

Entwicklungsstand und Forschungsbedarf von Direct Air Capture – Ergebnis einer multidimensionalen Analyse

Peter Viebahn, Alexander Scholz und Ole Zelt

Als Direct Air Capture (DAC) werden Technologien zur Abscheidung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre bezeichnet. Diese könnten zunehmend zum Einsatz kommen, um CO₂ für Power-to-X-Prozesse (PtX) oder zur Erzielung „negativer Emissionen“ bereitzustellen. Die Ergebnisse einer multidimensionalen Bewertung im Rahmen der BMWi-Studie „Technologien für die Energiewende“ (et 09/2018) zeigen, dass noch große Unsicherheiten bestehen und die Entwicklung überwiegend an Deutschland vorbeigeht.

Die „Pariser Beschlüsse“ der UN-Klimakonferenz COP21 erfordern eine umfassende und schnelle Transformation mit einer deutlichen Reduzierung der Treibhausgasemissionen. Viele der hierfür benötigten Technologien sind bereits weitgehend entwickelt und marktreif. Eine bisher in der Öffentlichkeit wenig diskutierte Technologiegruppe ist Direct Air Capture (DAC). DAC könnte auf zweierlei Arten zur Erreichung der Klimaziele beitragen:

Die erste Option ist die Bereitstellung von klimaneutralem CO₂, das in einem weitgehend dekarbonisierten Energiesystem für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe (Power-to-Liquids - PtL), Gase (Power-to-Gas - PtG) und Chemikalien (Power-to-Chemicals - PtC) benötigt wird. CO₂ bzw. hieraus hergestelltes CO ist eine Voraussetzung, um in Kombination mit Wasserstoff in entsprechenden Syntheseprozessen die gewünschten Kohlenwasserstoffe herzustellen. Während der Wasserstoff über elektrolytische oder direkte Wasserspaltung mittels erneuerbaren Energien gewonnen werden kann, könnten zur Bereitstellung des Kohlenstoffs zunächst in einem begrenzten Zeitraum auch industrielle CO₂-Emissionen genutzt werden. Um den Ausstoß fossiler Emissionen jedoch schnell und massiv reduzieren zu können, sollten die Produkte möglichst bald klimaneutralen Kohlenstoff enthalten.

Daneben könnte es notwendig werden, auch „negative Emissionen“ zu erzielen, indem große Mengen CO₂ aus der Atmosphäre abgeschieden und in geologischen Formationen eingelagert werden. Neben BECCS (Biomasseverbrennung und CCS) zählt Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) zu den diskutierten „Negativen Emissionstechnologien“ (NET). Dies ist allerdings



Die weltweit erste kommerzielle Direct Air Capture-Anlage steht in Hinwil/Schweiz
Bild: Climeworks / Julia Dunlop

umstritten: Einerseits weisen Studien wie z. B. [1] darauf hin, dass die Klimaziele auch ohne NET erreicht werden können, wenn kurzfristig und entschlossen gehandelt und insbesondere der Energieverbrauch massiv gesenkt würde. Andererseits sehen die meisten Szenarien des Weltklimarats (IPCC) mittel- bis langfristig die Verwendung von NET als unvermeidlich an, um insbesondere das 1,5 °C-Ziel erreichen zu können [2].

Technologiegruppen

DAC-Verfahren bestehen in der Regel aus drei Schritten. Zunächst wird die Umgebungsluft z. B. mittels Ventilatoren auf ein Sorptionsmittel geleitet. Anschließend muss das CO₂ aus der Umgebungsluft durch absorbierende oder adsorbierende Substanzen gebunden werden. Schließlich wird das CO₂ durch Zufuhr von thermischer oder elektrischer

Energie wieder vom Sorptionsmittel getrennt, so dass letzteres für einen neuen Zyklus bereit steht. Die derzeit gängigen Verfahren und die sie umsetzenden Unternehmen [3] lassen sich in zwei Gruppen zusammenfassen:

Absorption und Kalzinierung („DAC_{highTemp}“)

Bei dem Verfahren der kanadischen Firma Carbon Engineering wird CO₂ mit Kaliumhydroxid (KOH) als wässrige Lösung absorbiert. Das aus der Absorption resultierende wässrige Kaliumkarbonat (K₂CO₃) wird in einem Pelletreaktor zu Calciumcarbonat (CaCO₃) ausgefällt und durch Kalzinieren in CO₂ und Calciumoxid (CaO) zerlegt. Letzteres wird zu Calciumhydroxid (Ca(OH)₂) hydratisiert und steht dann für die weitere Verarbeitung zur Verfügung. Die Kalzinierung erfordert sehr hohe Temperaturen (> 850 °C), die das Unternehmen in seiner

aktuellen Demonstrationsanlage (Abtrennung von 219 t CO₂/Jahr aus der Luft) über Erdgasbrenner erreicht. Der benötigte Strom wird über eine Gasturbine erzeugt.

Das Unternehmen hat dieses Verfahren in Modellrechnungen auf eine kommerziell nutzbare Größe von 1 Mio. t CO₂/Jahr hochskaliert. Aufgrund der Verwendung von Erdgas wird für jede t CO₂, die aus der Atmosphäre abgeschieden wird, jedoch wiederum 0,5 t fossiles CO₂ freigesetzt, das nur teilweise durch einen zusätzlichen integrierten Nachverbrennungsprozess abgeschieden wird.

Adsorption und Desorption („DAC_{lowTemp}“)

In diesem Prozess wird das CO₂ zunächst über eine organisch-chemische Adsorption an ein Sorptionsmittel gebunden, das dann durch Niedertemperaturwärme oder Feuchtigkeit regeneriert wird. Das Verfahren der Schweizer Firma Climeworks verwendet als Filtermaterial poröse Granulate, auf deren Oberfläche Aminverbindungen abgeschieden werden. Das Adsorptionsmittel wird unter Vakuum im Niedertemperaturbereich (ca. 100 °C) regeneriert (Temperaturwechsel-Adsorption, TSA, in Kombination mit Druckwechsel-Adsorption, PSA). Da hier im Gegensatz zu wässrigen Lösungen keine hohen Temperaturen erforderlich sind, ist der thermische Energiebedarf deutlich geringer und ermöglicht die Integration von Abwärme aus Elektrolyseuren sowie aus Industrie- oder Syntheseanlagen. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die in der Luft enthaltene Feuchtigkeit nach dem Durchlaufen des Prozesses als Wasser zur Verfügung steht und nicht wie bei DAC_{highTemp} kontinuierlich von außen zugeführt werden muss. Das Unternehmen bietet kommerziell ein Standardmodul „DAC-1“ (Abtrennung von 51 t CO₂/Jahr) an, das bei Bedarf zu beliebig

großen Einheiten kombiniert werden kann (z. B. „DAC-36“ mit 36 Einheiten, 1,8 kt CO₂/Jahr). Climeworks betreibt verschiedene kommerzielle Demonstrations- und Forschungsprojekte.

Auch das US-Unternehmen Global Thermostat arbeitet nach dem Prinzip der Adsorption und Desorption. Es betreibt eine Pilotanlage in Kalifornien (730 t CO₂/Jahr) und sechs kommerzielle Projekte in verschiedenen Industriezweigen.

Ein weiteres Verfahren wurde kürzlich vom Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung Baden-Württemberg (ZSW) im Rahmen des BMBF-Forschungsprojekts CORAL („CO₂-Rohstoff aus der Luft“) entwickelt [4]. Es basiert zunächst auf einem Waschprozess mit einer wässrigen Lösung von hochmolekularem, verzweigtem Polyethylenimin (PEI) zur reversiblen Absorption von CO₂ aus der Luft. Die Regeneration erfolgt ebenfalls mittels Niedertemperaturwärme. Im nächsten Schritt strebt das ZSW die Entwicklung einer adsorptiven Parallelproduktion von H₂O und CO₂ auf Basis von fest gebundenem PEI an. Einige wenige weitere Verfahren sind in der Entwicklung, ohne dass jedoch genauere Informationen verfügbar sind.

Im Folgenden werden einige Ergebnisse der multidimensionalen Bewertung vorgestellt [5].

Kosten und Ressourcenverbräuche

Kosten

In Tab. 1 sind sowohl aktuelle als auch geschätzte zukünftige Kosten der einzelnen DAC-Prozesse dargestellt. Carbon Engineering ermittelte mittels eines Simulations-

modells mögliche Kostensenkungen von derzeit 540 €/t CO₂ (Demoanlage) auf nivellierte 85-117 €/t CO₂ [6].

Climeworks hat in 2018 ebenfalls Kosten von 540 €/t CO₂ für ihre derzeitigen Anlagen angegeben und strebt 180 €/t CO₂ für 2020 (Upscaling und Massenproduktion) und 90 €/t CO₂ bis 2025/2030 (weitere Forschung und Entwicklung, F&E) an.

Global Thermostat nennt aktuelle Kosten von 45 €/t CO₂ und zukünftige Kosten von 14-45 €/t CO₂.

Diesen vagen Abschätzungen stehen die Ergebnisse einer umfassenden techno-ökonomischen Bewertung gegenüber, die auf Ausbauszenarien und Lernraten basiert [7]. Die Autoren prognostizieren für generische Anlagen für 2050 gemittelte Kosten in Höhe von 54-71 €/t CO₂ für DAC_{highTemp} und 38-54 €/t CO₂ für DAC_{lowTemp}.

Energiebedarf

Theoretisch würde die Abscheidung von CO₂ durch DAC 2-4 mal so viel Energie erfordern wie die Abscheidung von Abgasen aus einem Kraftwerk (CCS), was angesichts einer 250-300 mal geringeren CO₂-Konzentration in der Luft relativ gering ist. In der Realität ist jedoch mit deutlich schlechteren Werten zu rechnen. In Tab. 2 sind Angaben zu den bekannten DAC-Prozessen dargestellt. Sie sind nicht direkt vergleichbar, da sie für bestimmte Systemkonfigurationen ermittelt wurden, zeigen jedoch, dass für zukünftige kommerzielle Großanlagen noch erhebliche Effizienzverbesserungen zu erwarten sind.

Wasserbedarf

Die Wasserintensität der jeweiligen Verfahren hängt von verschiedenen Faktoren wie Temperatur, Umgebungsbedingungen und Lösungsmolarität ab. Carbon Engineering gibt durch Verdampfung verursachte Nettowasserverluste für seine Pilotanlage in Höhe von 4,7 m³/t CO₂ an. Climeworks hingegen produziert ca. 1 m³ Wasser/t CO₂, weil der TSA-Prozess kein Wasser verbraucht und gleichzeitig die Feuchtigkeit der angesaugten Umgebungsluft genutzt werden kann. Der Wert kann je nach Standort variieren.

Tab. 1: Aktuelle und zukünftig erwartete spezifische Kosten von DAC-Verfahren in €/t CO₂ (bei einem Umrechnungskurs von 0,9 €/US\$)

| €/t CO ₂ | DAC _{highTemp} | | DAC _{lowTemp} | | |
|---------------------|-----------------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|
| | Carbon Engineering | Fasihi et al. [7] | Climeworks | Global Thermostat | Fasihi et al. [7] |
| Aktuell | 540 | | 540 | 45 | |
| Prognose | 85-117 („n ^{te} Anlage“) | | 180 (2020) 90 (2025/30) | 14-45 | |
| Prognose, gemittelt | | 54-71 (2050) | | | 38-54 (2050) |

Flächenbedarf

Die Angaben für Flächenbedarfe sind sehr ungenau. Carbon Engineering gibt in einem Konzeptentwurf Abmessungen von 8 m x 200 m für die Abscheidung von 0,1 Mt CO₂/Jahr an (=0,0016 km²/(Mt CO₂-Jahr)). Das Unternehmen weist allerdings darauf hin, dass sich die antizipierten Werte lediglich auf die Einbauten zur CO₂-Absorption („Packings“) beziehen und eine tatsächliche Anlagengröße deutlich unterschätzen würden.

Climeworks weist eine Anlagengröße von 90 m² (Typ „DAC-18“) für eine Abscheidung von 0,9 kt/Jahr (=0,1 km²/(Mt CO₂-Jahr)) aus, die zum größten Teil durch notwendige Freiräume zwischen Reihen von Anlagentürmen verursacht würden. Diese Angaben beinhalten die komplette Anlage inklusive Steuerungstechnik, jedoch keine Flächen für die nötige Energiebereitstellung. Bei der Kopplung der DAC-Anlage mit Syntheseanlagen wäre hier nur der Flächenverbrauch für die nötige Stromerzeugung mit zu berücksichtigen. Im Falle der CO₂-Gewinnung für DACCS käme noch die nötige Wärmebereitstellung hinzu. Global Thermostat gibt eine Fläche von 20-500 t CO₂/(Jahr·m²) an (=0,05-0,002 km²/(Mt CO₂-Jahr)).

Stand der Technologien und Forschungsbedarf

Die Angaben für den „Technology Readiness Level“ zur Beurteilung des Entwicklungsstandes von Technologien auf einer Skala von 1 (Grundlagenforschung) bis 9 (erfolgreicher kommerzieller System Einsatz) fallen in der Literatur sehr unterschiedlich aus. Während einerseits alle NET einschließlich DAC (aber ohne BECCS) in einem sehr frühen Entwicklungsstadium gesehen werden (TRL=1-3), werden andererseits DAC_{highTemp} mit TRL=3-5 und DAC_{lowTemp} mit TRL=5-6 (Demonstration) eingestuft. Auch wenn sich die Verfahren damit noch zwischen frühem F&E- und Demonstrationsstadium befinden, werden sie zumindest durch Climeworks und Global Thermostat schon als marktreif eingestuft. Ein großskaliger kommerzieller Einsatz wird jedoch vermutlich nicht vor 2030 erreicht.

Neben dem tatsächlichen TR-Level ist auch eine allgemeine Einschätzung des Entwick-

lungsrisikos schwierig. Legt man jedoch die Unternehmensangaben zugrunde, dürfte das rein technische Risiko eher gering sein, da Anlagen bereits auf dem Markt angeboten werden. Lernprozesse (technisches Lernen, Upscaling und Massenproduktion), die Kostenreduktionen auslösen, sind jedoch von einem entsprechenden Absatzmarkt abhängig. Dieser wird sich – über Einzelanwendungen hinaus – erst entwickeln, wenn geeignete CO₂-Steuerungsinstrumente existieren. Zur Erreichung der ambitionierten Klimaziele dürften jedoch CO₂-Vermeidungskosten um die 100 €/t CO₂ realistisch sein. Bei der Herstellung von Syntheseprodukten stellt die CO₂-Abscheidung zudem nur einen Kostenbestandteil unter mehreren dar. So werden die Absatzchancen auch von zu schaffenden Marktanzweinstumenten für diese Produkte abhängen. Daher wird das marktwirtschaftliche F&E-Risiko allgemein als hoch und das technische F&E-Risiko als eher gering eingestuft.

Die ausgewertete Literatur zeigt, dass insbesondere bei der Entwicklung von CO₂-Sorbentien und Prozessen Forschungsbedarf besteht. Auch wenn sich die Niedertemperatur-Verfahren im Hinblick auf die potenzielle Nutzung von Abwärme aus PtX-Prozessen als sinnvoller erweisen und langfristig die kostengünstigere Variante darstellen könnten [7], sollten auch andere Verfahren im Sinne einer technologieoffenen Forschung weiter entwickelt werden. Im Falle von DAC_{highTemp} könnte dies z. B. die Nutzung von Hochtemperaturwärme aus solarthermischen Kraftwerken anstatt von Erdgas sein. Bereits marktreif entwickelte Prozesse müssen zudem für den großtechnischen Einsatz und die Massenproduktion vorbereitet werden. Dies erfordert die Minimierung des

Energiebedarfs, die Skalierung der Anlagen und insbesondere die Prozessintegration mit Syntheseverfahren, um sie optimal für die Herstellung strombasierter Produkte nutzen zu können.

Darüber hinaus fehlen umfassende Technologiebewertungen sowohl für den Einsatz für PtX als auch als NET. Einerseits bedarf es Studien zum möglichen Einsatzpotenzial, dem Zusammenspiel der einzelnen Prozessschritte, dem zeitlichen Ablauf insbesondere beim Aufbau der benötigten Infrastrukturen sowie den Auswirkungen auf und Rückkopplungen mit dem Energiesystem. So könnten z. B. zunächst große Punktquellen zur Bereitstellung von fossilem CO₂ genutzt werden, bis die Massenfertigung von DAC angelaufen wäre. Der Einsatz von DAC-Anlagen für PtX-Prozesse könnte wiederum als Wegbereiter für einen möglicherweise notwendigen massiven Einsatz als NET dienen.

Andererseits sollte der Einsatz von DAC auch ganzheitlich, aus verschiedensten Perspektiven, bewertet werden. Dies betrifft z. B. die Nachhaltigkeit der Technologien, politische Instrumente, Risikofragen, institutionelle und rechtliche Aspekte und auch den Einbezug der verschiedensten Akteure über partizipative Prozesse. Dass diese Themen bisher nur am Rande behandelt werden, zeigt eine Analyse wissenschaftlicher Artikel, nach der sich 68,5 % von 167 relevanten Artikeln, die zwischen 2006 und 2019 erschienen sind, mit technischer Grundlagenforschung (57,5 %) und den Kosten von DAC (13 %), aber nur 17 % mit übergreifenden Fragen wie Szenarien, politischen Aspekten oder Anwendungsfällen befassen. Weitere 12,5 % diskutieren DAC im Kontext von NET.

Tab. 2: Aktuelle und zukünftig erwartete spezifische Energieverbräuche von DAC-Verfahren

| | Einheit | DAC _{highTemp} | | DAC _{lowTemp} | | | |
|------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|----------|-------|
| | | Carbon Engineering ¹⁾ | Demo Ziel [6] | Climeworks Pilot | Global Thermostat Ziel | ZSW Demo | |
| Wärme | MWh _{th} /t CO ₂ | 2,78 ²⁾ | 2,45-1,46 ^{2) 3)} | 2,5 | 1,5 | n.a. | 2-2,5 |
| Strom | MWh _{el} /t CO ₂ | 0 | 0-0,077 ³⁾ | 0,5 | | n.a. | 0,5-1 |
| Temperatur | °C | | > 850 | 100 | | 85-100 | |

¹⁾ Die Zahlen beziehen sich auf die Brutto-CO₂-Abscheidung aus der Luft. Da die erdgasbedingten CO₂-Emissionen durch einen Post-Combustion-Prozess jedoch nur teilweise abgeschieden werden können, sind die Netto-Energieverbräuche pro t CO₂ höher.

²⁾ Erdgaseinsatz

Rolle der deutschen Industrie

Die Analyse im Rahmen der BMWi-Studie hatte auch die mögliche Rolle der deutschen Industrie im Fokus – jedoch mit ernüchternden Ergebnissen: Weder entwickeln deutsche Unternehmen DAC-Verfahren, noch entfällt auch nur eines der weltweit 20 angemeldeten Patente auf Deutschland. Auch das öffentliche F&E-Budget, das DAC direkt zugeordnet werden könnte, ist sehr gering (BMBF-Mittel zur Entwicklung des oben genannten Verfahrens des ZSW). Schließlich können nur 7 (= 4 %) der 173 wissenschaftlichen Artikel mit explizitem Fokus auf DAC Autoren aus Deutschland zugeordnet werden. Dennoch dürfte zumindest für Teilbereiche hohe Kompetenz vorliegen, da die grundlegenden chemischen Prozesse auch in anderen Sektoren relevant sind.

Auch wenn kein Beitrag von DAC zur inländischen Wertschöpfung abgeleitet werden konnte, wurde versucht, zumindest das mögliche Potenzial für DAC-Anlagen in Deutschland abzuschätzen. Als grober Indikator wurde die Nachfrage nach klimaneutralem CO₂ für Kraftstoffe und Chemikalien betrachtet. Der Bedarf für PtL wurde aus dem „Klimaschutzszenario KS95“ (Reduktion der THG-Emissionen bis 2050 um 95 %) abgeleitet, das in 2040 75 TWh und in 2050 95 TWh für den Schwerlastverkehr und die Luftfahrt annimmt, ansonsten aber auf Elektromobilität und Wasserstoff setzt [8].

Allein dieser Bedarf würde in 2050 jedoch schon 26 Mt CO₂ erfordern. Gleichzeitig wurde angenommen, dass bis 2050 auch die Chemieindustrie klimaneutral produzieren wird. Der Gesamtbedarf an Petrochemikalien könnte über synthetisches Methanol mit anschließender Methanol-to-Olefin-Synthese hergestellt werden. In Anlehnung an das Szenario „KS95“ wird davon ausgegangen, dass

der Bedarf an PtC in 2020 20 %, in 2040 60 % und in 2050 95 % des jetzigen Verbrauchs an Petrochemikalien beträgt, was die Bereitstellung von 55 Mt CO₂ in 2050 erfordern würde.

In der Summe ergeben sich 81 Mt CO₂, die in 2050 mittels DAC erzeugt werden könnten. Tab. 3 zeigt, dass diese Menge 45 000 Anlagen vom Typ „DAC-36“ der Firma Climeworks entspricht. Der zusätzliche Strom- und Wärmebedarf für die CO₂-Abtrennung (41 TWh_{el} bzw. 122 TWh_{th}) beträgt 7,8 % des deutschen Strombedarfs (527 TWh) von 2018 bzw. 22,4 % der in 2016 in Deutschland genutzten Prozesswärme (544 TWh). Der Flächenbedarf (8,1 km²) beträgt 0,9 % der Fläche von Berlin.

Auch wenn diese Abschätzung noch sehr ungenau ist, zeigt sie dennoch eine erste Größenordnung des zukünftigen Potenzials an DAC-Anlagen auf. Da auch andere Länder vor entsprechenden Herausforderungen stehen, dürfte mit einem großen Marktpotenzial auch für deutsche Firmen zu rechnen sein. Noch nicht eingerechnet ist dabei das Potenzial für DAC, um möglicherweise „negative Emissionen“ durch die geologische Speicherung des CO₂ zu erzielen. Nach ersten groben Abschätzungen könnte dieses in Deutschland in 2050 etwa doppelt so hoch wie der oben ausgewiesene Bedarf für PtL und PtC liegen – mit entsprechenden Folgen für den Flächen- und Energiebedarf [5].

Fazit

Die Analysen zeigen, dass derzeit weder die zukünftige Bedeutung von DAC noch die mögliche Rolle der deutschen Industrie eindeutig bestimmt werden kann. Die Ergebnisse der multidimensionalen Analyse, aber auch die Notwendigkeit technologischer Weiterentwicklungen, integrierter Bewertungen und systemanalytischer Studien zeigen einen hohen F&E-Bedarf auf.

Unterdessen drängt die Zeit, falls DAC tatsächlich in näherer Zukunft in größerem Umfang eingesetzt werden sollte. Eine öffentliche Diskussion über die mögliche Abscheidung von CO₂ aus der Luft, sowohl für PtX als auch zur Erzielung negativer Emissionen, hat bisher jedoch nicht stattgefunden. Auch wenn in Deutschland bisher sehr wenig Forschung zu DAC stattgefunden hat, sind deutsche Unternehmen aus der Chemieindustrie und dem Maschinenbau breit aufgestellt, um entsprechende F&E voranzutreiben. Obwohl die Schätzungen des Marktpotenzials sehr unsicher sind, dürfte sich angesichts der Klimaschutzanforderungen auch für deutsche Unternehmen eine große Marktchance ergeben.

Anmerkungen

- [1] Grubler, A. et al.: A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies. *Nat. Energy* 2018(3)515.
- [2] IPCC: Synthesis Report. 5th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva 2014.
- [3] Unternehmensangaben sind, wenn nicht anders angegeben, den jeweiligen websites entnommen.
- [4] ZSW: CO₂ für regenerative Kraftstoffe effizienter aus der Luft gewinnen. <https://www.zsw-bw.de/presse/aktuelles/detailansicht/news/detail/News/co2-fuer-regenerative-kraftstoffe-effizienter-aus-der-luft-gewinnen.html>. Stuttgart 2019.
- [5] Eine ausführliche Darstellung der Autoren ist kürzlich im *Journal Energies* (auf englisch) erschienen: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/18/3443>.
- [6] Keith, D.W. et al.: A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. *Joule* 2018 (2)1573-1594.
- [7] Fasihi, M. et al: Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. *J. Clean. Prod.* 2019(224)957-980.
- [8] Öko-Institut, Fraunhofer ISI: Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht - Studie im Auftrag des BMUB. Berlin, Karlsruhe 2015. [pier-regionale-gruenstromkennzeichnung-nung.pdf?__blob=publicationFile&v=5](http://www.oeko.de/fileadmin/oeko/pier-regionale-gruenstromkennzeichnung-nung.pdf?__blob=publicationFile&v=5).

Tab. 3: Beispielhafte Berechnung von benötigten Anlagen, Flächenverbrauch und Energiebedarf, um mittels DAC klimaneutrales CO₂ in Deutschland herzustellen (Bezugsjahr 2050, Anwendung als Edukt für PtL und PtC)

| Anwendung | CO ₂ -Abscheidungen | Anlagen ¹⁾ | Flächenverbrauch ²⁾ | Energiebedarf | |
|--------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | Mt/Jahr | Anzahl | km ² /Jahr | TWh _{th} /Jahr | TWh _{el} /Jahr |
| Power-to-Chemicals | 55 | 30 556 | 5,5 | 83 | 28 |
| Power-to-Liquids | 26 | 14 444 | 2,6 | 89 | 13 |
| Summe | 81 | 45 000 | 8,1 | 122 | 41 |

¹⁾ Typ „DAC-36“ der Schweizer Firma Climeworks. ²⁾ Ohne Flächenverbrauch für die Erzeugung von Strom, grobe Abschätzung.

Dr. P. Viebahn, Leiter des Forschungsbereichs Sektoren und Technologien in der Abteilung Zukünftige Energie- und Industriesysteme, M.Sc. Sustainability Management A. Scholz und Dipl.-Umweltwiss. O. Zelt, wissenschaftliche Mitarbeiter Abteilung Zukünftige Energie- und Industriesysteme, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal peter.viebahn@wupperinst.org