

CO₂ Bilanzanalyse der Direct-Air-Capture-Technologie

DACT-Analyse

Eine Betrachtung, hinsichtlich der bis zum Jahr 2030 zu erreichenden Klimaziele in der Metropolregion Nürnberg, die sich mit dem Thema CO₂ Filterung und der Bilanzierung des CO₂ Einsparungspotentials beschäftigt.

Kontaktdaten des Projektbearbeiters:

Name: Baumgart Roman

Matrikelnummer 2812050

Anschrift: 90429 Nürnberg
Pillenreuther Straße

E-Mail: Baumgartro64690@th-Nuernberg.de

Mobil: +49 15201376727

Datum: 19.04.2018 Unterschrift: _____

Inhaltsverzeichnis

1 Überblick.....	4
2 Stand der Technik.....	4
2.1 Direkte Luftentnahme.....	4
2.1.1 Hintergrund.....	4
2.1.2 Funktionsweise.....	5
2.2 Andere Varianten der CO ₂ Abscheidung.....	5
3 Folgeanwendungen.....	7
3.1 Methanisierung.....	9
3.2 Pflanzenwachstum.....	9
3.3 Power to Liquid.....	10
3.4 Endlagerung.....	10
3.5 Kältemittel.....	11
4 Allgemeine Problematiken.....	11
4.1 Wirtschaftlichkeit.....	11
4.2 Konkurrenzfähigkeit.....	13
4.3 Gesellschaftliche Akzeptanz.....	14
5 Technische Analyse.....	14
5.1 Vorteile.....	14
5.2 Nachteile.....	15
5.3 Bilanzanalyse.....	15
5.3.1 Geometrie.....	15
5.3.2 CO ₂ Auffangrate bei gegebener Filterfläche.....	17
5.3.3 Energiebedarf.....	19
5.3.4 Variation der Leistung.....	21
5.3.5 Erweiterte Betrachtung.....	23
6 Konzeptmöglichkeiten.....	25
6.1 Analyse der CO ₂ -Nutzungsmöglichkeiten.....	25
7 Fazit.....	26
8 Quellenverzeichnis.....	28

I Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Direkt-Air-Capturing - Quelle: Carbon Engineering.....	5
Abbildung 2: Kraftwerksfilterung - Quelle: IfaS.....	7
Abbildung 3: Verwertungsmöglichkeiten CO ₂ - Eigene Grafik.....	8
Abbildung 4: CO ₂ Vermeidung - Eigene Grafik.....	12
Abbildung 5: Struktur schematisch - Quelle: R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH.....	15
Abbildung 6: Absorptionsrate in Abh. der Geschwindigkeit - Eigene Grafik.....	16
Abbildung 7: Übergang laminarer / turbulenter Strömungsbereich - Eigene Grafik.....	20

II Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Standardenthalpien bei 25°C und Umgebungsdruck - Quelle: science.net.....	18
Tabelle 2: Energiebedarf PtL & PtG, überschlägig aus Anlagen Kennzahlen errechnet.....	22
Tabelle 3: Summe aller Energien, bezogen auf ein kg CO ₂	22
Tabelle 4: Folgeanwendungen mit Potentialanalyse.....	24

III Abkürzungsverzeichnis

CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CCS	Carbon Capture and Storage
DAC	Direct Air Capturing
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EMN	Europäische Metropolregion Nürnberg
PtG	Power to Gas
PtL	Power to Liquid
TRL	Technology Readiness Level
HCO ₃	Hydrogencarbonat
GWP	Global warming potential

1 Überblick

Die Untersuchung welche im Rahmen des energietechnischen Hochschulprojekts: „Projekt Energietechnik“ durchgeführt wird, soll sich im Allgemeinen mit der Direct-Air-Capture Technologie beschäftigen und erste Fragen zur Rentabilität, Kapazität und dem Potenzial der Technologie für die EMN beantworten. Des Weiteren sollen auch mögliche Forschungsrisiken aufgezeigt werden. Das Projekt wird in drei Oberpunkte aufgegliedert: Als erstes wird die Funktionalität der Technik geklärt und auf Optimierungsmöglichkeiten untersucht. Anschließend wird ein Ausblick auf das CO₂ Einsparungspotenzial gegeben. Hierzu werden alle notwendigen Einflussfaktoren wie der aktuelle Strommix Wert und die CO₂ Belastung in der Metropolregion berücksichtigt. Abschließend werden verschiedene Konzepte ausgearbeitet, welche aufzeigen sollen, wie und wo eine Direct-Air-Capture Anlage am effektivsten und effizientesten zu errichten wäre. Auf die Wirtschaftlichkeit der Anlagen wird nur überschlüssig eingegangen.

2 Stand der Technik

Im Folgenden wird die DAC Technologie genauer betrachtet und mit anderen Möglichkeiten der CO₂ Abscheidung verglichen.

2.1 Direkte Luftentnahme

2.1.1 Hintergrund

Das Technologiekonzept der direkten Luftfilterung ist bereits seit über 10 Jahren bekannt und wurde in der Schweiz vor einem Jahr zuerst serientauglich in eine wirtschaftliche Anwendung überführt. Der kommerzielle Nutzen beschränkt sich derzeit auf die Verwertung des Kohlendioxids in Gewächshäusern. Ein Pilotprojekt des schweizer Herstellers Climeworks in Zusammenarbeit mit Audi und Sunfire soll

in Deutschland über 1000 Tonnen CO₂ pro Jahr filtern und an ein angrenzendes Gewächshaus abgeben. Das CO₂ soll des Weiteren dazu genutzt werden um so genannten E-Diesel herzustellen.

2.1.2 Funktionsweise

Es gibt verschiedene Formen von DAC. Diese sind einerseits die Kaustifizierung, die Amin basierte Filterung und die Karbonatisierung. Letzteres soll im Folgenden genauer untersucht und beschrieben werden. Das Konzept beruht auf einer kühlturnartigen Absorberfläche welche von der Umgebungsluft umströmt wird. Der Absorber enthält eine Hydroxid-Lösung welche das CO₂ binden soll. Im nächsten Schritt wird die CO₂ reiche Lösung in einen Pellet-Reaktor überführt in welchem, mithilfe von Wasser, Calciumcarbonat-Pellets abgeschieden werden. Im dritten Verfahrensschritt werden die getrockneten Pellets dann erhitzt was zu einer Aufspaltung der Chemischen Verbindung führt, diesen Prozess nennt man auch Kalzinieren. Das CO₂ ist nun vollständig vom Carbonat getrennt. Das Calciumoxid welches als Nebenprodukt nach der Erhitzung zurück bleibt wird abschließend hydriert und in den Pellet-Reaktor zurückgeführt.

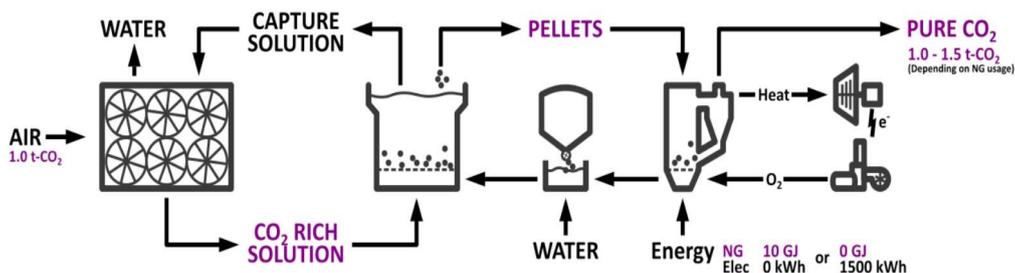
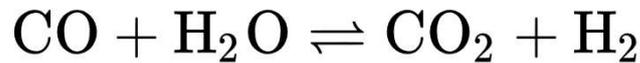


Abbildung 1: Direkt-Air-Capturing - Quelle: Carbon Engineering

2.2 Andere Varianten der CO₂ Abscheidung

Eine Möglichkeit die CO₂-Emissionen in Kohlekraftwerken zu senken ist die so genannte „Pre-Combustion-Capturing“. Bei diesem Verfahren reagiert die Kohle in

einem ersten Schritt unter-stöchiometrisch mit Wasser zu Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid. Anschließend wird mithilfe eines Katalysators eine Homogene Wassergasreaktion durchgeführt. Bei Drücken von bis zu 60 bar reagiert Kohlenstoffmonoxid mit Wasserdampf zu Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff.



Nach der Reaktion liegt im Gasgemisch, aufgrund des hohen Druckes bei der Reaktion, ein hoher CO₂-Partialdruck vor. In dieser Form lässt sich das CO₂ mittels Physikalischer Absorption aus dem Gasgemisch absorbieren.

Eine weitere Variante ist das „Post-Combustion-Capturing“. Analog zum oben beschriebenen Verfahren wird hierbei das CO₂, in einem auf den Verbrennungsprozess anschließendem Prozessschritt, abgeschieden. Die Abgase eines Kohlekraftwerks haben einen CO₂-Partialdruck von ca. 15 %, was die Abscheidung aufgrund des hohen Stickstoffanteils erheblich erschwert. Ein Verfahren, das CO₂ aus dem Abgas zu selektieren, ist hierbei die Aminwäsche. Bei dieser werden feine Amin-Tröpfchen in das Abgas gesprüht. Das CO₂ lagert sich bei 27°C an die Tröpfchen an und kann im darauffolgenden Schritt mittels eines Abscheiders bei ca. 150°C von einander getrennt werden. Die Wirkungsgrad Einbußen des Verfahrens belaufen sich auf ca. 6% je nach Größe des Kraftwerks. Es kann eine CO₂ Ersparnis von bis zu 90% erreicht werden.

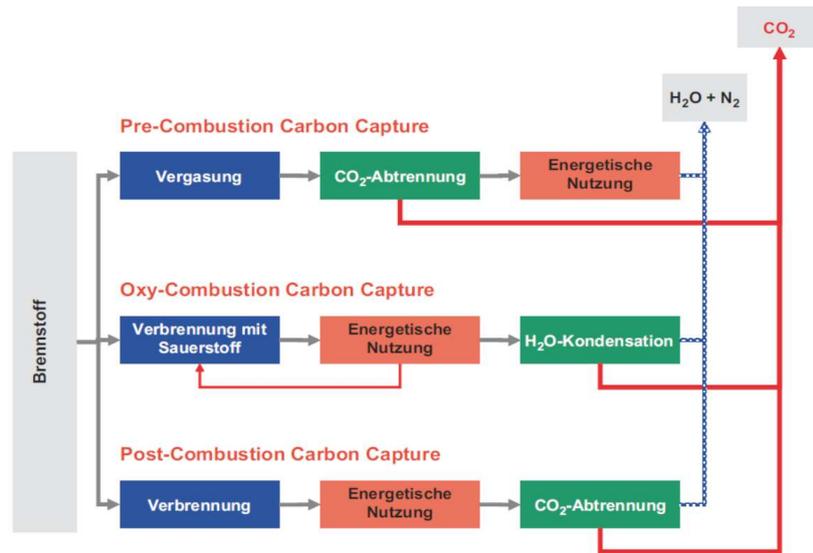


Abbildung 2: Kraftwerksfilterung - Quelle: IfaS

Es existieren noch weitere Methoden, die CO₂-Emissionen eines Kohlekraftwerks zu senken, wie das Oxyfuel-Verfahren oder die CO₂-Sequestrierung, jedoch sind diese Verfahren aufgrund ihrer festen Integration in den Prozesskreislauf unflexibel und haben zudem größere Wirkungsgrad-Einbußen zu vermerken.

3 Folgeanwendungen

Um tatsächlich einen positiven Beitrag zum Klimawandel beitragen zu können, muss der Kreislauf des Kohlenstoffdioxids nach dem Filtern geschlossen werden. Ein Prozess kann vereinfacht in eine von drei Kategorien eingeordnet werden. Erstens, CO₂ positiv, also ein Prozess mit positiven Kohlendioxid-Emissionen, zweitens, CO₂ neutral, es wird also weder emittiert noch absorbiert, oder drittens, CO₂ negativ, also ein Prozess, in welchem der atmosphärische CO₂-Anteil dauerhaft verringert wird. Alle erneuerbaren Energieerzeugungsprozesse sind in erster Linie CO₂-neutral. Das bedeutet, dass sie einen konventionellen Energieerzeuger ersetzen und somit dessen CO₂-Emissionen einsparen. Mit Hilfe der DAC-Technologie lässt sich allerdings nicht nur CO₂ vermeiden, es ist sogar möglich, den Emissionsprozess umzukehren und sogenannte negative Emissionen zu erzielen. Diese negativen Emissionen setzen

allerdings voraus, dass das aus der Luft gewonnene CO₂ nach dem Filtern in keinsten-
 weise zurück in die Atmosphäre gelangt. Wie genau die Bilanz eines DAC
 Gesamtkonzepts aussieht, also negativ oder positiv, hängt einzig von dessen
 Folgeanwendung ab. Auch CO₂-positive Konzepte können die Allgemeinen
 Emissionen der EMN senken, da sie beispielsweise zur Erzeugung von CO₂ armen
 Kraftstoffen eingesetzt werden, welche wiederum stärker belastete Kraftstoffe
 ersetzen. Im Folgenden sollen einige Konzeptmöglichkeiten zur weiterführenden
 CO₂ Nutzung erläutert werden.

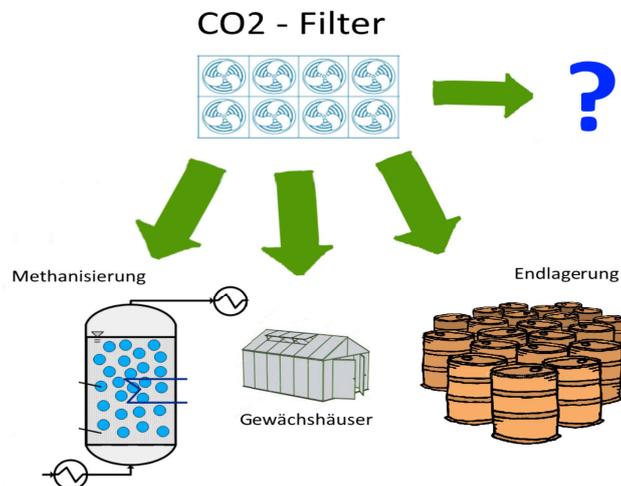
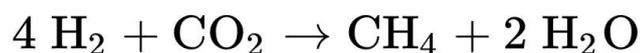


Abbildung 3: Verwertungsmöglichkeiten CO₂ - Eigene Grafik

3.1 Methanisierung

Eine mögliche Einsatzmöglichkeit ist die Methanisierung des CO₂'s. Bei der
 Methanisierung handelt es sich um einen Prozess zur Herstellung von synthetischen
 Kraftstoffen. Er wird auch oft als Power to Gas Prozess beschrieben. Bei diesem
 Verfahren reagiert das CO₂ bei Temperaturen von bis zu 700 °C mit Wasserstoff.



Das gewonnene Methan kann nach der Reaktion direkt in ein Gasnetz eingespeist
 oder in großen Gasspeichern gespeichert werden. Problematisch ist hierbei die

Elektrolyse zur Gewinnung des Wasserstoffes, welche hohe Energiemengen benötigt. Die Speichertechnologie ist gut für die Überstromkompensation geeignet. Der Hauptbestandteil des CO₂'s, welcher in Deutschland für die Methanherzeugung verwendet wird, entsteht derzeit in Biogasanlagen.

3.2 Pflanzenwachstum

Mit Gewächshäusern lässt sich ein Teil der Kosten, die für den Betrieb der DAC-Anlagen notwendig sind, decken. Die im Gewächshaus befindlichen Pflanzen absorbieren das CO₂ und wandeln dieses Tagsüber in Sauerstoff um. Gewächshäuser können so ihren Ernteertrag um bis zu 30% verbessern. Die Pflanzen können über diese Methode mehr CO₂ aufnehmen als im Normalfall, da der Partialdruck des CO₂'s in der Umgebung der Pflanzen erhöht wird.

3.3 Power to Liquid

Eine weitere Möglichkeit CO₂ weiter zu verarbeiten ist die katalytische Umwandlung von Wasser und Kohlenstoffdioxid in sogenannten E-Diesel. Eine Pilotanlage in Dresden benötigt hierfür drei Teilprozesse. Im ersten Verfahrensschritt, der Hochtemperatur- Elektrolyse, wird das Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufgeteilt. Anschließend werden der Wasserstoff und das CO₂ in einen Konvertierungsreaktor geleitet in welchem das CO₂ reduziert wird. Produkt der Reduzierung ist Kohlenmonoxid welches danach in der Fischer-Tropsch-Synthese zusammen mit Wasserstoff zu den eigentlichen Energieträgern reagiert, den Kohlenwasserstoffen. In Dresden konnten für die Erzeugung von drei Tonnen synthetischem Kraftstoff, 10 Tonnen CO₂ verwertet werden. Blue Crude ist Des weiteren frei von Schwefel sowie Aromaten und verbrennt nahezu rußfrei. Um einen Liter Synthetischen Diesel herzustellen sind in den Anlagen in etwa 13 kWh Strom nötig.

3.4 Endlagerung

Die Möglichkeit das CO₂, nach der Umwandlung in die feste Phase, einzulagern, ist derzeit aufgrund von geologischen Problematiken umstritten. Hierfür müsste das CO₂ in einer Tiefe von mindestens 800m bei 80 bar unterirdisch eingebettet werden, damit es im überkritischen Zustand verbleibt. Das Salzwasser in der dortigen Sedimentschicht hat eine geringere Dichte als das komprimierte CO₂, was für eine Verdrängung des Salzwassers sorgt und somit platz für das komprimierte CO₂ schafft. Die Verdrängung verläuft überwiegend lateral und kann auch in einigen Kilometern Entfernung einen Einfluss auf das dortige Grundwasser haben. Induzierte Erdbeben könnten eine Folge sein. CCS ist hierbei das einzige Konzept, in welchem tatsächlich negative Emissionen erzeugt werden.

3.5 Kältemittel

Als Kältemittel eingesetzt ist das Gas zwar nicht nachhaltig fixiert, da es nach Erreichen der jeweiligen Anlagenlebensdauer wieder in die Atmosphäre abgegeben würde, jedoch könnten zum Beispiel in Autoklimaanlagen Kältemittel wie R134 ersetzt werden, welche im Vergleich zu CO₂ einen deutlich höheren GWP (Global warming potential) Wert besitzen. Weil CO₂ keine idealen, thermodynamischen Eigenschaften im Bezug auf den Kühlmittelleinsatz hat muss es als Hochdruckkältemittel eingesetzt werden, was speziell den Einsatz in KFZ's erschwert. So müssen die Kälteanlagen für Drücke bis zu 100 bar ausgelegt werden, was aus wirtschaftlicher Sicht nicht konkurrenzfähig ist. In der Industrie ist der Einsatz vor allem im Zusammenspiel mit Ammoniak attraktiv, dort wird es zu weilen in Kaskadenanlagen oder als flüchtige Sole verwendet. Auch in der Lebensmittelindustrie gibt es bereits Abnehmer für CO₂.

4 Allgemeine Problematiken

4.1 Wirtschaftlichkeit

Ein entscheidender Faktor für die wirtschaftliche Bewertung der DAC-Technologie sind die Produktionskosten der Anlagen. Es ist derzeit noch unklar wie schnell die Produktionskosten für Filteranlagen in Europa sinken werden. Eine modulare Manufaktur könnte ein erhebliches Kosteneinsparungspotenzial bieten. Aktuelle Schätzungen belaufen sich auf ca. 100 - 600€ pro Tonne absorbiertem CO₂. Damit eine DAC-Filteranlage in einen wirtschaftlich akzeptablen Bereich bewegt wird müssen also entweder die Produktionskosten der Filtereinheiten reduziert werden oder die Folgeanwendung der Anlagen verändert werden. Da die Endlagerung von Kohlenstoffdioxid die allgemein laufenden Kosten nur noch weiter erhöhen würde, ist die Methodik im Bezug auf die Wirtschaftlichkeit eines Gesamtkonzepts kontraproduktiv. Die Analyse der Gestehungskosten einiger regenerativer Energieerzeuger macht die Technologien im Bezug auf die CO₂ Ersparnis vergleichbar. In folgender Abbildung sind einige Annahmen getroffen. Die spezifische „CO₂ Vermeidung“ der regenerativen Energieerzeuger ist unter der Annahme einer durchschnittlichen CO₂ Emission von 0,5kg pro kWh berechnet. Der Zahlenwert für Direct-Air-Capturing gilt für eine vollständige Endlagerung des CO₂'s, das bedeutet ohne Gewinne durch den Verkauf des CO₂'s und ohne Rückemissionen. Des Weiteren wird für DAC ein Kostenaufwand von 600€ pro Tonne gefiltertem CO₂ angenommen.

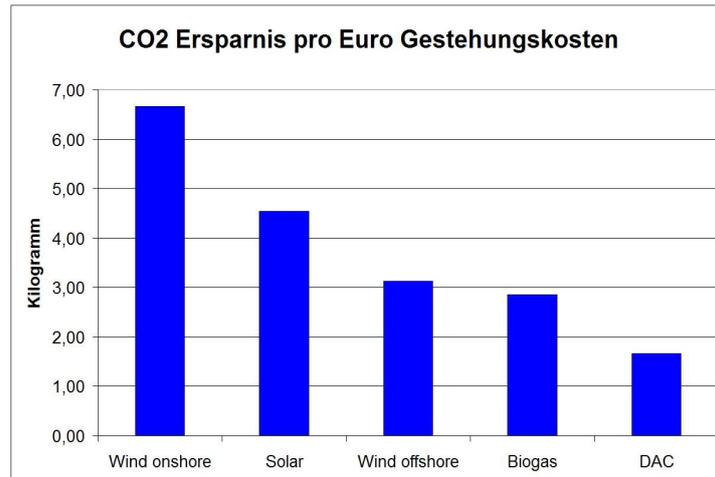


Abbildung 4: CO2 Vermeidung - Eigene Grafik

Der Grund für das eher mäßige abschneiden von DAC, im Vergleich zu seinen Konkurrenten, ist der noch relativ hohe Strommix Wert in Deutschland. Mit sinkendem Anteil konventioneller, CO₂-Ausstoß behafteter Energieerzeuger in Deutschland, sinkt auch die spezifische „CO₂ Vermeidung“ der regenerativen Energieversorger. Mit sinkenden Produktionskosten steigt die CO₂ Ersparnis im Vergleich zu den Energieerzeugern an.

4.2 Konkurrenzfähigkeit

Verglichen mit schon auf dem Markt bestehenden, regenerativen Energieerzeugern ist das CO₂ Einsparungspotential der DAC-Technologie mit entsprechender Folgeanwendung recht gering. In den meisten Fällen wird CO₂ wieder an die Umwelt abgegeben. Selbst im Falle einer überwiegend CO₂-neutralen, E-Diesel Erzeugung können aufgrund der häufigen Umwandlung chemischer Substanzen nur bescheidene Gesamtwirkungsgrade erreicht werden. Ein solcher, CO₂ neutraler Prozess lässt sich gut mit einem regenerativen Energieerzeuger vergleichen, da dieser auf der selben Basis, Nutzenergie zur Verfügung stellt. Betrachtet man den Aufwand der für die Erzeugung von einem Liter Blue Crude notwendig ist, so lässt sich anhand des spezifischen Energiebedarfs das Einsparungspotential der Kette ausrechnen. Wird an

dieser Stelle mit einem deutschen Strommix bilanziert, so ergibt sich ein ernüchterndes Ergebnis. Um einen Liter E-Diesel herzustellen, sind insgesamt 16,7 kWh Strom notwendig. Das ergibt bei einem Strommix Wert von 0,5 kg pro kWh einen CO₂ Verbrauch von 8,35 Kg pro Liter Kraftstoff. Nur wenn eine CO₂ - unbelastete Stromversorgung angenommen wird, kann wirklich CO₂ neutraler Kraftstoff erzeugt werden. Langfristig gesehen könnten diese CO₂-Armen Kraftstoffe jedoch einen entscheidenden Beitrag zur Energiewende leisten, da das Verfahren mit sinkendem Strommix Wert zunehmend effizienter aus ökologischer Sicht wird.

4.3 Gesellschaftliche Akzeptanz

Gerade im Bereich der Endlagerung ist derzeit keine zufriedenstellende Endlösung gegeben. Befürchtet wurde unter anderem der Austritt des CO₂'s aus den Sedimentschichten bis hin an die Oberfläche. In Deutschland gab es deswegen starke Proteste die zur vollständigen Ablehnung der Technologie geführt haben. Die Akzeptanz im Bezug auf die Filtertechnik ist schwierig zu bewerten. Bereits beim Transport des CO₂s ist man innerhalb der EMN langfristig auf Pipelines angewiesen, diese könnten ein zusätzliches Hindernis beim Bau einer Anlage im Bezug auf die gesellschaftliche Akzeptanz darstellen. Solange keine zufriedenstellende Lösung im Bereich der Folgeanwendung gefunden ist, können auch die Vorteile der Technologie nicht zum Einsatz kommen. Die Anlagen müssen vor allem im Bereich der Wirtschaftlichkeit große Fortschritte machen, um ein Wachstum in Europa zu garantieren.

5 Technische Analyse

5.1 Vorteile

Ein entscheidender Vorteil von DAC ist, dass die Anlagen dauerhaft im Betrieb sein können. Eine Abschaltung der Anlagen aufgrund zu geringer Windgeschwindigkeiten oder fehlender Sonneneinstrahlung ist nicht nötig. Des weiteren lassen sich die

Anlagen einfach erweitern, was das Wachstum der Technologie fördern könnte. Es werden zudem keine Gefahrenstoffe, welche schädlich für den Menschen sein können, wie Amine oder Kohlenstoffmonoxid im Prozess benötigt. Ein weiterer Vorteil ist der vergleichsweise geringe Platzbedarf für eine Filteranlage. Die Unabhängigkeit von Windgeschwindigkeiten sorgt auch dafür, dass sich die Anlagenstandorte leichter an deren Folgeprozesse anschließen lassen. So muss bei dem Bau eines Filterparks nicht auf Mindesthöhen oder umliegende Gebäude geachtet werden.

5.2 Nachteile

Kohlenstoffdioxid liegt in der Luft mit einem Partialdruck von ca. 0,04% vor. Die geringe Konzentration des CO₂'s im Vergleich zu den Abgasen einiger konventioneller Energieerzeuger wie zum Beispiel Kohlekraftwerke und Gaskraftwerke, die bei etwa 5-15% liegen, erschweren eine effektive Filterung. Der Energieaufwand um 1 Kg CO₂ zu filtern steigt mit sinkendem Partialdruck an. Ein weiterer Nachteil wäre die gegenseitige Beeinflussung. Zwischen zwei Anlagen muss ein ausreichender Abstand eingehalten werden, um die Effizienz der beiden Anlagen nicht zu gefährden.

5.3 Bilanzanalyse

5.3.1 Geometrie

Die anschließende Betrachtung wird auf Basis einer bienenwabenartigen Struktur des Absorbers durchgeführt. Über die gesamte Stirnfläche des Filters sind viele kleine Rohre eingebracht, über deren Durchmesser sich die Strömungseigenschaften der Luft beschreiben lassen.

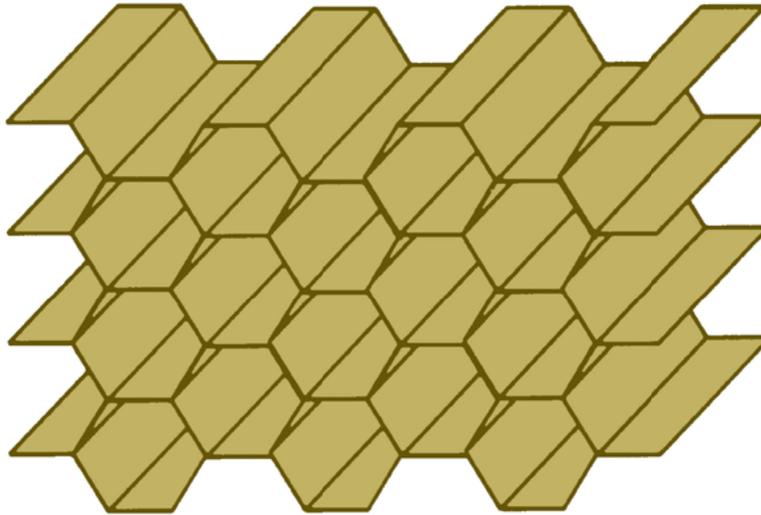


Abbildung 5: Struktur schematisch - Quelle: R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH

5.3.2 CO₂ Auffangrate bei gegebener Filterfläche

Die Auffangrate, also die Menge an CO₂ pro Zeiteinheit welche sich bei gegebener luftdurchströmter Fläche filtern lässt, ist stark vom Massenanteil des CO₂'s in der Umgebungsluft abhängig. Bei einem Bar Umgebungsdruck und 25°C Umgebungstemperatur befinden sich in einem Kubikmeter Luft ca. 42 mol aller Moleküle. Bei einem gegebenem Partialdruck des CO₂'s von 0,04% ergibt sich daraus ein Massenanteil von 0,0168 mol pro Kubikmeter. Die molare Masse von CO₂ beträgt 44 g/mol. Es ergibt sich ein Massenanteil bzw. eine Dichte:

$$\rho_{\text{CO}_2, \text{Luft}} = 0,74 \text{ g/m}^3$$

Der Volumenstrom \dot{V} ergibt sich aus der effektiven Filterfläche A_{eff} und der Strömungsgeschwindigkeit c .

$$\dot{V} = A_{\text{eff}} * c \quad (1)$$

Der Massenstrom \dot{m} beschreibt den Teilchenstrom welcher vom Filter absolut aufgenommen und absorbiert wird. Aus diesem Grund wird eine weitere Variable, der

Entfernungsgrad κ definiert. κ beschreibt das Verhältnis der CO₂ Teilchen welche in den Filter einströmen zur absorbierten Teilchenmenge.

$$\kappa = \frac{m_e - m_a}{m_e} \quad (2)$$

Somit ergibt sich ein Kohlendioxid Massenstrom der vom Filter absorbiert wird, dieser wird fortan als Absorptionsrate bezeichnet:

$$\dot{m}_{CO_2} = \kappa * A_{eff} * c * \rho_{CO_2, Luft} \quad (3)$$

Nimmt man nun eine Strömungsgeschwindigkeit von $c = 4$ m/s und einen Entfernungsgrad $\kappa = 0,5$ als gegeben an. So errechnet sich die spezifisch auf einen Quadratmeter bezogene Absorptionsrate zu $\dot{m}/A = 1,48$ g / s*m². Die anschließende Grafik zeigt die Jahres Absorptionsmengen unter variablen Windgeschwindigkeiten.

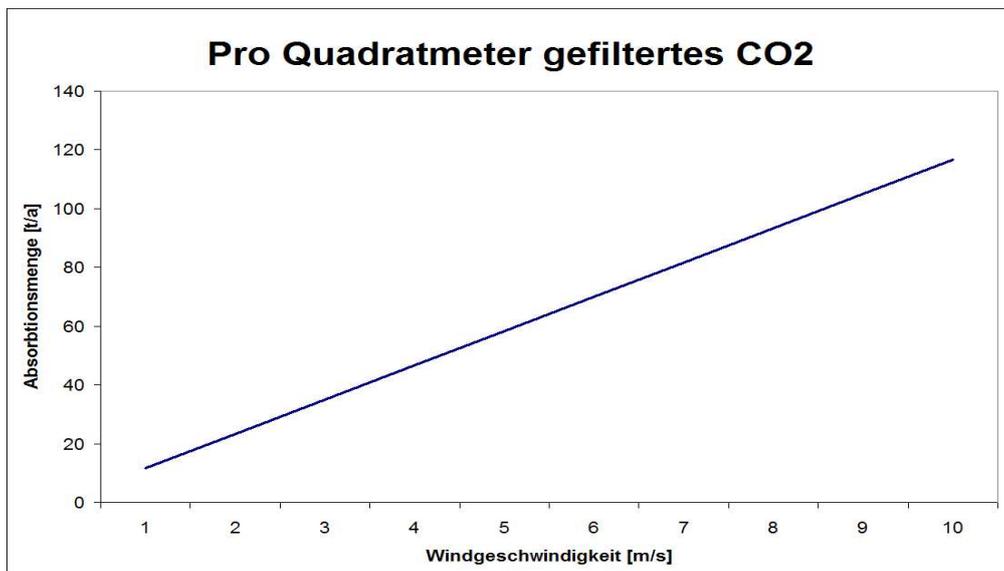


Abbildung 6: Absorptionsrate in Abh. der Geschwindigkeit - Eigene Grafik

Die Grafik beschreibt einzig die ideale Beziehung zwischen dem CO₂ Massenstrom und den Strömungsgeschwindigkeiten. Der Einfluss der Turbulenz und dem variablen Entfernungsgrad würde zu einer Nichtlinearität dieser Kurve führen und ist in dieser Grafik nicht erfasst.

5.3.3 Energiebedarf

Der am Filter befestigte Ventilator erzeugt am Gesamtsystem einen Druckunterschied zwischen der einströmenden und der ausströmenden Anlagenseite. Die Leistung des Ventilators lässt sich so beschreiben:

$$P_{SM} = p^* \dot{V} \quad (4)$$

Die Leistung der Strömungsmaschine ist mit einem Wirkungsgrad η_{SM} belastet. Es fallen zudem Verluste an Kupplung und Elektromotor an. Die Verluste des Antriebsstrangs werden hier mit η_A zusammengefasst. Der gesamte Wirkungsgrad der Filtereinheit beträgt somit $\eta = \eta_A * \eta_{SM}$.

$$P_{el} = P_{SM} * \eta \quad (5)$$

Zusammen mit der oben hergeleiteten Formel zur Bestimmung des Massenstromes, kann nun im Anschluss die Energiemenge berechnet werden, die für das Filtern von einem Kilogramm CO₂ benötigt wird. Dazu Teilt man die Formeln (2) und (3) und ergänzt diese mit dem Wirkungsgrad η .

$$\frac{P_{el}}{\dot{m}} = \frac{\Delta p}{\eta * \kappa * \rho_{CO_2, Luuft}} \quad (6)$$

Nach Kürzen des Zeitparameters:

$$\frac{E_{el}}{m} = \frac{\Delta p}{\eta * \kappa * \rho_{CO_2, Luuft}} \quad (7)$$

Abschließend wird für einen Druckunterschied von 0,0025 bar und einem Wirkungsgrad von 82% ein Beispielwert berechnet. Der Entfernungsgrad κ wird weiterhin mit 0,5 angenommen. Es ergibt sich ein spezifischer Stromverbrauch von

824 J/g oder 0,23 kWh/Kg CO₂. Dieser Wert beinhaltet lediglich den Stromverbrauch der Ventilatoren und wird anschließend mit dem Energiebedarf für die Aufspaltung des Karbonats addiert. Dreht man diesen Wert um erhält man die CO₂-Menge die für eine kWh eingesetzter elektrischer Energie filterbar ist. Für diese vereinfachte Betrachtung läge der Wert somit bei 4,3 Kg/kWh.

Die Reaktion verläuft Exotherm, was lediglich zu einer Erhitzung der Anlage führt. Energie wird hierfür nicht benötigt. Ein Teil dieser Wärmeenergie könnte, mit Hilfe von Wärmetauschern, genutzt werden um im anschließenden Trennungsprozess die Edukte zu erhitzen. Bei der Reaktion: $\text{CO}_2 + \text{OH}^- \rightarrow \text{HCO}_3^-$ wird 19,5 kJ/mol Wärme freigesetzt. Um HCO₃⁻ im Anschluss wieder zu trennen wird vereinfacht eine vollständig stöchiometrische Reaktion angenommen. Die Standardenthalpie Werte sind bekannt:

Anions	ΔH°_f (kJ/mol)
HCO ₃ ⁻ (aq)	-691.1
CO ₂ (g)	-393.5
OH ⁻ (aq)	-229.9

Tabelle 1: Standardenthalpien bei 25°C und Umgebungsdruck - Quelle: science.net

Um die benötigte Energiemenge zu bestimmen die mindestens notwendig ist um die Moleküle voneinander zu trennen, wird die Enthalpie der Produkte von der des Edukts subtrahiert.

$$\Delta H_R = H_{\text{HCO}_3^-} - (H_{\text{CO}_2} + H_{\text{OH}^-}) \quad (8)$$

Hierbei ergibt sich eine Reaktionsenthalpie von $\Delta H_R = -67,7$ kJ/mol. Dieser Wert kann für eine molare Masse des Edukts von 61,02 g/mol in die spezifische Enthalpie der Reaktion umgerechnet werden. Der spezifische Energiebedarf liegt somit bei

1109 kJ /kg oder 0,308 kWh/Kg ohne jegliche Verluste mit eingerechnet.

Abschließend können die beiden Werte addiert werden um einen Groben Richtwert für den gesamt Energiebedarf pro Kilogramm gefiltertem CO₂ zu erhalten. Die spezifische Arbeit des Gesamtkonzeptes ergibt sich somit zu $w_{\text{ges}} = 0,538 \text{ kWh/Kg}$ ohne thermische Verluste bei der CO₂ Abscheidung.

5.3.4 Variation der Leistung

Ein besonderes Problem bei der Anlagenauslegung stellt die Zeit dar, die das CO₂ benötigt um vom Absorber chemisch gebunden zu werden. Umso länger sich die Luft im Filter befindet, desto geringer ist der Anteil des CO₂'s in der CO₂ armen, ausströmenden Luft. Diese Zeit wird zum einen durch die Absorberlänge L und die Strömungsgeschwindigkeit c beeinflusst. Da der CO₂ Partialdruck über die Länge des Absorbers exponentiell abnimmt, sinkt auch der Momentane Entfernungsgrad mit der das CO₂ gebunden wird über die Absorberlänge.

$$\kappa_x = \kappa_0^* e^{-\frac{L_x}{L_0}} \quad (9)$$

Des Weiteren steigen auch die Druckverluste mit zunehmender Rohrlänge. Für turbulente Strömungsverhältnisse gilt:

$$\Delta p = \frac{\lambda^* L}{D} \frac{\rho}{2} c^2 \quad (10)$$

Der Rohrreibungskoeffizient λ hängt von der Reynoldszahl ab. Der Druckverlust nimmt im turbulenten Bereich anfangs stark zu, was zu einem Energiemehraufwand führen würde. Jedoch verbessert sich auf der anderen Seite der Entfernungsgrad mit zunehmender Reynoldszahl, was zur Energieeinsparung beiträgt. In der Regel wird in einem Filter ein gewisser Grad an Turbulenz zugelassen, für den sich dann ein optimaler spezifischer Stromverbrauch ergibt. Über die zugeführte elektrische

Leistung lässt sich die Strömungsgeschwindigkeit und somit auch die Absorptionsrate, also die Menge an CO₂ die pro Zeiteinheit gefiltert werden kann, variieren. Mit dieser Methode ist es möglich, Schwankungen im CO₂-Bedarf auszugleichen. Jedoch weicht man in diesen Fällen vom optimalen Betriebspunkt ab, was den spezifischen Energieverbrauch somit stark verschlechtert.

In der folgenden Darstellung sind einige Annahmen getroffen worden.

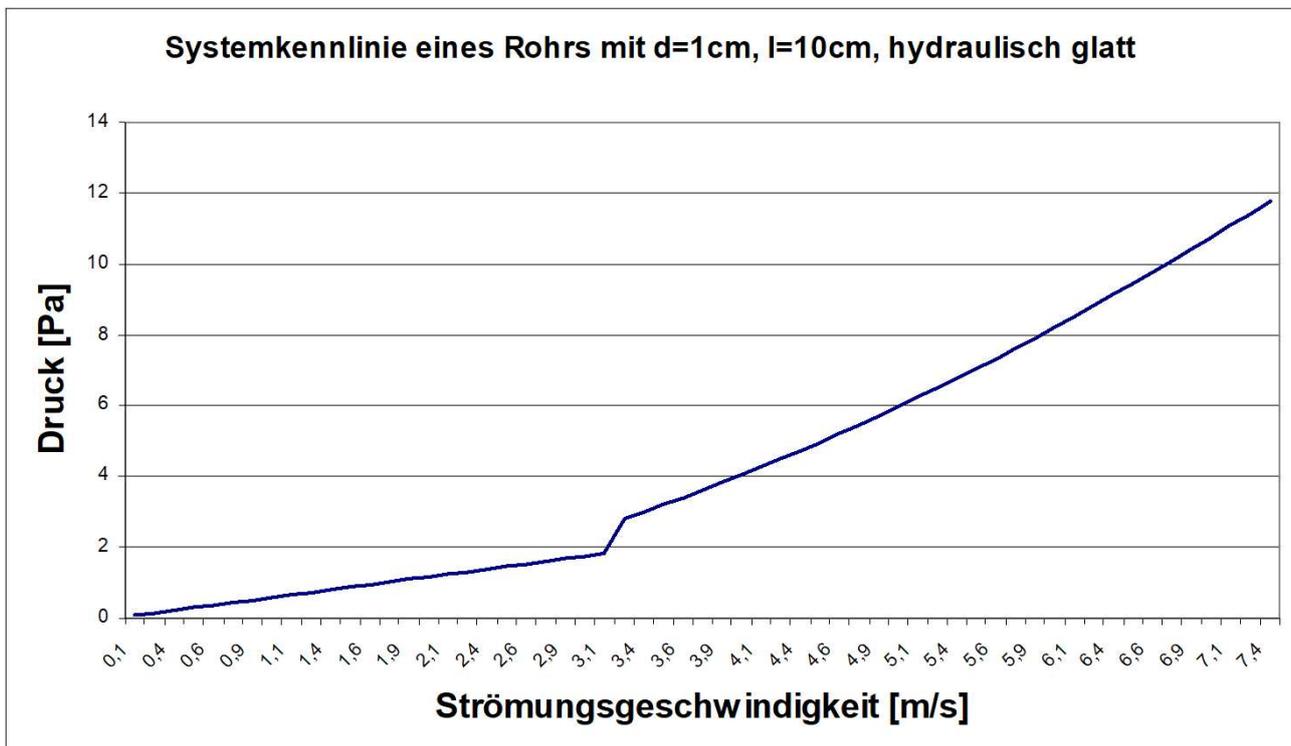


Abbildung 7: Übergang laminarer / turbulenter Strömungsbereich - Eigene Grafik

Der turbulente Bereich hinter dem Knick ist näherungsweise für glatte Rohre mit der Berechnungsformel nach Blasius bestimmt worden. In diesem Rechenbeispiel liegt der Übergang in den turbulenten Strömungsbereich bei ca. 3,2 m/s. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass die Reaktionsgeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit mit der das CO₂ chemisch gebunden werden kann, keinen nennenswerten Einfluss auf die Absorptionsrate hat, da die Absorptionsmassenströme aufgrund des geringen CO₂ Partialdrucks viel geringer sind als die Reaktionsgeschwindigkeiten, und des daraus

resultierenden, maximal möglichen, Massenstroms. Es gilt,

$$\dot{m}_{CO_2} \ll \dot{m}_{Rea, max}$$

Abschließend ist zu erwähnen, dass für die spezifischen Energieverbräuche sehr idealisierte Beispielwerte angenommen wurden. Besonders der Zahlenwert für die Kalzinierung, also das Trennen des CO₂ aus den Pellets, ist sehr Idealistisch errechnet und bildet den realen Energiebedarf eher schlecht ab. Im großen und ganzen wird die Leistung, die für das Filtern eines Kilogramms CO₂ benötigt wird, in dieser Betrachtung eher Unterschätzt.

5.3.5 Erweiterte Betrachtung

Die Menge an Kohlenstoffdioxid welche pro Zeiteinheit absorbiert werden kann ist also variabel und lässt sich mit der Strömungsleistung beeinflussen. Abhängig von der Folgeanwendung ergeben sich unterschiedliche CO₂ Einsparungspotentiale. Die beiden Einsatzmöglichkeiten Power-to-Gas (PtG) und Power-to-Liquid (PtL) sind jeweils nur Teilweise zur Abnahme des CO₂'s geeignet. Beide Technologien benötigen ein hohes Maß an EE-Überstrom um Ökologisch zu Arbeiten. und können somit keinen kontinuierlichen CO₂ Massenstrom umwandeln. Auch Gewächshäuser haben eine stark begrenzte Kapazität. Eine Kombinierung der verschiedenen Folgeanwendungen ist somit wünschenswert. Angenommen wird der oben berechnete Wert von 0,23 kWh/Kg. Mit einem Industriestrompreis von 17,1 ct/kWh inklusive Stromsteuer und EEG-Umlage ergeben sich spezifische Stromkosten von 3,93 ct/kg CO₂, für den Ventilator. Die Reaktionsenergie könnte teilweise durch internen Wärmeaustausch gedeckt werden. Der restliche Energieaufwand kann z.B, durch die Abwärme großtechnischer Energieerzeugungsprozesse bereitgestellt werden.

Bilanz pro kg CO ₂			
Folgeanwendung	Energiebedarf [kWh/kg]	Menge Produkt [kg]	Energiegehalt [kWh]
PtL	4,71	0,31kg Diesel	3,3
PtG	3,57	0,234kg E-gas	1,785

Tabelle 2: Energiebedarf PtL & PtG, überschlägig aus Anlagen Kennzahlen errechnet

Der nächste Schritt, nachdem das CO₂ jetzt in gefilterter Form vorliegt, ist der Transport zum Abnehmer. In der EMN könnte der Transport sowohl über LKW- bzw. Bahncontainer in gekühlten Drucktanks oder per Pipeline. Da die Kosten für den LKW Transport im Vergleich zu Pipelines ca. das 10 fache pro Tonne Durchsatz betragen, wird diese Möglichkeit hier nicht weiter betrachtet. Um CO₂ Pipelines effektiv zu betreiben, ist eine Verflüssigung des Kohlendioxids notwendig. Der Energieaufwand für die Verflüssigung liegt bei ca. 0,093 kWh/Kg. Der Transport selbst fällt dagegen mit 0,013kWh/Kg auf 100km eher weniger ins Gewicht. Abschließend verbleiben die Energieverbräuche der jeweiligen Folgeanwendungen.

		Ventilator	abscheiden	verflüssigen	Transport	Folgeanwendung	Gesamt	Produkt
Energieaufwand und	PtL	0,23	0,31	0,093	0,013	4,71	5,356	3,3
Erzeugnisse in kWh	PtG	0,23	0,31	0,093	0,013	3,57	4,216	1,79

Energiebedarf und Produktenergiegehalt im Bezug auf 1kg CO₂

Tabelle 3: Summe aller Energien, bezogen auf ein kg CO₂

Das Ergebnis zeigt, dass die Stromverbräuche der Folgeanwendungen den größten Teil der erforderlichen Energiemenge ausmachen. Der Transport fällt am wenigsten ins Gewicht. Alle in der Tabelle stehenden Zahlenwerte sind unter stark vereinfachten Annahmen berechnet worden. Insbesondere der Energiebedarf für das Abscheiden ist hier stark unterschätzt. Anhand dieser Zahlenwerte lässt sich auch erkennen dass PtG im Vergleich zu PtL einen wesentlich geringeren CO₂ Bedarf im Bezug auf die Endenergiemenge besitzt.

6 Konzeptmöglichkeiten

Direkte Luftentnahme ist vollständig unabhängig von Windgeschwindigkeiten und Strahlungsleistungen der Sonne. Die einzigen Kriterien zur Errichtung einer Anlage sind CO₂ Partialdruck sowie Entfernung und Art der Folgeanwendung. Um eine fundierte Aussage zum Potential einer DAC Filteranlage in der EMN treffen zu können, muss also eine Analyse der Nutzungstechnologien durchgeführt werden. Die Analyse wird in Anlehnung an die vom Institut für angewandtes Strommanagement durchgeführte CO₂ Potentialanalyse für die emscher lippe region durchgeführt.

6.1 Analyse der CO₂-Nutzungsmöglichkeiten

Welche Technologien gute Voraussetzungen für die Nutzung von CO₂ in der Region mit sich bringen, wurde anhand von sechs Kriterien bewertet:

- Der Technology Readiness Level (TRL) beschreibt den Entwicklungsstand auf Basis einer systematischen Analyse.
- Die Fixierungsdauer beschreibt, wie lange das CO₂ chemisch oder auch biologisch in einem Produkt/Prozess gebunden ist, sodass es nicht in der Atmosphäre enthalten ist und somit sein Treibhausgaspotential entfalten kann.
- Das Mengenpotential beschreibt die absolute Menge an CO₂ die in einer Wertungskette als Ganzes gesehen verwendet werden kann.
- Das Produkt- und Verwendungspotential beschreibt die mögliche Anzahl an Produkten, die unter Berücksichtigung des theoretischen Mengenpotentials, durch die Technologie hergestellt werden kann. Hierbei wird auch die potentielle Nachfrage nach den hergestellten Produkten in der Region mitbetrachtet.

- Das fünfte Kriterium ist die Anzahl der Anwender in der Region. Falls es bereits Spezialisten für die jeweilige Technologien in der EMN gibt, könnte diese den Implementierungsprozess beschleunigen.
- Als letztes wird die Wirtschaftlichkeit der Anlagen analysiert.

Folgeanwendung	TRL	Fixierungsdauer	Mengenpotential	Verwendungspotential	Anwender	Wirtschaftlichkeit
Methanisierung	***	*	*	**	*	**
Synthetische Kraftstoffe	**	*	*	***	*	*
Gewächshäuser	***	*	**	**	***	**
Kältemittel	***	*	**	**	**	**
Endlagerung (CCS)	***	***	***	*	*	*

(Potential: *** Hoch / ** Mittel / * Gering)

Tabelle 4: Folgeanwendungen mit Potentialanalyse

Die Potentialanalyse ergibt, dass zum jetzigen Zeitpunkt lediglich die Möglichkeit der Gewächshausnutzung in Betracht gezogen werden kann. Eine weitere Alternative hierzu, wäre die Nutzung als Kältemittel. Die im Bezug auf das Verwendungspotenzial sinnvollsten Folgeanwendungen, also PtL und PtG, können zukünftig realistische Abnehmer für eine DAC-Anlage werden. An beiden Technologien wird weiterhin geforscht, weshalb hier auch im Bereich der Wirtschaftlichkeit Verbesserungen zu erwarten sind. Beide Technologien benötigen Ökostrom um ihr volles Einsparungspotenzial zu erreichen.

7 Fazit

Im Bezug auf die Klimaziele der EMN dürfte Direct Air Capturing nur eine geringe Rolle spielen. Die Technologie benötigt sinnvolle Folgeanwendungen welche große Mengen Kohlenstoffdioxid abnehmen können und gleichzeitig dafür sorgen, dass mit Gas entweder ein Speicher bedient wird, oder in irgend einer Form Nutzenergie erzeugt wird. Um eine positive CO₂-Bilanz als Gesamtkonzept zu erreichen, muss auch die Folgeanwendung eine positive Bilanz aufweisen. Da CCS in Deutschland aus verschiedenen, oben erläuterten Gründen, problematisch ist, fällt diese

Möglichkeit für die EMN außer Betracht. Über einen längeren Zeitraum betrachtet, dürfte die Technologie dennoch eine wichtige Rolle spielen, da sie zusammen mit PtL den Kreis für eine CO₂-neutrale Mobilität schließen könnte. Sobald die Produktionskosten der Anlagen sinken, bieten sie eine effektive Variante CO₂ in große Mengen zu binden und die regionalen Emissionsstatistiken stark zu beeinflussen. Durch einen hohen Kohlenstoffdioxid Preis kann sich monetär betrachtet eine Konkurrenzfähigkeit am Markt einstellen, doch zur aktuellen Lage lohnt sich eine Investition in Direct Air Capturing aus rein wirtschaftlichen Gründen wohl eher nicht.

8 Quellenverzeichnis

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch:

http://asue.de/sites/default/files/asue/themen/umwelt_klimaschutz/2011/broschueren/07_04_11_asue-erdgas-oekostrom-0411.pdf [Aufgerufen am 18.04.2018]

Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen (Umweltbundesamt):

http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_26_2016_entwicklung_der_spezifischen_kohlendioxid-emissionen_des_deutschen_strommix.pdf [Aufgerufen am 18.04.2018]

Presseerklärung des Schweizer Start-Ups Climeworks:

http://www.climeworks.com/wp-content/uploads/2017/05/02_PM-Climeworks-DAC-Anlage-Case-Study.pdf [Aufgerufen am 22.04.2018]

Kohlendioxidmessung, Messprinzipien, Anwendungshinweise (Vaisala):

<http://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/CEN-TIA-Parameter-How-to-measure-CO2-Application-note-B211228DE-A.pdf> [Aufgerufen am 22.04.2018]

Center for Carbon removal:

<http://www.centerforcarbonremoval.org/blog-posts/2015/9/20/direct-air-capture-explained-in-10-questions> [Aufgerufen am 02.05.2018]

Wikipedia Eintrag CO₂-Abscheidung:

[https://de.wikipedia.org/wiki/CO₂-Abscheidung_und_-Speicherung](https://de.wikipedia.org/wiki/CO2-Abscheidung_und_-Speicherung)

[Aufgerufen am 10.05.2018]

Bundesministerium für Bildung und Forschung Zukunft des CO₂'s:

https://www.bmbf.de/pub/Vom_Abfall_zum_Rohstoff.pdf

[Aufgerufen am 10.05.2018]

Institut für angewandtes Stoffstrommanagement (IfaS) CO₂-Potenzialanalyse:

[http://www.emscher-lippe.de/wp-content/uploads/2017/05/2017-05-03_Report-CO₂-Potentialanalyse_final.pdf](http://www.emscher-lippe.de/wp-content/uploads/2017/05/2017-05-03_Report-CO2-Potentialanalyse_final.pdf)

[Aufgerufen am 29.05.2018]

Standartenthalpien von nshs-science.net:

http://nshs-science.net/chemistry/common/pdf/R-standard_enthalpy_of_formation.pdf

[Aufgerufen am 10.06.2018]