

# Nutzung von CO<sub>2</sub> aus Luft als Rohstoff für synthetische Kraftstoffe und Chemikalien

Studie im Auftrag des Ministeriums für Verkehr Baden-Württemberg

Dezember 2020

Dominik Heß, Michael Klumpp, Roland Dittmeyer

Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT)



Foto: M. Breig und A. Bramsiepe, KIT

# Executive Summary

## Kann der CO<sub>2</sub>- Ausstoß nicht auf null Gefahren werden, müssen negative Emissionen erzeugt werden, damit Deutschland THG-neutral wird

Um die Klimaziele des Weltklimarates IPCC einzuhalten, müssen die THG-Emissionen bis 2050 bilanziell null erreichen. Bis dahin geschene Emissionen über dem THG-Budget, sowie weiter bestehende Ausstöße, müssen aus der Atmosphäre entfernt werden. Dazu sind einerseits Pflanzen in der Lage, andererseits existiert mit DAC eine technische Lösung. Das gewonnene CO<sub>2</sub> kann entweder eingelagert und so dauerhaft gespeichert werden (CCS) oder in Produkte umgewandelt und so weiter genutzt werden (CCU).

## Direct Air Capture (DAC) - ein Verfahren zur Gewinnung von CO<sub>2</sub> aus Luft

Zwei Hauptverfahrensvarianten stehen zur Gewinnung von Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre zur Verfügung. Beides sind zweistufige Prozesse, bei denen zuerst bei Umgebungsbedingungen das CO<sub>2</sub> aus der Luft heraus „gefiltert“ wird. Danach muss der

hierfür benutzte „Filter“-Stoff bei erhöhter Temperatur unter Wärmezufuhr regeneriert werden, um das CO<sub>2</sub> in Reinform zu erhalten und ihn für den nächsten Zyklus wieder einsetzbar zu machen. Das Hochtemperatur-Verfahren (HT-DAC) benötigt für die Regeneration eine Temperatur von 900 °C, während das Niedertemperaturverfahren (LT-DAC) mit „nur“ 100 °C auskommt.

## DAC benötigt 1400 bis 2500 kWh an (erneuerbarer) Energie, um eine Tonne CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zu gewinnen

Neben elektrischer Energie, vorzugsweise erneuerbarem Strom, für Pumpen und Luftumwälzung, die etwa 200 bis 400 kWh/t<sub>CO<sub>2</sub></sub> verursachen, wird vor allem Wärme benötigt, um die Regeneration durchzuführen. Die aufzuwendende Energie pro Tonne CO<sub>2</sub> ist bei beiden Verfahren vergleichbar, jedoch bestehen beim LT-DAC-Verfahren wesentlich mehr Möglichkeiten zur Nutzung von Abwärme für die CO<sub>2</sub>-Gewinnung, bspw. aus der Industrie oder der Müllverbrennung. Im Gegensatz dazu muss für die hohe Temperatur beim HT-DAC aktuell Erdgas eingesetzt werden, da noch kein vollelektrisches System existiert. Die Emissionen aus der Verbrennung werden ebenfalls abgeschieden. Auch in puncto Skalierbarkeit gibt es Unterschiede: LT-DAC-Verfahren können

		Punktquelle				DAC	
		Zement		Abgas		2020	2050
		2020	2050	2020	2050	2020	2050
Konz.	%	14-33		7-45		0,04	
Kosten	€/t	15-140		30-130		125-800	41-82
Energiebedarf	kWh/t	>600		>330		k.A.	1400-2500

**Tabelle 1:** Kosten heute und prognostiziert für 2050. Die Zahlen für DAC beruhen auf Aussagen der DAC-Firmen Carbon Engineering, Climeworks und Global Thermostat. Die Daten für Punktquellen stammen aus der Literatur. Durch die technische Reife der Abscheidetechnologien wird hier keine weitere Kostensenkung angenommen.

\* **PtL:** Power-to-Liquid (sinngemäß: Energie zu Flüssigkraftstoff) bezeichnet Prozesse, in welchen aus elektrischem Strom, Wasser und CO<sub>2</sub> oder CO Flüssigkraftstoff generiert wird.

\*\***CCS:** Carbon Dioxide Capture and Storage (sinngemäß: CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung) bezeichnet die Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus Luft oder Abgas und eine dauerhafte (meist geologische) Speicherung

\*\*\***CCU:** Carbon Dioxide Capture and Utilization (sinngemäß: CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Nutzung) bezeichnet die Abtrennung von CO<sub>2</sub> wie bei CCS, allerdings hier mit anschließender Weiterverwertung für bspw. synthetische Kraftstoffe (PtL).

auch bei kleinen und mittleren Anlagenkapazitäten sinnvoll umgesetzt werden, ohne dass die spezifischen Anlagen- und Betriebskosten überproportional steigen, wohingegen HT-DAC-Verfahren nur im großen Maßstab einsetzbar sind.

### Drei Wettbewerber teilen sich den Großteil des derzeitigen DAC-Marktes

Die drei Firmen Carbon Engineering aus Kanada, Climeworks aus der Schweiz und Global Thermostat aus den USA sind die größten Wettbewerber in der DAC-Sparte. Während Carbon Engineering eine HT-DAC-Lösung entwickelt, konzentrieren sich die anderen beiden auf LT-DAC-Systeme. Alle Firmen sind an der Schwelle zum kommerziell einsetzbaren System und beginnen damit ihre Lösungen in Großprojekten zu demonstrieren, die sowohl CCU<sup>\*\*\*</sup>, als auch CCS<sup>\*\*</sup>-Anwendungen umfassen.

### Eine Tonne CO<sub>2</sub> aus Luft kostet derzeit zwischen 150 und 800 USD/t<sub>CO2</sub>

Innerhalb der erwähnten Großprojekte werden durch die Skalierung geringere Kosten ermöglicht. Diese sind durch energieoptimierten und massenproduzierten bzw. großskaligen Aufbau der Verfahren erreichbar. Durch weitere Verbesserungen sollen die Kosten nach Aussage der Firmen bis 2050 auf unter 50-100 USD/t<sub>CO2</sub> sinken.

### Wirtschaftlichkeit von DAC kann schon heute erreicht werden.

Die DAC-Anlagen können aktuell dann wirtschaftlich arbeiten, wenn ein funktionierender Emissionshandel vorliegt. So finanziert Carbon Engineering seine Anlage mittels des kalifornischen „low carbon fuel standard“, der aktuell CO<sub>2</sub>-Preise um 200 USD/t<sub>CO2</sub> bewirkt. Dieser Preis ergibt sich aus der gesamten CO<sub>2</sub>-Intensität des Kraftstoffs im Vergleich zu einem gesetzlichen Referenzwert. Durch Entfernen von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre können Zertifikate generiert werden, welche zum aktuellen Marktpreis gehandelt werden. Dadurch könne die Anlage nach Aussage von Carbon Engineering wirtschaftlich betrieben werden. Generell ist bis 2050 eine starke Kostenreduktion zu erwarten. In Tabelle 1 sind die erwarteten Kosten aufgelistet, welche von den jeweiligen Firmen zur Verfügung gestellt wurden. In der Literatur finden sich für Systeme, welche heute eingesetzt würden, etwas höhere Zahlen von 200-300 €/t<sub>CO2</sub> als die geringsten Schätzungen der Firmen. Bis 2050 werden allerdings auch hier Kosten unter 100 €/t<sub>CO2</sub> erwartet. (Fasihi et al., 2019)

CO <sub>2</sub> €/t	Anteil CO <sub>2</sub>		Strompreis €/MWh	Anteil Strom		PtL-Kosten €/L	Referenz
	€/L	%		€/L	%		
37,75	0,085	3,1	105	1,85	67,5	2,74	(Albrecht et al. 2017)
11,29	0,060	2,3	105	1,87	73,1	2,56	(Becker et al. 2012)
37,59	0,1	2,9	140	2,31	68,1	3,39	(König et al. 2015)
37,59	0,1	3,6	105	1,73	62,5	2,77	Eigene Berechnung basierend auf (König et al. 2015; Albrecht et al. 2017)
37,59	0,1	7	20	0,33	24	1,37	
100	0,27	17	20	0,33	22	1,53	
250	0,67	34	20	0,33	17	1,93	

**Tabelle 2:** Kostenstruktur von PtL-Kraftstoffen für beispielhafte Standortszenarien mit unterschiedlichen Beschaffungspreisen für CO<sub>2</sub> und erneuerbarem Strom. Berechnungen basieren auf König et al. und deren simuliertem FTS-Prozess. Die Kosten wurden ausgehend von den Literaturdaten neu berechnet, indem die Kosten für Strom und CO<sub>2</sub> entsprechend umgerechnet wurden. Sämtliche Kosten sind reine Produktionskosten ohne Abgaben wie Steuern oder Transport.

	Mais	Regenwald	temperierter Wald	DAC	BECCS*
Landbedarf km <sup>2</sup> /Mt <sub>CO2</sub>	329	270	390	7-8,4	424-450
Fläche für 1 Gt <sub>CO2</sub> /a in km <sup>2</sup>	328.785	270.000	390.000	7.000-8.400	424.000- 450.000
Fläche entspricht ca.	Finnland	Großbritannien	Deutschland	Großraum London	Kalifornien/ Schweden
Referenz	(Deutsches Maiskomitee e.V. (DMK); Würdehoff et al. 2012; Schink)	(National Academies Press (US) 2018)		(Creutzig et al. 2019)	

**Tabelle 3:** Flächenverbrauch verschiedener Möglichkeiten, CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zu entnehmen. Die Daten basieren auf den jeweils angegebenen Referenzen mit eigenen Umrechnungen, um die Zahlen vergleichbar zu gestalten.

### CO<sub>2</sub> aus Punktquellen kann mit 15-30 €/t<sub>CO2</sub> deutlich günstiger sein als DAC

CO<sub>2</sub> kann neben der Entnahme aus der Atmosphäre auch aus konzentrierten Punktquellen stammen. Dabei wird produziertes CO<sub>2</sub> aufgefangen, anstatt es in die Atmosphäre zu entlasten, beispielsweise bei Zement- oder Stahlwerken. Zu beachten ist hier auch, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Quellen wie dem Zementbrennen zu zwei Dritteln aus der chemischen Reaktion stammen und prozessbedingt unvermeidbar sind. Dem gegenüber stehen vermeidbare Emissionen aus der Energiebereitstellung z.B. für Hochtemperaturwärme in der Industrie. Die höhere Konzentration und die technische Reife der Abscheideprozesse führt dabei zu deutlich geringeren Kosten und einem potenziell niedrigeren Energiebedarf. Diese werden sich im Gegensatz zu DAC in den nächsten Jahren voraussichtlich nicht gravierend verändern, da Technologien wie Gaswäschen bereits großindustriell eingesetzt werden und in der Regel lediglich für das spezifische Abgas validiert werden müssen. Die Technologien zur Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus konzentrierten (Ab-) Gasen sind vielfältig. Weit

verbreitet sind die erwähnten Gaswäschen oder die Druck- bzw.- Temperaturwechseladsorption.

### CO<sub>2</sub>-Bilanz von Punktquellen hängt stark von der Weiterverwendung ab

Bei der Entnahme von CO<sub>2</sub> aus Punktquellen ist im Hinblick auf den Klimawandel zu bedenken, dass gefangenes CO<sub>2</sub> aus fossilen Quellen bei stofflicher Nutzung lediglich einmal wiederverwendet wird, ehe es endgültig in die Atmosphäre gelangt. Ein Netto-Null-Zustand oder gar negative CO<sub>2</sub>-Emissionen stellen sich somit nicht ein. Stammt das CO<sub>2</sub> aus biogenen Quellen, wie beispielsweise Biogasanlagen ist ein geschlossener Kohlenstoffkreislauf möglich.

### Landbedarf von biogenen Lösungen zur CO<sub>2</sub>-Entfernung aus der Atmosphäre im Vergleich zu DAC bis zu 65-fach höher

Die verschiedenen Gewinnungsmöglichkeiten von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre unterscheiden sich neben den wirtschaftlichen und technischen Aspekten auch in ihrem Platzbedarf. Im Vergleich zu DAC benötigen biogene Lösungen, beispielsweise BECCS\*,

\*BECCS: Bioenergy with Carbon Dioxide Capture and Storage (deutsch ca.: Bioenergie mit CO<sub>2</sub>- Abscheidung und Speicherung), bezeichnet das Abscheiden und Speichern (CCS) von CO<sub>2</sub> aus Abgasen der Energiegewinnung mittels biogener Energieträger, bspw. Biogas/-masse.

viel größere Flächen, die außerdem ausreichend fruchtbar sein müssen. Je nach Schätzung ist DAC zwischen 40 und 65 Mal flächeneffizienter als Wälder oder der Anbau von Energiepflanzen.

### Power-to-Liquid (PtL)

Unter Power-to-Liquid (kurz PtL) wird die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen auf Basis von erneuerbarem Strom, Wasser und einer Kohlenstoffquelle verstanden. Über eine Elektrolysestufe zur Wasserstoffherstellung und verschiedene Reaktionsschritte können so energiereiche Kohlenwasserstoffe hergestellt werden, die sich in existierenden Produktionsprozessen und Infrastrukturen als klimaneutraler Ersatz für fossile Erdölprodukte einsetzen lassen.

### Fischer-Tropsch-Synthesen (FTS) können Kohlenwasserstoffe äquivalent zu Raffinerieprodukten liefern

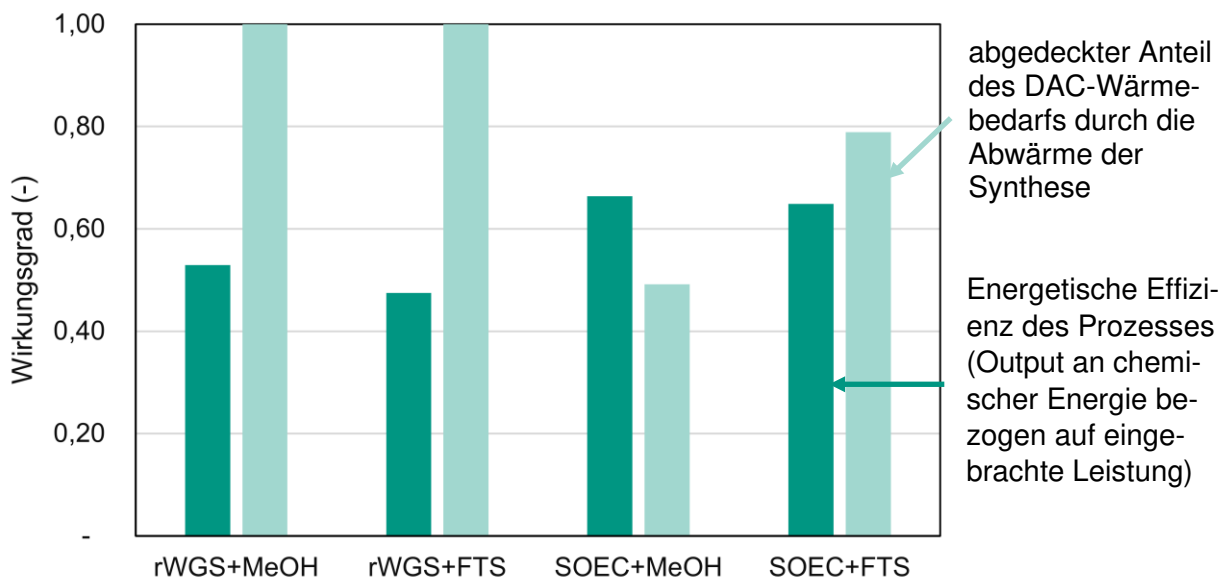
Die FTS liefert Kohlenwasserstoffketten, welche aus Synthesegas, also einem Gemisch aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff, hergestellt werden. Das CO<sub>2</sub> wird dabei unabhängig von der Quelle mittels rückwärtiger Wassergas-Shift-Reaktion (rWGS) oder direkt in einer Dampf/CO<sub>2</sub>-Co-Elektrolyse in CO umgesetzt.

### Methanol aus PtL-Prozessen kann zu Kraftstoffsubstituten umgesetzt oder als Grundchemikalie verwendet werden

Methanol wird analog zur FTS aus Synthesegas produziert. Die Schritte vor der eigentlichen Synthese sind dementsprechend identisch. Methanol kann direkt als Einsatzstoff für chemische Verfahren verwendet werden. Auch eine Nutzung als Kraftstoff ist möglich, entweder direkt oder nach Umwandlung über den Methanol-to-Gasoline (MtG)-Prozess.

### Prozessintegration von DAC mit der PtL-Synthese kann den Wärmebedarf für die CO<sub>2</sub>-Gewinnung deutlich senken

Die vier Prozesskonfigurationen, also die beiden Synthesegasvarianten verknüpft mit den beiden Synthesen, wurden auf grundlegender Basis simuliert. Ziel dieser Prozesssimulationen war es die Frage zu klären, ob die Abwärme der exothermen Synthesen ausreicht, um die Regenerationswärme für die DAC bereitzustellen. Diese Synergie würde DAC im Vergleich zu CO<sub>2</sub> aus Punktquellen deutlich attraktiver machen. Es hat sich gezeigt, dass vor allem die ineffizienteren Prozesse mit vorgeschalteter PEM-Elektrolyse im Syntheseteil ausreichend



**Abbildung 1:** Effizienz der verschiedenen Prozessvarianten gemäß vereinfachter Prozesssimulationen mit je einer Synthesegaserzeugung (rWGS= reverse Watergasshift; SOEC= Solid Oxide Co-Electrolysis Cell) und einer PtL-Synthese (MeOH= Methanolsynthese; FTS= Fischer-Tropsch-Synthese)

Wärme auf einem Temperaturniveau höher als 100°C auskoppeln können, während die effizienteren Prozesse mit Dampfelektrolyse weniger Abwärme generieren. Alle Varianten können mindestens die Hälfte der für den DAC-Prozess benötigten Wärme zur Verfügung stellen.

### **Die CO<sub>2</sub>-Kosten haben im Vergleich zu den Stromkosten einen geringen Hebel auf den Preis des fertigen PtL-Produkts**

Die Kosten für Kraftstoffe aus PtL-Verfahren hängen von verschiedenen Faktoren ab. In die Kosten fließen der Strompreis, der CO<sub>2</sub>-Preis, sowie fixe Anlagenkosten für Investment und Betrieb ein. König et al. bestimmen mit 105 €/MWh Strompreis und 38 €/t<sub>CO2</sub> einen Kraftstoffpreis von 2,74 €/L für ein Fischer-Tropsch-Produkt. 70% entfallen dabei auf Energie und nur 3% auf CO<sub>2</sub>. Bei Annahme einer CO<sub>2</sub>-Gewinnung per DAC für 100€/t<sub>CO2</sub> und günstigem erneuerbaren Strom von 20 €/MWh steigt zwar der Anteil der CO<sub>2</sub>-Kosten auf 17 %, dennoch fallen die Gesamtkosten auf 1,53 €/L. Es kann also sinnvoll sein atmosphärisches CO<sub>2</sub> an Orten mit großem Potential an Erneuerbaren zu verwenden, statt Punktquellen-CO<sub>2</sub> mit teurer Energiebeschaffung zu verknüpfen.

### **CO<sub>2</sub>-Quellen im direkten Vergleich: Je nach Szenario kann sowohl DAC als auch Punktquellen-CO<sub>2</sub> sinnvoll sein**

Bei der Auswahl der CO<sub>2</sub>-Quelle sollten einige Faktoren bedacht werden:

Klimaschutz: Wirklich CO<sub>2</sub>-neutrale Kraftstoffe können nur mit atmosphärischem CO<sub>2</sub> aus DAC oder Biomasse realisiert werden. Fossile Punktquellen können nur mit langfristiger Speicherung (CCS) THG-neutral werden. Unvermeidbare fossile Emissionen, wie beispielsweise aus Zementwerken, sollten wie biogenes CO<sub>2</sub> gefangen werden, um eine maximale CO<sub>2</sub>-Reduktion zu ermöglichen. Es sollten allerdings keine unnötigen Laufzeitverlängerungen für vermeidbare fossile Emittenten, vor allem im Energiesektor, zugelassen werden.

Wirtschaftlichkeit: Hauptkostenfaktor synthetischer Kraftstoffe ist der Strompreis. Standorte mit günstigem erneuerbarem Strom sind also in der Regel Standorten mit günstiger CO<sub>2</sub>-Verfügbarkeit vorzuziehen, vorausgesetzt die CO<sub>2</sub>-Kosten für DAC entwickeln sich wie erwartet. Dies hängt auch vom Markthochlauf ab.

Markthochlauf: Um den erwarteten DAC-Bedarf der nächsten Jahrzehnte für PtL und die chemische Industrie zu decken, müssen Investitionen in DAC getätigt werden. Die Zementindustrie allein könnte mit ihren aktuellen Emissionen von 22 Mt<sub>CO2</sub>/a den erwarteten industriellen Bedarf an CO<sub>2</sub> als Rohstoff im Jahr 2050 bei weitem nicht decken. Allein für die chemische Industrie erwartet man auch bei stofflicher Nutzung der eigenen CO<sub>2</sub>-Emissionen einen zusätzlichen Bedarf an CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle in Höhe von 41 Mt<sub>CO2</sub>/a, um das Ziel der CO<sub>2</sub>-Neutralität zu erreichen. (Heinzmann et al., 2020, Roland Geres et al., 2019). DAC sollte daher so schnell wie möglich ausgebaut und so Produktionskapazitäten geschaffen werden. Die Investitionssumme steigt für die von Deutschland verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen dabei schätzungsweise bis ins Jahr 2050 auf knapp über 6 Mrd. €/a an. Um die erforderliche Kostensenkung auf optimalem Weg zu erreichen, ist es wichtig, schon heute DAC-Kapazitäten zu schaffen. Nur bei einem stetigen Hochlauf, weder zu langsam noch zu schnell, können die Bedarfe in einigen Jahrzehnten zu den dann gesunkenen Preisen gedeckt werden.