO_2-Konzentration in der Atmosphäre werden große Luftvolumenströme benötigt. Entsprechend stellt der Absorber gegenüber dem Desorber die deutlich größere Komponente dar und muss entsprechend berücksichtigt werden.

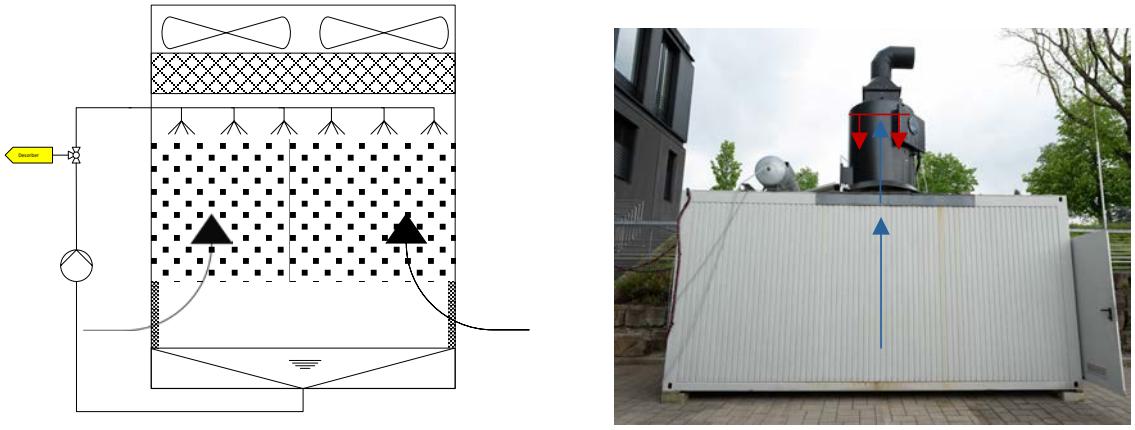

Abbildung 1-2: Schematische Darstellung des Absorbers als Gegenstrom-Turm (links) und Umsetzung in der DAC-1 Anlage (rechts)

Die bereits beschriebene ZSW-Technologie wird absorberseitig in Abbildung 1-1 im Gegenstrom-Prinzip umgesetzt. Alternativ hierzu kann der Absorber aber auch als Kreuzstrom-Variante realisiert werden. Hierbei wird dann die Luft nicht mehr im Gegenstrom zur Waschlösung, sondern im Kreuzstrom – sprich senkrecht – zur Waschlösung geführt. Am ZSW gibt es mit

der DAC-1 Anlage eine Turm-Modul ausgeführte Gegenstromanlage (vgl. Abbildung 1-2) und mit der DAC-10 Anlage eine als Container-Modul befindliche Kreuzstromanlage (vgl. Abbildung 1-3).

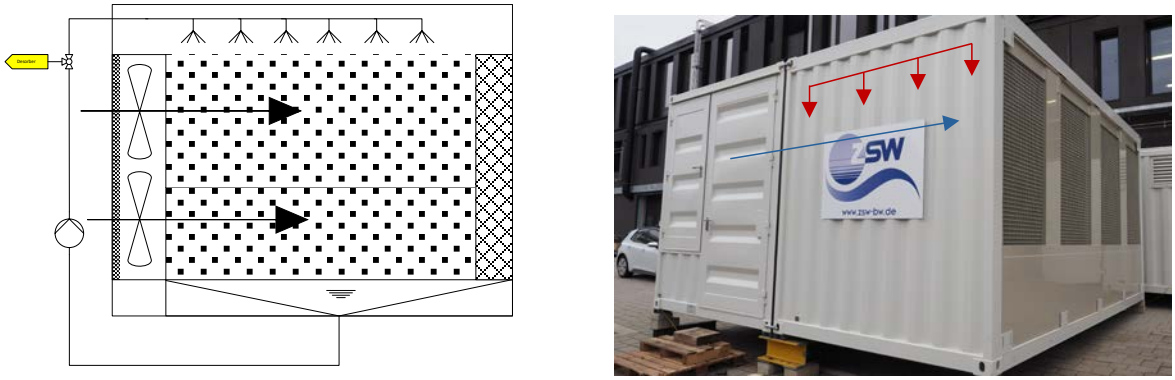

Abbildung 1-3: Schematische Darstellung des Absorbers als Kreuzstrom-Container (links) und Umsetzung in der DAC-10 Anlage (rechts)

Während eine Skalierung der Anlage auf 100 kg_{CO2}/h im Fall des Gegenstrom-Turmes eine Vergrößerung des einzelnen Basismoduls darstellt, wird im Fall der Kreuzstorm-Container eine Skalierung über die Zusammenschaltung mehrerer Basismodule realisiert. *Abbildung 1-4* zeigt auf der linken Seite einen ersten Entwurf für einen skalierten Absorberturm des ZSW und auf der rechten Seite einen Entwurf für eine skalierte Containeranlage der Firma Carbon-Engineering.

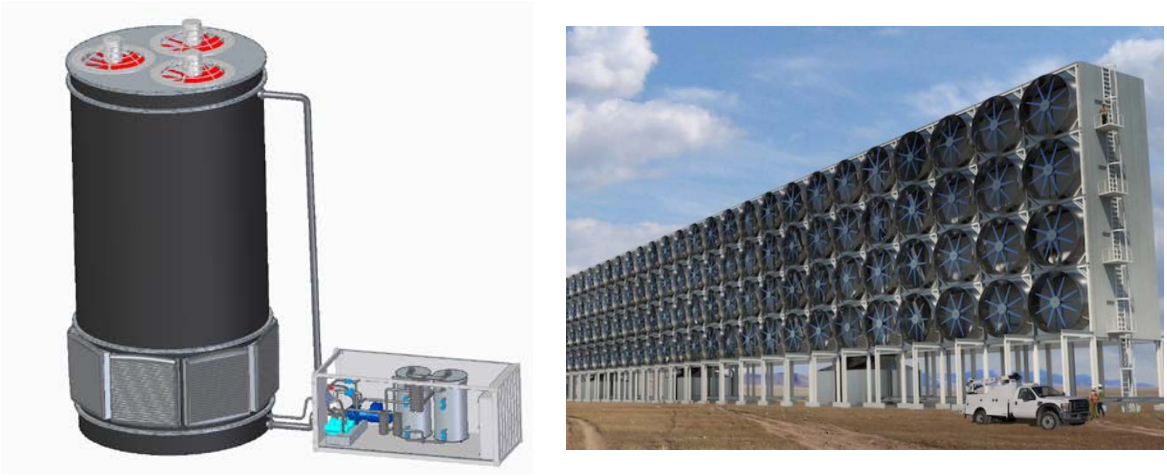

Abbildung 1-4: Gegenüberstellung der verschiedenen Skalierungskonzepte als Gegenstrom-Turm (links) und Kreuzstrom-Containervariante (rechts) (Quelle: carbonengineering.com)

Im Kontext des ersten Arbeitspaktes werden beide Konzepte mit Blick auf verschiedene Kriterien wie die Industrialisier- und Skalierbarkeit analysiert und bewertet. Tabelle 1-1 stellt die verschiedenen Bewertungskriterien, die Gewichtung mittels binärem Vergleich, sowie die Punktevergabe (1 = schlecht; 10 = sehr gut) der beiden Konzepte dar. Mit 5,7 Punkten schneidet das Gegenstrom-Turmmodul deutlich besser als das Kreuzstrom-Containermodul ab. Ursache hierfür sind in erster Linie die bessere Wartbarkeit, höhere Lebensdauer und niedrigeren spezifischen Investitionskosten aufgrund einer geringeren Teileanzahl. Durch den einfacheren Aufbau und die nicht benötigte Verschaltung mehrere Module wird darüber hinaus die Umweltsicherheit erhöht, da die Wahrscheinlichkeit für einen PEI-Austritt reduziert wird. Ebenso wird

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

durch die geringere Komponentenanzahl mit größeren Abmessungen ein effizienterer Betrieb der Turmanlage gegenüber der Containeranlage erwartet.

Tabelle 1-1: Gewichtete Bewertung des Gegenstrom-Turms und Kreuzstrom-Containers nach verschiedenen als relevant betrachteten Bewertungskriterien

Bewertungskriterium	Gewichtung [%]	Gegenstrom-Turm		Kreuzstrom-Container	
		Bewertung	Punkte	Bewertung	Punkte
Spez. Flächenverbrauch [m²/kg$_{CO2}$]	9,7	4	0,39	5	0,49
Wartungsaufwand (Zugänglichkeit etc.)	9,7	6	0,58	5	0,49
Dynamisches Verhalten der Anlage	18,1	5	0,91	6	1,09
Spez. Investitionskosten [€/kg$_{CO2}$]	9,7	7	0,68	5	0,49
Lebensdauer der Anlage	13,9	7	0,97	5	0,70
Skalierbarkeit des Absorbers (max. Modulgröße)	2,8	7	0,20	4	0,11
Gegenseitige Modulbeeinflussung bei Großanlagen	1,4	4	0,06	6	0,08
Havarie-Eintrittswahrscheinlichkeit	22,2	6	1,33	4	0,89
spez. Energieverbrauch im Betrieb [kWh/kg$_{CO2}$]	12,5	5	0,63	4	0,50
Summe	**100**		**5,7**		**4,8**

Als Fazit der Konzeptauswahl wird daher das Turmmodul dem Containermodul vorgezogen und soll letztlich in der e-gas Anlage in Werlte umgesetzt werden.

<u>Einbindung in die e-gas Anlage Werlte</u>

Als Standort für die DAC-100 Anlage ist die e-gas-Anlage in Werlte vorgesehen, welche von der KIWI AG betrieben wird. Die dort im Jahr 2013 in Betrieb genommene Power-to-Gas Anlage ist in der Lage bis zu 350 Nm³ Methan pro Stunde zu produzieren. Der hierfür benötigte Wasserstoff (ca. 1300 Nm³/h) wird vor Ort mittels alkalischer Elektrolyse erzeugt – das ebenfalls benötigte CO_2 (ca. 350 Nm³/h) stammt aus einer auf dem Gelände befindlichen Biogasanlage. Mit der Integration der DAC-100 Anlage in den Gesamtprozess soll nicht nur eine weitere CO_2-Quelle erschlossen werden, sondern auch die Skalierbarkeit der Technologie und der Betrieb in Realumgebung gezeigt werden. Abbildung 1-5 zeigt eine Luftaufnahme der in Werlte befindlichen e-gas Anlage mit der für die DAC-100 Anlage vorgesehen rot eingefärbten Aufstellfläche.

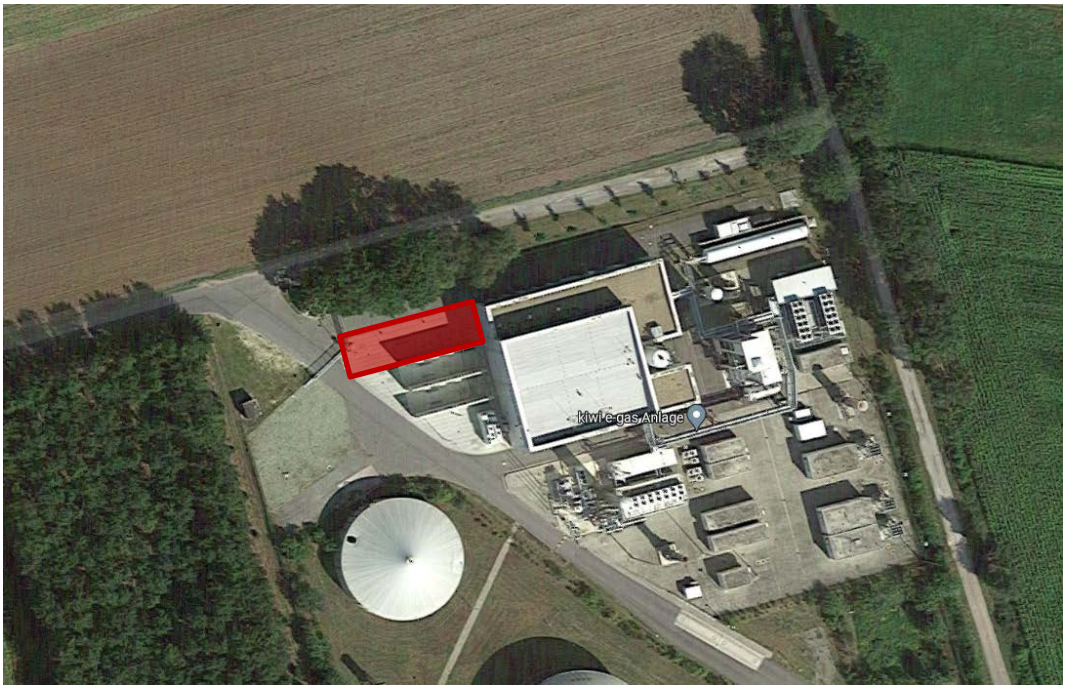

Abbildung 1-5: Luftaufnahme der e-gas Anlage der KIWI AG (Quelle: google.de/maps)

Die Fläche besitzt in etwa eine Breite von 6 m und eine Länge von 25 m. Grundsätzlich ist diese Fläche ausreichend um eine Anlage mit einer Kapazität von 100 kg_{CO2}/h aufzustellen. Durch den schmalen Zuschnitt der Fläche mit einer Breite von maximal 6 m wird bei Verwendung eines einzelnen Turmmoduls dieses jedoch bei 100 kgCO2/h nicht seinen optimalen Betriebspunkt besitzen. Hintergrund ist die festgelegte Luftmenge von ca. 300.000 m³/h und das benötigte Packungsvolumen von ca. 300 m³. Durch eine kleine Grundfläche muss der Turm entsprechend höher gebaut werden und der Druckverlust nimmt durch die steigende Luftgeschwindigkeit zu – was im Umkehrschluss einen Effizienz- bzw. Wirkungsgradverlust nach sich zieht. Eine Alternative hierzu ist die Aufstellung eines zweiten Turmes. Dieser erhöht jedoch die spezifischen Investitionskosten, welche im Rahmen des Projektes begrenzt sind. Letztlich bewegt sich die Dimensionierung im Spannungsfeld zwischen einem vorgegebenen Standort, einer gewünschten Abscheiderate von 100 kg_{CO2}/h und einem begrenzten Budget.

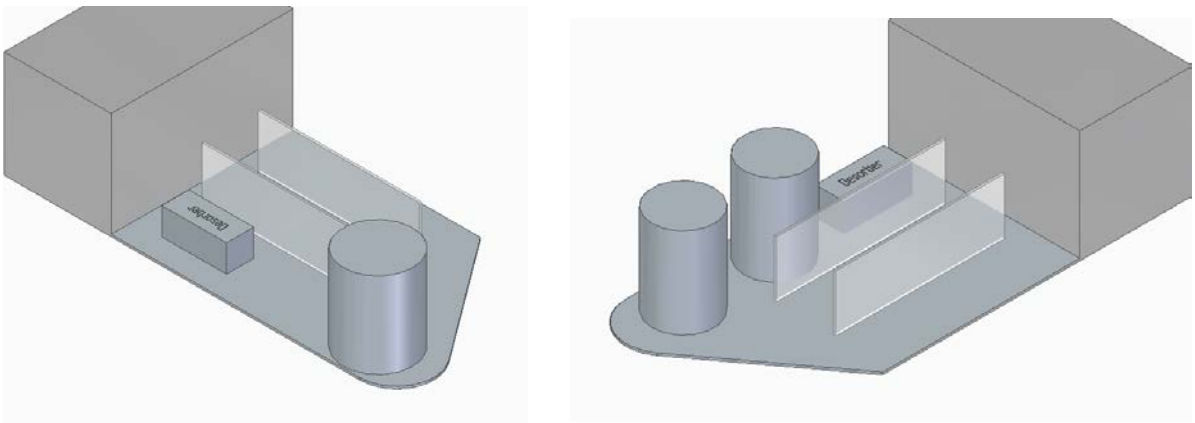

Abbildung 1-6: 3D-Ansicht für eine mögliche DAC-100 Aufstellung am Standort Werlte für die Option mit einem bzw. zwei Absorbertürmen

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

1.2 AP 2: Engineering DAC100 Absorbereinheit und Absorbens

Das Zentrum für Sonnenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) ist verantwortlich für das Arbeitspaket 2 (Absorber) sowohl was die technische Ausarbeitung als auch die Vergabe / Beschaffung in Arbeitspaket 4 betrifft. Die Ausarbeitung des fertigungsrelevanten Detailengineerings sollte in Zusammenarbeit mit dem industriellen Fertigungspartner erfolgen, welcher über den Vergabeprozess ausgewählt wird, da nur so sichergestellt werden kann, dass der Hersteller bei der Lieferung auch Garantien (wie z.B. CE-Zertifikat) übernehmen und seine eigenen Dokumentationsmethoden anwenden kann. Hierdurch wird den Firmen ermöglicht kostengünstiger anbieten zu können, da sowohl bereits vorhandenes Fertigungs-Knowhow als auch firmenspezifische Baugruppen integriert werden können.

<u>Detail-Engineering CO_2-Absorbereinheit (M2.1)</u>

Für die CO_2-Absorbereinheit wurden durch das ZSW auf Basis von Vorerfahrungen sowie Simulationen detaillierte und an die räumlichen Gegebenheiten am Anlagenstandort Werlte angepasste Engineeringkonzepte erstellt. Diese beinhalten beispielsweise detaillierte Spezifikationen bzgl. der Abmaße, der einzusetzenden Materialien oder auch der benötigten Energie- und Massenströme und dienen als Basis für das fertigungsrelevante Engineering durch den Fertiger.

Das ZSW ist als gemeinnützige Stiftung verpflichtet, bei Investitionen von über 215.000 € die Vergabe von Aufträgen über ein Vergabeverfahren abzuwickeln. Hierfür wurde auf der öffentlich zugänglichen Plattform der „deutsche-evergabe“ die Fertigung des Absorbers in einem 2-stufigen Verfahren ausgeschrieben. Es wurden vier Firmen aktiv auf die Ausschreibung aufmerksam gemacht. In der am 12.09.2023 gestarteten ersten Vergabestufe wurde die weitere Teilnahme am Vergabeprozess an gewisse leistungsbezogene Teilnahmebedingungen geknüpft. Diese beinhalteten Vorgaben zur wirtschaftlichen, finanziellen sowie technischen Leistungsfähigkeit der Unternehmen. Im Falle der technischen Leistungsfähigkeit wurden beispielsweise Referenzen in Bezug auf Nassabscheider mit Gasvolumenströmen von mindestens 200.000 Nm^3/h gefordert. Insgesamt kam zum 11.10.2023 von vier Unternehmen eine Interessensbekundung und die Anforderung des Lastenheftes zur Angebotsabgabe. Das Angebot sollte die Ausarbeitung des fertigungsrelevanten Detailengineerings und die anschließende Fertigung der Absorbereinheit beinhalten. Im Lastenheft wurden detaillierte Vorgaben zu dem favorisierten Detailkonzept mit Umsetzungsvarianten definiert. Die Angebote sollten auf Basis der in Tabelle 1-2 aufgeführten Kriterien bewertet und entsprechend der Zuschlag vergeben werden. Die Frist endete am 15.12.2023 ohne die Abgabe eines Angebots.

Die beteiligten Unternehmen gaben teilweise an, dass sie Interesse an der Umsetzung haben, jedoch die finanziellen Risiken beim Übergang vom Detailengineering in die Umsetzungsphase nicht adäquat bewerten konnten und die internen Richtlinien die Abgabe eines bindenden Angebots verbieten. Im nächsten Schritt wurden daher mit ausgewählten Firmen und nach Rücksprache mit dem PtJ, erfolgreich bilaterale Verhandlungen aufgenommen. Von zwei Firmen liegen auch jeweils entsprechende Angebote für das Detail-Engineering mit einer Bereitschaft zur späteren Fertigung vor. Aufgrund der vorzeitigen Beendigung des Projektes kam es jedoch zu keiner Auftragsvergabe.

Tabelle 1-2: Gewichtung der Zuschlagskriterien

	Zuschlagskriterien	Gewichtung %	Grundlage Punktebewertung	Punkte min./max.
1	Angebotspreis	30	Angebot mit niedrigster Wertungssumme	10
			Angebote mit zweifachen der niedrigsten Wertungssumme	0
2	Umsetzung der im Lastenheft definierten Vorgaben / Umsetzungskonzept	50	Voll erfüllt	10
			Nicht erfüllt	0
3	Lieferzeit	20	Kürzeste Lieferzeit	10
			Längste Lieferzeit	2
	Summe	100		

<u>CO_2-Sorbens für DAC-100 validiert und ausgewählt (M2.2)</u>

Gaswäscher, wie sie etwa zur Reinigung von Rauchgasen eingesetzt werden, stellen seit Jahrzehnten bewährte, robuste und wirtschaftliche Technologien dar, die sich auf modularer Ebene effizient skalieren lassen. Während bei der Rauchgasreinigung CO_2-Konzentrationen von bis zu 15 % auftreten können, ist die CO_2-Konzentration in der Umgebungsluft mit nur 0,04 % deutlich geringer, was zu hohen notwendigen Luftvolumenströmen führt. Die in der Rauchgasreinigung üblichen Absorbentien, wie Monoethanolamin (MEA) oder Diethanolamin (DEA), sind bei diesen hohen Luftvolumenströmen aufgrund ihrer Flüchtigkeit und des daraus resultierenden Verlusts während des Prozesses jedoch weder ökonomisch noch ökologisch vertretbar. Die Auswahl oder Entwicklung geeigneter Absorbentien ist daher ein zentraler Faktor für den erfolgreichen Einsatz von Wäschertechnologien zur CO_2-Abscheidung aus der Umgebungsluft.

Die Eigenschaften der eingesetzten Polyethylenimine, wie Art und Anzahl der Amingruppen (primär, sekundär, tertiär), Vernetzungsgrade oder auch Molekulargewichte, beeinflussen maßgeblich die Kinetik der CO_2-Absorption, die Aufnahmekapazität, den Energiebedarf und die Degradation. Ebenso haben Faktoren wie Herstellkosten und weitere Eigenschaften wie Toxizität einen wesentlichen Einfluss auf die Kosteneffizienz und Umweltverträglichkeit des DAC-Prozesses.

Im Zuge des AP 2 gab es diverse Laboruntersuchungen zur Bewertung von Einflüssen auf das CO_2-Absorptionsverhalten durch Temperatur und PEI-Konzentrationen (vgl. Abbildung 1-7).

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Abbildung 1-7: Laborinfrastruktur zur Validierung verschiedener Sorbentien am ZSW

Darüber hinaus wurde ein erfolgreicher Test eines um den Faktor 9 günstigeren Polyethylenimins – gegenüber dem Stand vor dem Projekt – im Rahmen einer Langzeit-Messkampagne mit über 8.000 h an der DAC-1 Anlage in Realumgebung durchgeführt. Aufgrund der vorzeitigen Beendigung des Projektes kam es jedoch zu keiner finalen Auswahl eines Sorbens.

1.3 AP 3 Engineering DAC100 CO_2-Desorbereinheit

In Arbeitspaket 3 (Desorber) bringt das ZSW bestehendes Know-how in die Vorentwicklung ein, wobei die Koordination der Arbeiten die ela Industriegas GmbH und die Vergabe die atmosfair gGmbH in Arbeitspaket 4 übernimmt. Die Ausarbeitung des fertigungsrelevanten Detailengineerings sollte in Zusammenarbeit mit dem industriellen Fertigungspartner erfolgen, welcher über den Vergabeprozess ausgewählt wird, da nur so sichergestellt werden kann, dass der Hersteller bei der Lieferung auch Garantien (wie z.B. CE-Zertifikat) übernehmen und seine eigenen Dokumentationsmethoden anwenden kann. Hierdurch wird den Firmen ermöglicht kostengünstiger anbieten zu können, da sowohl bereits vorhandenes Fertigungs-Knowhow als auch firmenspezifische Baugruppen integriert werden können.

Da der Desorber über das Unternehmen Atmosfair gGmbH finanziert wird, ist nach Rücksprache mit dem PtJ kein aufwendiges Ausschreibungsverfahren notwendig, sondern es genügen Vergleichsangebote und schließlich die Freigabe durch das PtJ. In einer durchgeführten Interessensabfrage bei Unternehmen gab es zwei positive Rückmeldungen. Von einer Firma liegt ein entsprechend Angebot für das Detail-Engineering mit einer Bereitschaft zur späteren Fertigung bereits vor. Aufgrund der vorzeitigen Beendigung des Projektes kam es jedoch zu keiner Auftragsvergabe.

1.4 AP 4 Beschaffung DAC100 Subsysteme und FAT

Die vorzeitige Beendigung des Verbundprojekts ist vor Beginn des Arbeitspaketes 4 erfolgt.

1.5 AP 5 Integration und Inbetriebnahme DAC100

Das Arbeitspakt 5 beinhaltet die Planung des Aufbauorts der DAC-Anlage, welches auf der Abbildung 1-5 abgebildet ist. Dort sind Rohrleitungen, wie Wasserleitungen, Steuerluft sowie Stromleitungen vorhanden. Außerdem wurden relevante Schnittstellen, wie CO2 Spezifikation

und das Wärmemanagement zur PtG-Anlage festgelegt. Vor Projektabbruch gab es erste Gespräche mit den zuständigen Genehmigungsbehörden.

1.6 AP 6 Testbetrieb DAC100 und Monitoring

Die vorzeitige Beendigung des Verbundprojekts ist vor Beginn des Arbeitspaketes 6 erfolgt.

1.7 AP 7 Skalierung und Industrialisierung

Die vorzeitige Beendigung des Verbundprojekts ist vor Beginn des Arbeitspaketes 7 erfolgt.

2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Da das Datum des Projektabbruchs (29.02.24) mit dem des letzten Zwischen- und Verwendungsnachweis übereinstimmt, erfolgte der detaillierte zahlenmäßige Nachweis bereits in diesem Rahmen.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Gewinnung von CO_2 aus der Umgebungsluft ist neben der bereits etablierten Elektrolyse eine Schlüsseltechnologie für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe (eFuels) und spielt eine zentrale Rolle in der Dekarbonisierung von Luft- und Schifffahrt. Während sich mittlerweile zahlreiche Startups mit der Entwicklung von Direct-Air-Capture (DAC)-Lösungen beschäftigen, besteht ein wesentlicher Bedarf an konkreten Nachweisen zur großtechnischen Skalierbarkeit dieser Technologie. Ein weiterer bisher vernachlässigter Aspekt ist darüber hinaus die ganzheitliche Betrachtung der Prozesskette – von der Abscheidung des CO_2 aus der Luft bis zur Synthese von eFuels. Dies ist unerlässlich, um die industrielle Einsatzfähigkeit und die Wirtschaftlichkeit der Technologie im großen Maßstab zu validieren. Mit dem Projekt Air2Fuel und der Integration der ZSW DAC-Technologie in den e-gas-Anlagenkomplex in Werlte, wären sowohl die Skalierbarkeit der DAC-Technologie (Kapazität 1.000 t/a) als auch die gesamte Prozesskette zum eFuel im industriellen Maßstab nachgewiesen worden.

4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertung der Ergebnisse

Obwohl das Projekt mit der Erstellung der Lastenhefte für die Hauptkomponenten CO_2-Absorber und CO_2-Desorber endete und es nicht zu einer praktischen Umsetzung kam, wurden wichtige Grundlagen für die Realisierbarkeit des DAC-Prozesses geschaffen. Die Ausarbeitung der Lastenhefte legt dabei ein solides Fundament für zukünftige Entwicklungen und die potenzielle industrielle Anwendung dieser Technologie, die für eine nachhaltige Energiewende unverzichtbar ist. Zudem konnten bedeutende Fortschritte bzgl. der Charakterisierung und Degradationsstabilität von Sorbentien auf Basis von Polyethylenimin gemacht werden.

Über die Ausschreibung und Ansprache von Firmen bzgl. des Detail-Energineering und Fertigung des CO_2-Absorbers und des CO_2-Desorbers wurden darüber hinaus deutschlandweit Firmen auf das Thema Direct Air Capture aufmerksam gemacht und sensibilisiert.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

5 Bekannt gewordener Fortschritt während des Projekts

Zwischen 2022 und 2024 hat die Direct Air Capture (DAC)-Technologie bedeutende Fortschritte gemacht und sich zunehmend als essenzielles Element in der Entwicklung von nachhaltigen Kraftstoffen, besonders in der eFuels-Produktion, etabliert. Die steigende Nachfrage nach kohlenstoffneutralen Energieträgern und die Notwendigkeit, CO_2-Emissionen aus schwer zu dekarbonisierenden Sektoren wie der Luft- und Schifffahrt zu senken, haben das Interesse an DAC erheblich verstärkt. So ist die Anzahl der Unternehmen, die sich auf DAC-Technologien spezialisieren, deutlich angestiegen. Weltweit arbeiten derzeit weit über 100 Startups und etablierte Firmen an der Weiterentwicklung und Skalierung von DAC-Technologien. Mit der Anlage Mammoth der Firma Climeworks in Island und Stratos der Firma Carbon Engineering sind die ersten Anlage mit einer nennenswerten Kapazität von 40.000 t_{CO2}/a bzw. 500.000 t_{CO2}/a bereits in Betrieb bzw. im Bau befindlich. Jedoch gibt es nach wie kaum relevante Projekte im Bereich eFuels – erwähnenswert sind hier beispielhaft das Projekt Haru Oni in Chile, wobei das CO_2 aktuell aus biogenen Quellen stammt oder die geplante Forschungsplattform TPP des DLR in Leuna. Ein zentraler Aspekt für die Technologieentwicklung ist darüber hinaus die Anerkennung von DAC als nachhaltige Kohlenstoffquelle, da die Technologie direkt aus der Luft gewonnenes CO_2 nutzt, ohne neue fossile Emissionen zu verursachen. Die EU und Deutschland arbeiten derzeit an Regelungen, um DAC und andere CO_2-Entnahmeverfahren in den Europäischen Green Deal und die Fit-for-55-Ziele zu integrieren, was Investitionen in die Technologie fördert und die Skalierung durch steuerliche Anreize und Subventionen vorantreibt.

6 Erfolgte/geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Aufgrund des frühen Projektabbruchs in der Planungsphase des Projektes sind weder Veröffentlichungen erfolgt noch sind welche geplant.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	**2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)** Veröffentlichung (Publikation)
3. Titel Schlussbericht zum Verbundprojekt: "Großtechnisch skalierbare Direct Air Capture Technologie für die Produktion von eFuels auf Basis von Luft-CO2"	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Cramer, Sebastian (ela Industriegas GmbH) Vollmer, Raphael (ZSW) Werner, Dr. Ute (Atmosfair gGmbH) Zuber, Christian (ela Industriegas GmbH) Zuberbühler, Ulrich (ZSW)	**5. Abschlussdatum des Vorhabens** 29.02.2024
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Sonstiges
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) ela Industriegas GmbH	**9. Ber.-Nr. Durchführende Institution**
	10. Förderkennzeichen 03EE5142A
	11. Seitenzahl 21
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) BMWK	**13. Literaturangaben**
	14. Tabellen 2
	15. Abbildungen 7
16. DOI (Digital Object Identifier) -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -	
18. Kurzfassung In dem Verbundprojekt „Air2Fuel“ sollte eine bereits erprobte, effiziente und für die Synthese von eFuels ausgelegte DAC-Technologie des ZSW, die bislang als Demonstrator im Maßstab 1 kgCO2/h (DAC1) validiert wurde, aufgegriffen in Kooperation mit den Projektpartnern industrialisiert und erstmalig in den Maßstab 100 kgCO2/h (DAC100) umgesetzt werden. Mit der Erstellung der Lastenhefte für die Hauptkomponenten CO2-Absorber und CO2-Desorber wurden wichtige Grundlagen für die Realisierbarkeit des DAC-Prozesses geschaffen. Die Ausarbeitung der Lastenhefte legt dabei ein solides Fundament für zukünftige Entwicklungen und die potenzielle industrielle Anwendung dieser Technologie, die für eine nachhaltige Energiewende unverzichtbar ist. Zudem konnten bedeutende Fortschritte bzgl. der Charakterisierung und Degradationsstabilität von Sorbentien auf Basis von Polyethylenimin gemacht werden. Über die Ausschreibung und Ansprache von Firmen bzgl. des Detail-Energineering und Fertigung des CO2-Absorbers und des CO2-Desorbers wurden darüber hinaus deutschlandweit Firmen auf das Thema Direct Air Capture aufmerksam gemacht und sensibilisiert. Obwohl das Projekt vorzeitig zum 29.2.2024 beendet werden musste und es dadurch nicht mehr zu einer praktischen Umsetzung kam, wurden wichtige Grundlagen für die Realisierbarkeit des DAC-Prozesses geschaffen.	
19. Schlagwörter -	
20. Verlag -	**21. Preis** -

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2470704-5