

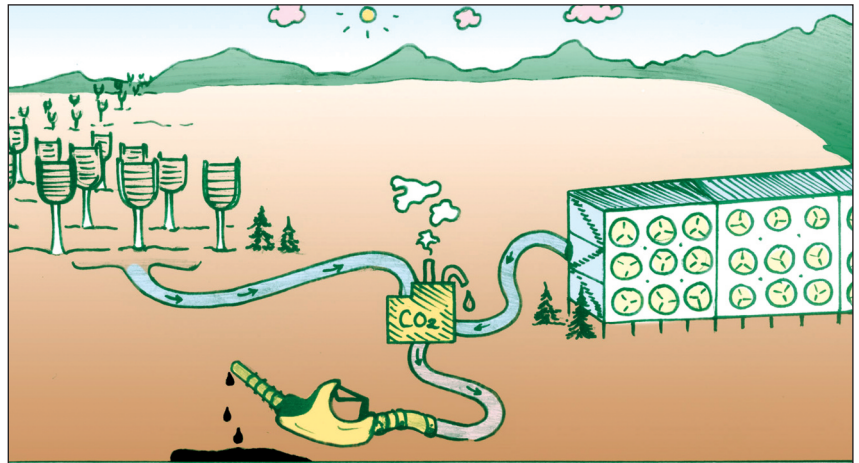
Direct Air Capture (DAC)

Beschreibung und Zweck der Technologie

Direct Air Capture (DAC) ist eine anvisierte Technologie zur Abscheidung von Treibhausgasen (GGR^A), mit der der Atmosphäre theoretisch CO₂ (und möglicherweise auch weitere Treibhausgase) in großem Umfang entzogen werden könnten. Die Vorschläge zur Umsetzung dieser Technologie sehen vor, das CO₂ entweder durch Abscheidung und Lagerung (CCS^B) unterirdisch oder durch CO₂-Abscheidung, -Nutzung und -Speicherung (CCUS^C) in Produkten von unterschiedlicher Lebensdauer zu speichern.

DAC-Verfahren beruhen auf chemischen Reaktionen, die der Atmosphäre CO₂ entziehen, wobei Substanzen eingesetzt werden, die als selektive CO₂-Filter agieren. Die zwei am weitesten entwickelten Verfahren verwenden flüssige Lösungsmittel und feste Sorptionsmittel: CO₂ löst sich in flüssigen Lösungsmitteln, wie z. B. einer konzentrierten Hydroxidlösung, auf oder bleibt an der Oberfläche fester Sorptionsmittel, z. B. an Kunstharzen, haften. Einige DAC-Konzepte verwenden große Ventilatoren, die die Umgebungsluft durch die Filter führen, um den Abscheidungsprozess zu intensivieren, da die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre im ppm-Bereich liegt.

Das CO₂-Filterverfahren ist jedoch nur der erste Schritt: Damit sich die Filter wiederholt verwenden lassen, müssen sie in der Lage sein, das abgeschiedene CO₂ wieder freizusetzen. Dieser Regenerationsprozess erfordert in der Regel hohe Temperaturen (80 °C bis 800 °C), was wiederum einen hohen Energieverbrauch mit sich bringt.¹



Obwohl DAC mit hohen Kosten verbunden ist, ist die fossile Brennstoffindustrie sehr daran interessiert, weil abgeschiedenes CO₂ für die tertiäre Ölgewinnung angewendet werden kann.

Weitere DAC-Ansätze umfassen die CO₂-Abscheidung mit batterieähnlichen Geräten, die elektrochemische Reduktion von CO₂ oder Sorptionsmittel mit feuchtigkeitsbasierten Freisetzungsprozessen. Die Entwürfe der anvisierten DAC-Anlagen reichen von mit CO₂-Kollektoren bestückten Schiffscontainern bis zu künstlichen Bäumen.²

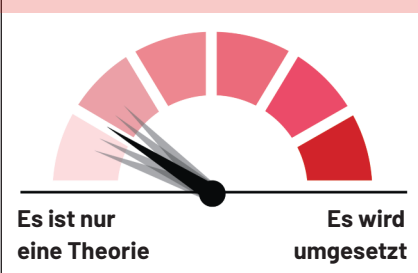
Alle Varianten von DAC sind extrem energie- und kostenintensiv. Der gesamte Abscheidungsprozess für eine Tonne CO₂ erfordert zwischen 5 und 10 GJ elektrischer und / oder thermischer Energie.³ Die Kostenschätzungen für DAC reichen von ca. 100 bis

1.000 USD pro Tonne, wobei niedrigere Kosten für DAC bisher nur theoretisch nachgewiesen wurden.⁴ Um einen signifikanten Effekt auf die globalen CO₂-Konzentrationen zu bewirken, müsste DAC in großem Maßstab eingeführt werden.

Auswirkungen auf:



Realitätscheck:



- A GGR = Greenhouse Gas Removal
- B CCS = Carbon Capture and Storage (Abscheidung und Lagerung von Kohlenstoff)
- C CCUS = Carbon Capture Use and Storage (Abscheidung, Nutzung und Speicherung von Kohlenstoff)

Das wirft jedoch ernste Fragen bezüglich des Energiebedarfs, des Wasserverbrauchs, der Landnutzung oder der toxischen Auswirkungen und der Entsorgung der verwendeten chemischen Bindemittel auf. Darüber hinaus kann eine sichere und langfristige CO₂-Speicherung nicht garantiert werden. Beim Einsatz von CCS wird das abgeschiedene CO₂ durch Druck verflüssigt und zu Standorten transportiert, wo es in geologische Formationen gepumpt werden kann – theoretisch zur langfristigen Speicherung. Diese Technologie ist jedoch mit einer ganzen Reihe von Risiken verbunden, eine erhebliche Gefahr sind z. B. Leckagen (siehe [Technologie-Briefing zu CCS](#)).

Durch CCUS-Verfahren soll, so die Idee, abgeschiedenes CO₂ in Erzeugnissen mit unterschiedlicher Langlebigkeit „gespeichert“ werden, z. B. in Sprudelwasser, Kraftstoffen und Chemikalien auf Kohlenstoffbasis oder in Baumaterialien. Das energieintensiv abgeschiedene CO₂ gelangt normalerweise wieder zurück in die Atmosphäre (siehe [Technologie-Briefing zu CCUS](#)).

Die fossile Brennstoffindustrie ist sehr an DAC interessiert, weil das abgeschiedene CO₂ für die tertiäre Ölgewinnung^D eingesetzt werden kann, was bedeutet, dass mehr fossile Brennstoffe gefördert werden und mehr CO₂ emittiert wird.

Akteur/innen

Mehrere Unternehmen und Forschungseinrichtungen arbeiten daran, DAC-Technologien zu kommerzialisieren und weiterzuentwickeln. Der Sektor erhält private und öffentliche Investitionen – zweistellige Millionenbeträge sind keine Seltenheit. Zu den privaten Investor/innen zählen insbesondere, aber nicht ausschließlich, die fossile Brennstoffindustrie und die Bergbaubranche, darunter der australische Ölkonzern BHP, Bill Gates (der im großen Rahmen in Öltransporte investiert), die Autobranche, Chevron Technology Ventures, ExxonMobil, der kanadische Teersand-Großinvestor Murray Edwards, Occidental Petroleum und Shell.

D CO₂ wird in Ölreservoirs gepumpt, um schwer zugängliche Ölvorkommen nutzen zu können, wird auch als „Enhanced Oil Recovery“ (EOR) bezeichnet.

Um einen signifikanten Effekt auf die globalen CO₂-Konzentrationen zu bewirken, müsste DAC in großem Maßstab eingeführt werden. Das wirft jedoch ernste Fragen bezüglich des Energiebedarfs, des Wasserverbrauchs, der Landnutzung oder der toxischen Auswirkungen und der Entsorgung der verwendeten chemischen Bindemittel auf. Darüber hinaus kann eine sichere und langfristige CO₂-Speicherung nicht garantiert werden.

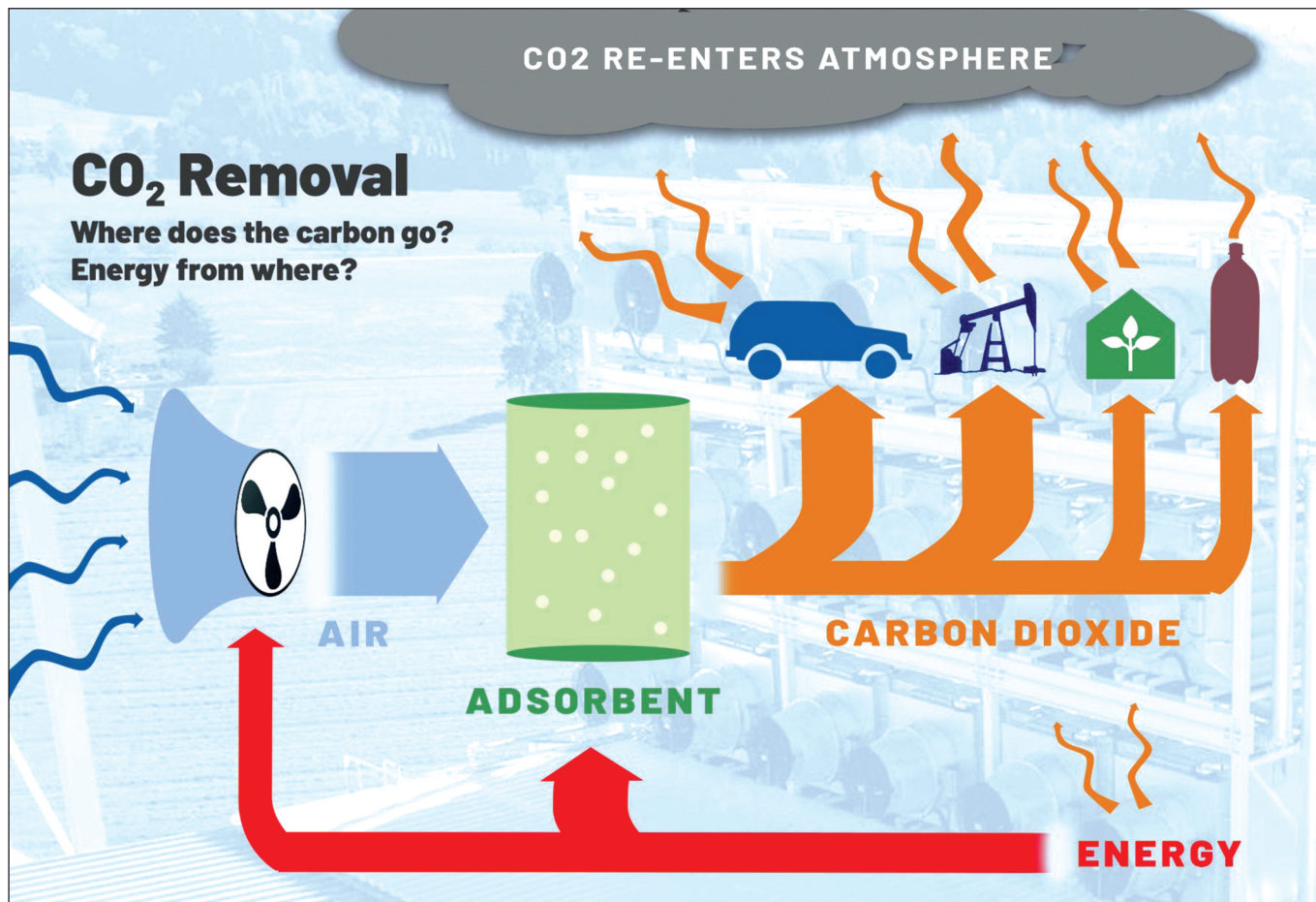
Die meisten öffentlichen Mittel für den DAC-Sektor wurden bisher von den USA, der Europäischen Union (EU), Kanada, der Schweiz und Norwegen bereitgestellt.⁵

Viele DAC-Firmen sind Ausgründungen von Forschungseinrichtungen.⁶ Die Climeworks AG, ein Spin-off der ETH Zürich, ist bislang das Unternehmen mit den meisten DAC-Anlagen. Die

Firma hat ihre erste Anlage 2017 in Hinwil in der Schweiz in Betrieb genommen und ist an mehreren Forschungsprojekten beteiligt. Laut Climeworks filtert die Anlage in Hinwil jährlich etwa 900 Tonnen CO₂ und liefert einen Teil des abgeschiedenen CO₂ zur CO₂-Düngung an ein nahegelegenes Gewächshaus. Etwa 600 Tonnen CO₂ werden per LKW zur Schweizer Produktionsstätte der Coca-Cola-Sprudelwassermarke „Valser“ transportiert. Climeworks arbeitet mit mehreren Unternehmen zusammen, um synthetische Kraftstoffe aus abgeschiedenem CO₂ zu entwickeln und herzustellen, darunter das norwegische Unternehmen Nordic Blue Crude AS sowie ein Gemeinschaftsprojekt des italienischen Ölkonzerns ENI und des Schweizer Spin-offs Synhelion. Climeworks wurde mit mehr als 50 Mio. EUR an öffentlichen und privaten Fördermitteln ausgestattet.⁷



Einer der „künstlichen Bäume“ – der „mechanische Baum“, entwickelt von Silicon Kingdom Holdings basierend auf einer vom Center for Negative Carbon Emissions (CNCE) der Arizona State University erarbeiteten Technologie (Arizona State University)



Viele Marketing-Programme für DAC – die Umengen an grüner Energie verbrauchen würden – verursachen vermutlich zusätzliche Emissionen aus fossilen Brennstoffen. (Anja Chalmin/ETC Group)

Carbon Engineering Ltd., ein von David Keith (Harvard University) gegründetes Unternehmen, nahm 2015 in Squamish, Kanada, eine Pilotanlage in Betrieb, die täglich etwa eine Tonne CO₂ abscheidet. 2017 wurde die Anlage an eine Plattform zur Kraftstoffsynthese angeschlossen, um synthetische Kraftstoffe für den Verkehrssektor zu produzieren, die aus dem abgeschiedenen CO₂ und aus Wasserstoff erzeugt werden sollen. Das Unternehmen hat über 100 Mio. CAD von mehreren privaten Investor/innen, darunter Öl- und Bergbauunternehmen, sowie aus öffentlichen Quellen eingeworben und plant die Inbetriebnahme einer größeren DAC-Anlage in Zusammenarbeit mit Oxy Low Carbon Ventures für 2023. Das abgeschiedene CO₂ soll für die tertiäre Ölgewinnung verwendet werden, was mehr fossile Brennstoffe und mehr CO₂-Emissionen zur Folge haben wird.⁸

Das in den USA ansässige Unternehmen Global Thermostat betreibt seit 2010 eine DAC-Pilotanlage in Menlo Park, Kalifornien. 2018 eröffnete es in Huntsville, Alabama, seine erste kommerzielle Anlage, die jährlich 4.000 Tonnen CO₂ abscheidet.

Im Jahr 2019 unterzeichnete das Unternehmen eine Entwicklungsvereinbarung mit ExxonMobil, um die Skalierbarkeit der DAC-Technologie von Global Thermostat zu untersuchen. Bislang hat das Unternehmen mehr als 70 Mio. USD an Fördermitteln eingeworben.⁹

Weltweit gibt es mehr als zehn weitere Initiativen zur Fortentwicklung und Vermarktung der DAC-Technologie, darunter Soletair Power aus Finnland. Das Unternehmen entwickelte eine Technologie, die DAC mit einem Elektrolyseur zur Wasserstofferzeugung und einem Synthesereaktor zur Produktion von Kohlenwasserstoff kombiniert, und nahm 2018 seine erste Demonstrationsanlage in Betrieb. Das in den USA beheimatete Unternehmen Infinitree LLC entwickelt ein CO₂-Abscheidungsverfahren für den Einsatz in Gewächshäusern. Die in Dublin ansässige Firma Silicon Kingdom Holdings beabsichtigt die DAC-Technologie zu vermarkten, die am Center for Negative Carbon Emissions der Arizona State University entwickelt wurde, und plant die „Pflanzung“ von 1.200 mechanischen Bäumen zur CO₂-Abscheidung.¹⁰

Das weltweit größte Forschungsprogramm zu DAC ist das EU-finanzierte europaweite Forschungsprojekt CarbFix unter der Leitung des Unternehmens Reykjavik Energy. Das Projekt kombiniert DAC mit CCS und umfasst das Abscheiden von CO₂ und H₂S im firmeneigenen Geothermiekraftwerk Hellisheidi in der Nähe von Reykjavik. Das CO₂ wird unter Druck in Wasser gelöst, und die Lösung wird in Basaltformationen in der Nähe des Kraftwerks in 400 m bis 800 m Tiefe injiziert, mit dem Ziel, das Gas in mineralischer Form im Grundgestein zu speichern. Das europäische Folgeprojekt GECO (Geothermal Emission Control) soll die CarbFix-Ergebnisse an fünf Demonstrationsstandorten in ganz Europa vertiefen und weiterentwickeln.¹¹

In den USA sollen sich größere Forschungsinitiativen entwickeln, nachdem der US-Kongress den „Sea Fuel Act of 2019“ verabschiedet und das US-Verteidigungsministerium angewiesen hat, ein DAC-Programm umzusetzen. Die erste Phase (2020-2023) widmet sich der Forschung und Entwicklung, in der zweiten Phase (2024-2026) sollen DAC-Verfahren in Demonstrationsprojekten erprobt werden.¹²

In Kanada starteten 2019 zwei größere Forschungsprojekte: Das Pacific Institute for Climate Solutions finanziert ein DACCS (DAC+CCS) -Projekt mit dem Ziel, eine schwimmende Plattform zu konzipieren, die CO₂ aus der Umgebungsluft abscheiden und zur Speicherung unter den Meeresboden einleiten soll. Das kanadische Ministerium für natürliche Ressourcen^E finanziert gemeinsam mit Industriepartner/innen ein DAC-Projekt mit der Zielsetzung, CO₂ in Abraumhalden von Bergwerken zu mineralisieren und in einer Nickelmine in British Columbia Versuche durchzuführen.

Auswirkungen der Technologie

Obwohl wenig über die CO₂-Abscheideeffizienz, die Sicherheit und die Auswirkungen von DAC bekannt ist, haben mehrere Unternehmen bereits damit begonnen, DAC als Klimалösung zu vermarkten. Ob die Technologie selbst klimafreundlich ist, muss kritisch hinterfragt werden, unter anderem, weil DAC einen erheblichen Energieeinsatz erfordert. Dieser Energieaufwand verursacht Treibhausgasemissionen, sofern er nicht vollständig

aus erneuerbaren Energien bezogen wird. Die Energie, die benötigt wird, um die 600 Tonnen CO₂ abzuscheiden, die Climeworks der Sprudelwassermarke „Valser“ zur Verfügung stellt, reicht aus, um 760 EU-Bürger für ein ganzes Jahr mit Strom zu versorgen – und das obwohl hierbei noch nicht die Energie einberechnet ist, die erforderlich ist, um das CO₂ zu komprimieren, zu reinigen und über 200 km per LKW zu transportieren.¹³ Da viele Menschen – insbesondere im globalen Süden – immer noch keinen Zugang zu Elektrizität haben, scheint es mit den Grundsätzen der globalen Klimagerechtigkeit unvereinbar zu sein, übermäßige Mengen an erneuerbaren Energien in den nördlichen Industrieländern zu nutzen, damit die umweltverschmutzenden Industrien weiterhin ihr „Business as usual“ betreiben können.

DAC-Anlagen, die in großem Maßstab betrieben werden, erfordern eine umfangreiche Infrastruktur. Um jährlich eine Mio. Tonnen CO₂ in einer Anlage abzuscheiden, die flüssige Lösungsmittel nutzt, wurde der Land-Fußabdruck der Anlage auf 60 bis 100 km² geschätzt, wenn diese mit Solarenergie arbeitet. Das bedeutet, dass der Betrieb von DAC in einem Umfang, der ausreicht, um sich auf die globalen CO₂-Emissionen auszuwirken, eine erhebliche und großflächige Bedrohung für natürliche Ökosysteme darstellen würde.¹⁴

Eine vollständige Lebenszyklusanalyse für den Bau, die Wartung und die Umweltauswirkungen von DAC-Großanlagen ist nicht verfügbar, was eine erhebliche Wissenslücke darstellt. Beispielsweise ist wenig über die Toxizität, Herstellung und Entsorgung der verwendeten CO₂-Lösungs- und Sorptionsmittel bekannt. Die verwendeten Hydroxidlösungen, z. B. die von Carbon Engineering eingesetzte Kaliumhydroxidlösung, benötigen für ihrer Herstellung erhebliche Mengen an Energie und Wasser und sind hochkorrosiv. Während des Abscheidvorgangs können so Leckagen entstehen.¹⁵ Auch der Wasserverbrauch während des DAC-Prozesses ist ein Problem: Für eine Tonne CO₂ werden schätzungsweise 5 bis 13 Tonnen Wasser benötigt, und einige DAC-Verfahren, die feste Sorptionsmittel verwenden, können bis zu 20 Tonnen Wasser pro Tonne abgeschiedenes CO₂ verbrauchen.¹⁶ Auf klimarelevante Dimensionen skaliert, könnte diese Technologie die Wasserknappheit verschärfen – die bereits jetzt eines der gravierenden Probleme der Klimakrise ist.

E Natural Resources Canada



Eine DAC-Anlage von Climeworks in der Schweiz (Jay Inslee/Flickr)

Ein Modellierungsexperiment, das die Auswirkung von DAC auf Maßnahmen zur Klimastabilisierung untersuchte, kam zum Ergebnis, dass DAC die Reduktion von Emissionen hinauszögern und eine längere Nutzung von Öl ermöglichen würde, wovon energieexportierende Länder profitieren würden.¹⁸ Ähnliches gilt natürlich für andere Geoengineering-Technologien und die so herbeigeführte Billigung der weiteren Nutzung fossiler Brennstoffe ist eine der Hauptgefahren, die von DAC und anderen Verfahren zur CO₂-abscheidung ausgehen.

Das abgeschiedene CO₂ soll als Rohstoff für CCS oder für industrielle Zwecke verwendet werden. DAC-Befürworter/innen vertrauen darauf, dass die geologische Speicherung von CO₂ in leeren Öl- und Gasreservoirs oder in tiefen salinen Aquiferen^F möglich, effektiv und zuverlässig sein wird. Es gibt jedoch kaum praktische Erfahrungen, auf die sich dieses Vertrauen stützen könnte. Es ist unwahrscheinlich, dass die geologische Speicherung jemals eine zuverlässige und dauerhafte Lagerung gewährleisten kann – noch bevor die Einlagerung von Milliarden Tonnen an CO₂ diskutiert werden soll. Im Jahr 2018 erklärte eine Gruppe von Autor/innen, dass die Injektionen am isländischen DACCS-Standort Hellisheidi zu induzierter^G seismischer Aktivität führten.¹⁷

Die Verwendung von abgeschiedenem CO₂ für die tertiäre Ölgewinnung führt zu noch mehr Emissionen aus fossilen Brennstoffen. Wenn das abgeschiedene CO₂ in Konsumgütern verwendet wird (CCUS), gelangt es normalerweise wieder in die Atmosphäre. Wegen des hohen Energieverbrauchs der DAC-Verfahren ist das wahrscheinliche Gesamtergebnis, dass letztendlich mehr CO₂ in die Atmosphäre gelangt, als aus ihr entfernt wird.

Realitätscheck

Es gibt unterschiedliche technische Ansätze für DAC und mehr als zwanzig Teststandorte, aber keiner davon ist im kommerziellen Maßstab in Betrieb. Größere DAC-Standorte wurden angekündigt, und es sind zahlreiche neue Forschungsprojekte im Gange. Ein massiver Ausbau von DAC ist nur mit einer erheblichen Steigerung der Energieversorgung, enormen Wassermengen und beträchtlichen Finanzmitteln zu erreichen. Das Schicksal des abgeschiedenen CO₂ und die Antwort auf die Frage, ob es dauerhafte Speichermöglichkeiten geben wird, bleiben höchst ungewiss.

Weiterführende Inhalte

Geoengineering Monitor (2019), „**Direct Air Capture – recent developments and future plans**“, <http://www.geoengineeringmonitor.org/2019/07/direct-air-capture-recent-developments-and-future-plans/>

ETC Group und Heinrich-Böll-Stiftung, „**Geoengineering Map**“, <https://map.geoengineeringmonitor.org/>

F salzwasserführende Gesteinsschichten

G von Menschen verursachte seismische Aktivität

Fußnoten

- 1 Beuttler, et al. (2019) The Role of Direct Air Capture in Mitigation of Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions, in: Front. Clim., online veröffentlicht: 21. November 2019, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fclim.2019.00010/full>; ETC Group und Heinrich-Böll-Stiftung (2020) Geoengineering Map, <https://map.geoengineeringmonitor.org/>
- 2 ETC Group und Heinrich-Böll-Stiftung (2020)
- 3 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2019) Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda, Washington, DC: The National Academies Press, 510 Seiten, ISBN 978-0-309-48452-7, <https://doi.org/10.17226/25259>; Gambhir & Tavoni (2019) Direct Air Carbon Capture and Sequestration: How It Works and How It Could Contribute to Climate-Change Mitigation, in: One Earth, Vol. 1(4): 405-409
- 4 Nisbet (2019) THE CARBON REMOVAL DEBATE. Asking Critical Questions About Climate Change Futures, Carbon Removal Briefing No. 2, Institute for Carbon Law Removal and Policy, American University, 24 Seiten, <https://www.american.edu/sis/centers/carbon-removal/upload/carbon-removal-debate.pdf>; Fuss, et al. (2018) Negative emissions-Part 2: Costs, potentials and side effects, in: Environmental Research Letters, Vol 13(6): 063002, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aabf9f>
- 5 ETC Group und Heinrich-Böll-Stiftung (2020)
- 6 ETC Group und Heinrich-Böll-Stiftung (2020)
- 7 ETC Group und Heinrich-Böll-Stiftung (2020)
- 8 ETC Group und Heinrich-Böll-Stiftung (2020)
- 9 ETC Group und Heinrich-Böll-Stiftung (2020)
- 10 ETC Group und Heinrich-Böll-Stiftung (2020)
- 11 ETC Group und Heinrich-Böll-Stiftung (2020)
- 12 ETC Group und Heinrich-Böll-Stiftung (2020)
- 13 Eurostat (2019) Electricity and heat statistics, abgerufen: Februar 2020, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_and_heat_statistics#Consumption_of_electricity_per_capita_in_the_households_sector; ETC Group und Heinrich-Böll-Stiftung (2020)
- 14 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2019); Nisbet (2019)
- 15 Realmonte, et al. (2019) An inter-model assessment of the role of direct air capture in deep mitigation pathways, Natural Communications, Vol. 10, <https://www.nature.com/articles/s41467-019-10842-5>; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2019)
- 16 Realmonte, et al. (2019)
- 17 Juncu, et al. (2018) Injection-induced surface deformation and seismicity at the Hellisheidi geothermal field, Iceland, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 391, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377027317304080?via%3Dihub>
- 18 Chen und Tavoni (2013) Direct air capture of CO₂ and climate stabilization: A model based assessment, Climatic Change, Vol. 118: 59-72, <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0714-7>