

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften
ZHAW
School of Management and Law

Bachelorarbeit

BSc in Betriebsökonomie – Vertiefung in General Management

Direct Air Capture Technologien - Sind sie die Zukunft?

Zentrum: Zentrum für Innovation und Entrepreneurship

Betreuer: Dr. Yann Blumer

Autor: Kai Becker

Matrikelnummer: 18-683-029

Abgabedatum: 09. Juni 2021

Management Summary

Dass der Klimawandel ein ernstes Problem darstellt und die CO₂-Konzentration in der Luft verringert werden muss, darüber ist sich die Wissenschaft einig. Während in der vorindustriellen Zeit die CO₂-Konzentration in der Luft bei 280 ppm lag, stieg sie bis 2019 auf 411 ppm an. Daher wurden Beschlüsse wie das Kyoto Protokoll oder das Pariser Klimaabkommen getroffen. In Letzterem hat man sich nun geeinigt hat, den Temperaturanstieg bis Ende des Jahrhunderts auf deutlich unter 2°C zu beschränken. Wie man dieses Ziel jedoch erreicht, ist immer noch mit sehr vielen Unklarheiten verbunden. Es gibt unzählige Möglichkeiten und Technologien und für jede Lösung Befürworter und Gegner. Eine dieser Möglichkeiten ist Direct Air Capture, auch DAC genannt. Diese noch junge Technologie wurde erstmals 1999 erwähnt, gewann jedoch erst ab 2010 so richtig an Bedeutung. Nun stellen sich Wissenschaftler und Politiker die Frage, ob und wie DAC eine Rolle spielen wird.

Diese Arbeit untersucht, welche Faktoren die Zukunft von DAC massgeblich beeinflussen und welche Bedingungen in naher bis mittlerer Zukunft bestehen müssen, damit DAC einen relevanten Beitrag zur Bekämpfung des Klimawandels leisten kann. Nach einer ausgiebigen Literaturrecherche, bei welcher 28 Studien analysiert wurden, konnten 14 Faktoren identifiziert und mittels Experteninterviews validiert werden.

Aufgrund der quantitativen Analyse der Daten konnte bestimmt werden, dass der Strommix, die variablen Kosten, die Fixkosten, technologische Verbesserungen durch R&D sowie die Anzahl an gebauten DAC-Anlagen die Faktoren sind, welchen die Wissenschaft zum jetzigen Zeitpunkt die stärksten Auswirkungen zuschreibt und welche am häufigsten genannt werden. Mithilfe eines Backcasting-Ansatzes konnte daraufhin synthetisiert werden, dass die Politik, die Wirtschaft mit Abnehmermärkten für gefangenes CO₂ sowie private Investoren, wie z.B. Apple, Microsoft oder Tesla, die wichtigsten Treiber sind. Diese werden mit ihren Aktionen in naher Zukunft massgeblich entscheiden, ob und wie sich DAC als eine Lösung, um den Klimawandel zu stoppen, durchsetzen wird.

Final konnten die Faktoren und Treiber mittels Experteninterviews validiert werden. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Politik und die privaten Investoren mit Abstand die wichtigsten Bedingungen darstellen, während die Wirtschaft der DAC-Technologie zwar einen ökonomischen Anreiz verschafft, diese aber wahrscheinlich kein wegweisender Treiber sein wird. Des Weiteren konnte bestimmt werden, dass DAC am besten nicht

als eine alleinige Lösung für die Reduktion der CO₂-Konzentration in der Luft eingesetzt wird, sondern vielmehr in einem breiten Mix aus Technologien und Strategien angewendet wird.

Aufgrund dieser Ergebnisse wird es als wichtig angesehen, dass in Zukunft untersucht wird, wie die Politik ein globales Handelssystem für negativ Emissionen aufbauen kann und wie die Rahmenbedingungen dafür aussehen sollten. Zudem sollten mehr Integrated-Assessment-Models, welche DAC als Lösung beinhalten, durchgeführt werden, um besser verstehen zu können, wie DAC am besten eingesetzt und welche Auswirkungen es haben wird.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während meiner Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Mein grösster Dank gebührt Herrn Dr. Yann Blumer, welcher mich bei meiner Bachelorarbeit betreut hat. Er stand mir stets bei Fragen zur Verfügung und hat mir mit konstruktiver Kritik weitergeholfen, wann auch immer es von Nöten war.

Einen besonderen Dank möchte ich an alle Teilnehmer und Teilnehmerinnen der Experteninterviews richten. Ich möchte mich für die von ihnen zur Verfügung gestellte Zeit und für die interessanten und aufschlussreichen Gespräche bedanken.

Ausserdem möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Eltern bedanken, welche diese Arbeit korrekturgelesen und mich auch sonst unterstützt haben.

Kai Becker

Zürich, 9. Juni 2021

Inhaltsverzeichnis

Management Summary.....	II
Danksagung	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
2 Hintergrund.....	4
2.1 Begriffsdefinition.....	4
2.1.1 Integrated Assessment Model.....	4
2.1.2 Negative Emission Technologies	4
2.2 Klimaziele des Pariser Klimaabkommens	5
2.3 Abgrenzung des Forschungsgegenstandes.....	5
2.3.1 Negative Emission Technologies	5
2.3.2 CO ₂ Capture Systeme	6
2.4 Bestehende DAC-Methoden	8
2.4.1 High Temperature aqueous solution System (HT).....	8
2.4.2 Temperature-Swing- (TSA) und Moisture-Swing- (MSA) Systeme	9
2.4.3 Vorteile der DAC-Systeme gegenüber alternativen CDR-Optionen.....	10
2.5 Forschungsfrage.....	11
3 Methodik.....	12
3.1 Backcasting Approach	12
3.2 Systematische Literaturrecherche	13
3.2.1 Datenbank.....	13
3.2.2 Vorgehen bei der Datensammlung	13
3.2.3 Bereinigung der Daten.....	14

3.2.4	Volltextsuche	15
3.3	Experten Interviews	17
3.3.1	Aufbau der Interviews	17
3.3.2	Interviewpartner.....	17
3.3.3	Auswertung der Interviews.....	18
3.4	Unterstützendes Material	19
4	Ergebnisse der Literaturrecherche	20
4.1	Qualitative Ergebnisse	20
4.1.1	Politische Faktoren	20
4.1.2	Ökonomische Faktoren.....	23
4.1.3	Technologische Faktoren.....	26
4.1.4	Ökologische Faktoren.....	28
4.2	Quantitative Ergebnisse	29
4.2.1	Festlegung der wichtigsten Faktoren.....	31
4.3	Anwendung des Backcasting-Ansatzes	32
4.3.1	Bestimmung der desirable futures	32
4.3.2	Einflüsse auf desirable futures.....	32
4.3.3	Identifikation der nötigen Bedingungen	34
5	Ergebnisse der Interviews.....	35
5.1	Nennung der identifizierten Faktoren	35
5.1.1	Einsatz anderer NET.....	35
5.2	Zukunft der DAC-Technologie.....	35
5.3	Weitere Erkenntnisse und Einflüsse auf DAC.....	36
5.3.1	Dringlichkeit.....	36
5.3.2	Globaler Preis, um CO ₂ im Boden zu halten.....	37
5.3.3	Transportinfrastruktur.....	37
5.4	Bewertung der in Kapitel 4.3.3 aufgeführten Bedingungen	38

6	Diskussion	39
6.1	Diskussion der Ergebnisse zur Beantwortung der Teilfrage a)	39
6.1.1	Anpassung der identifizierten Faktoren.....	39
6.1.2	Kosten pro, mittels DAC, gefangene Tonne CO ₂	41
6.1.3	Unterschiedliche Beteiligung einzelner Länder	42
6.1.4	Veränderung der Forschung mit der Zeit	44
6.2	Diskussion der Ergebnisse zur Beantwortung der Teilfrage b)	44
6.2.1	Einsatz Zeitpunkt der DAC-Anlagen	44
6.2.2	Wie sich DAC durchsetzen wird	45
6.2.3	Validierung und Anpassung der Ergebnisse aus Kapitel 4.3.3.....	45
7	Schlussfolgerung	48
7.1	Kritische Reflexion und weiterführende Forschung	49
8	Literaturverzeichnis	51
9	Anhang	56
9.1	Finaler Pool der Literaturrecherche	56
9.2	Beispiel der Inputs und Outputs des IMAGE IAMs.....	59
9.3	Priorisierung der Quantitativen Ergebnisse der Literaturrecherche	60
9.4	Interview Leitfaden.....	61
9.5	Codes für Codierung der Transkripte	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Zyklen von High Temperature aqueous solution cycle Systemen (Fasihi et al., 2019).....	8
Abbildung 2 Zyklus von Temperature Swing und Moisture Swing Systemen (Fasihi et al., 2019).....	9
Abbildung 3 Sherwoods Rule (Vitali, 2016, S. 6).....	24
Abbildung 4 Quantitative Ergebnisse der Literaturrecherche. Hierbei steht 2 für eine Erwähnung als Hauptfaktor, 1 für eine Erwähnung als Nebenfaktor und 0 dafür, dass es nicht erwähnt wurde.	30
Abbildung 5 Punktediagramm der Faktoren aufgrund der Summe der Punkte und ihrer Häufigkeit. Für Hintergrundinformationen siehe Anhang 9.3	31
Abbildung 6 Kostenprognosen von Studien aus dem Finalen Pool	41
Abbildung 7 Anteil einzelner Regionen/Länder an der mit DAC gefangenen Menge CO2 (Marcucci et al., 2017).....	43
Abbildung 8 Inputs und Outputs des IMAGE IAM (Evans & Hausfather, 2018)	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Schlagwörter und Anzahl Treffer	14
Tabelle 2 Interviewpartner	17
Tabelle 3 Die fünf, als am wichtigsten identifizierten Faktoren	32
Tabelle 4 Quantitative Bewertungen durch die Interviewpartner auf die Frage wie Sie diese Treiber nach Relevanz bewerten würden (1-5).	38
Tabelle 5 Finaler Pool der Literaturrecherche	58
Tabelle 6 Quantitative Ergebnisse der Literaturrecherche und Priorisierung	60
Tabelle 7 Interview Leitfaden.....	61
Tabelle 8 Ergebnisse der Literaturrecherche für Interviews aufbereitet	62
Tabelle 9 Codes aus MAXQDA zur Kodierung der Interviews.....	63

Abkürzungsverzeichnis

DAC	Direct Air Capture
DACCS	Direct Air Carbon Capture and Storage
DACCU	Direct Air Carbon Capture and Utilisation
PCC	Post Combustion Capture
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage
MSA	Moisture Swing adsorption
TSA	Temperature Swing adsorption
EOR	Enhanced oil recovery
CDR	Carbon Dioxide Removal
NET	Negative Emission Technology
R&D	Research and Development
mmol	Milimol
ppm	parts per million
EUP	Europa
RUS	Russland
MEA	Mittlerer Osten und Afrika
IND	Indien
CHI	China
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
CANZ	Kanada
ROW	Rest der Welt
BAFU	Bundesamt für Umwelt
R&D	Research and Development

1 Einleitung

Der zu hohe Ausstoss an CO₂ und der, unter anderem, daraus resultierende Klimawandel sind allgegenwärtig in den Medien. Seit Beginn der industriellen Revolution stieg die Nutzung von fossilen Brennstoffen, wie Kohle oder Erdöl, weltweit stark an (Loesche, 2018). Zudem begünstigen Faktoren, wie eine ausgebaute Viehzucht und die Abholzung von Wäldern, weltweit den Klimawandel (European Commission, n.d.).

Um zu verstehen, wieso es so wichtig ist, eben diese CO₂-Konzentration in der Luft zu verringern, werden folgend ein paar grundlegende Fakten zu dem Treibhausgas CO₂ aufgeführt. Es ist zwar nicht der alleinige Verursacher der Klimaerwärmung, aber von allen Treibhausgasen, welche die Erderwärmung fördern, macht CO₂ 66.1% aus (Umwelt Bundesamt, 2020). Und obwohl CO₂ nur zu 0.04 Volumenprozent in der Atmosphäre vorkommt, haben Wissenschaftler errechnet, dass eine Verdoppelung der CO₂-Konzentration zu einem exponentiellen Temperaturanstieg von 4.5°C führt (Tertilt, 2018). Dies resultiert daraus, da der natürliche Treibhauseffekt zu einem grossen Teil durch Wasserdampf, also Wolken, entsteht. Die Menge an Wasserdampf wird durch die Temperatur der Luft bestimmt. Je wärmer, desto mehr Wolken und desto höher der natürliche Treibhauseffekt. Die Temperatur wiederum wird durch mehr CO₂ in der Luft erhöht (Tertilt, 2018). Daher ist der Anstieg von 280 ppm CO₂ in der Luft während der vorindustriellen Zeit auf 411 ppm im Jahre 2019 so bedenklich (Umwelt Bundesamt, 2020).

Um eben diesen Anstieg an CO₂ in unserer Luft zu verringern, wurden schon frühzeitig erste Massnahmen getroffen. Schon 1979 gab es die erste Klimakonferenz in Genf. Daraufhin folgten Treffen in Toronto und Rio De Janeiro. Anlässlich dieser Treffen erklärten sich teilnehmende Staaten freiwillig dazu bereit, ihren CO₂-Ausstoss zu verringern und wieder Werte früherer Jahre zu erreichen (Greenpeace, 2019). Als nach Jahren das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in einem Bericht aufzeigte, dass bisherige Bemühungen nicht ausreichten (Houghton et al., 1995), kam 1997 mit dem Kyoto-Protokoll das erste verbindliche Abkommen zur Sprache. In Kraft trat es allerdings erst 2005. Zu diesem Zeitpunkt lehnten die USA eine Teilnahme ab. Erst 2015 gab es einen weiteren Durchbruch mit dem Pariser Klimaabkommen, bei dem alle grossen Emittenten wie die USA, die EU und China dabei sind. Bei diesem Abkommen einigten sich die Staaten darauf, bis 2050 die Erderwärmung weltweit auf weit unter 2°C, mit Bemühungen sie auf 1.5°C, zu beschränken (UNFCCC, 2015).

Um die Ziele des Pariser Klimaabkommens zu erreichen, setzen die Staaten auf verschiedene Methoden. Zum einen gibt es die Möglichkeit, den Ausstoss von CO₂ aktiv zu verringern, indem z.B. von Kohle- auf Solar-Energie umgestiegen wird. Des Weiteren besteht mit einem Emissionshandelssystem, wie dem der EU, die Möglichkeit, dass CO₂-Emittenten Zertifikate kaufen müssen, welche sie berechtigen, eine Tonne CO₂ in einem bestimmten Zeitraum auszustossen (Bundesministerium für Umwelt, 2020). Eine dritte Möglichkeit ist, CO₂, welches ausgestossen wird, daran zu hindern, in die Luft zu gelangen. Die letzte Möglichkeit ist, es im Nachhinein wieder aus der Luft zu filtern.

Letztere Vorgehensweise wird in der Literatur häufig als Carbon Dioxide Removal (CDR) beschrieben. Da Methoden, welche unter CDR fallen, negative Emissionen ermöglichen, werden sie aber ebenso häufig als Negative Emission Technologies (NET) bezeichnet.

Eine dieser Methoden ist Direct Air Capture mit seinen Subsystemen Direct Air Carbon Capture and Utilisation und Direct Air Carbon Capture and Storage. Ein DAC-System, um negative Emissionen zu erreichen, wurde erstmals 1999 von dem deutschen Wissenschaftler Lackner erwähnt (Lackner et al., 1999). Ab 2010 gewann DAC dann rapide an Bekanntheit, und so wurde auch die Forschung vorangetrieben. 2017 wurde die erste kommerzielle DAC-Anlage vom Schweizer Unternehmen Climeworks in Betrieb genommen (Climeworks, 2020a). Danach kamen die zwei Unternehmen Carbon Engineering, tätig in Kanada, und Global Thermostat, tätig in den USA, mit eigenen DAC-Anlagen auf den Markt.

Bis jetzt ist die Technologie aber immer noch sehr jung mit nur wenigen Anlagen sowie keiner ausgereiften Infrastruktur zur allfälligen Speicherung des CO₂. Zudem ist der Preis für die Entfernung einer Tonne CO₂ aus der Luft mit DAC-Systemen, zumindest zum jetzigen Zeitpunkt, noch um ein Vielfaches teurer als andere Methoden. Wie sich die Technologie in Zukunft entwickeln wird, ist mit grosser Unsicherheit verbunden. So gab z.B. das Joint Research Center der Europäischen Union verschiedene Prognosen zur Preisentwicklung ab, um eine Tonne CO₂ aus der Luft zu entfernen. Diese wurden zusammengefasst und ergaben ein Spektrum von 80 Euro bis 1000 Euro (JRC - European Commission, 2019). Zudem beziehen sich viele Prognosen für DAC-Systeme auf einen langen Zeithorizont von Mitte bis Ende dieses Jahrhunderts. Je länger der Zeithorizont gewählt wird, desto spekulativer werden die Prognosen. Da die CO₂-Reduktion eine

dringliche Angelegenheit ist, konzentriert sich diese Arbeit auf einen mittelfristigen Zeithorizont. Es gilt, mit Hilfe einer systematischen Literaturrecherche, die von der Wissenschaft als am wichtigsten angesehenen Faktoren zu identifizieren. So kann festgestellt werden, auf was in naher bis mittelfristiger Zukunft wertgelegt werden muss, damit DAC einen relevanten Beitrag leisten kann.

2 Hintergrund

2.1 Begriffsdefinition

2.1.1 Integrated Assessment Model

Im Verlaufe dieser Arbeit wird immer wieder von Integrated Assessment Models (IAM) gesprochen. Aus diesem Grund werden sie hier kurz näher erklärt.

Integrated Assessment Models helfen, je nach Programmierung, Auswirkungen unserer Gesellschaft auf die Natur und umgekehrt besser zu verstehen. Heutzutage werden viele dieser komplexen IAMs genutzt, um herauszufinden, wie und ob wir die Pariser Klimaziele von 2°C oder 1.5°C erreichen können. Mit deren Ergebnissen können sogenannte Pathways generiert werden, also Entwicklungspfade, welche zu einem bestimmten Ziel führen. Dazu werden viele verschiedene Input-Faktoren wie das BIP der Länder, das Verhalten der Bevölkerung, Klimaveränderungen, Energiesysteme einzelner Länder, Gesetzgebungen und viele mehr genutzt (Evans & Hausfather, 2018). Für weitere Informationen siehe Anhang 9.2. Diese Inputs sind alle miteinander mittels Formeln und Programm-Codes verbunden, womit die IAMs weitreichende Zusammenhänge errechnen können. So sind sie imstande, dem Forscher komplexe Zusammenhänge in einer übersichtlichen Form zu präsentieren (Evans & Hausfather, 2018). Dies führt aber auch dazu, dass sich Forscher zuvor genau überlegen müssen, wie sie die Input-Daten berechnen und wie das IAM diese verarbeitet. Daher sollte nach einer Durchführung eines IAMs immer noch eine Sensitivitätsanalyse der einzelnen Inputs gemacht werden, um zu sehen, wie das IAM auf eine Veränderung eben dieser reagiert. So kann verhindert werden, dass die Ergebnisse des IAM zu stark von der Wahl der Inputs des Forschers abhängen.

2.1.2 Negative Emission Technologies

Dies sind Technologien, welche es ermöglichen, mehr CO₂ aus der Luft zu absorbieren, als sie selbst beim Betrieb ausstossen und das CO₂ danach permanent im Erdboden, im geologischen Untergrund oder im Meer speichern (BAFU, 2020). Somit können nicht nur zukünftige Emissionen gemindert, sondern auch historische rückgängig gemacht werden. Die verschiedenen Methoden werden folgend näher beschrieben.

2.2 Klimaziele des Pariser Klimaabkommens

Die Ziele des Pariser Klimaabkommens sind zwei verschiedene Temperaturen, um welche das globale Klima, im Vergleich zu vorindustriellen Werten, bis 2100 maximal ansteigen sollte. Der Temperaturanstieg soll weit unter 2°C gehalten werden mit Anstrengungen, ihn auf 1.5°C zu begrenzen (UNFCCC, 2015). In der Literatur wird häufig von drei verschiedenen Zielen gesprochen. Dem 2°C-Ziel, mit einer 50%-Wahrscheinlichkeit darunter zu bleiben (2_{50}), dem 2°C-Ziel, mit einer 66%-Wahrscheinlichkeit darunter zu bleiben (2_{66}) und dem 1.5°C-Ziel, mit einer 50%-Wahrscheinlichkeit darunter zu bleiben (1.5_{50}). Diese Prozentzahlen werden genutzt, um damit die jeweiligen CO₂-Budgets zu berechnen. Diese definieren, wie viel CO₂ von 2020 bis 2100 noch ausgestossen werden darf, wenn keine NETs eingesetzt werden. Für das 2_{50} -Ziel besteht laut Marcucci et al. (2017) ein CO₂-Budget von 1300 Gt CO₂ und für das 2_{66} -Ziel ein Budget von 1000 Gt CO₂. Für das 1.5_{50} -Ziel ist laut IPCC ein Budget von 580 Gt CO₂ vorhanden (Rogelj et al., 2018).

2.3 Abgrenzung des Forschungsgegenstandes

Als erstes wird geklärt, auf welche Technologien in dieser Arbeit eingegangen wird. Denn neben DAC-Systemen gibt es noch weitere Systeme mit dem gleichen Ansatz, CO₂ aus der Luft zu filtern. Im Allgemeinen werden diese Carbon Dioxide Removal (CDR)- Systeme genannt. Zudem gibt es noch die Möglichkeit CO₂ direkt aus Abgasen zu filtern.

2.3.1 Negative Emission Technologies

Die natürlichste Methode, CO₂ aus der Luft zu filtern und zu speichern, ist eine Aufforstung von Wäldern weltweit. Hierbei wird das CO₂ von den Bäumen absorbiert und in Biomasse sowie Erde gespeichert (myclimate, 2020). Diese Methode ist zwar kostengünstig, da keine Technologien entwickelt und Anlagen gebaut werden müssen, hat allerdings auch ihre Nachteile. Der grösste davon ist der enorme Flächenbedarf (climate engineering, n.d.).

Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS) Systeme verbinden das biologische und technologische Filtern von CO₂ aus der Luft. Es werden entweder extra schnell wachsende Pflanzen angebaut, welche in kurzer Zeit viel Biomasse liefern, oder aber Biomasse von Totholz, Kläranlagen o.ä. genutzt. Ziel ist es, dass diese Pflanzen möglichst viel CO₂ in ihrer Biomasse speichern, sodass sie danach kontrolliert in einem Biomasse-Kraftwerk verbrannt werden können. Das dadurch freigesetzte CO₂ kann daraufhin sofort

wieder mit CCS gefiltert und permanent im Boden gespeichert werden (Hanssen et al., 2020). Ein Vorteil ist, dass mit dem Verbrennen der Biomasse Energie produziert wird. Die Nachteile sind jedoch auch hier der immense Flächenbedarf sowie der grosse Verbrauch von Wasser und das eventuelle Einsetzen von Dünger (Hanssen et al., 2020).

Die andere Möglichkeit zur CO₂-Reduktion sind Direct Air Capture Systeme. Hierbei wird mit eigens dafür konzipierten Anlagen CO₂ direkt aus der Umgebungsluft gefiltert. Zwar hat dieses Verfahren eine geringe Effizienz, da die Konzentration an CO₂ in der Umgebungsluft tief ist, jedoch kann damit CO₂, unabhängig davon, von was es ausgestossen wurde, aus der Luft gefiltert werden (Climeworks, 2020b). Bei dieser Methode gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie mit dem CO₂ verfahren wird, nachdem es aus der Luft gefiltert wurde. Es gibt die Möglichkeit das CO₂ unter der Erde zu speichern oder es zu wieder zu verwenden, damit ist DAC aber keine NET.

Falls das Ziel der DAC-Anlage negative Emissionen sein soll, wird es Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) genannt. Hierbei wird das extrahierte CO₂ unter die Erde transportiert, um dort permanent gespeichert zu werden. Dafür gibt es verschiedene Optionen wie z.B. poröses Gestein, mit welchem das CO₂ reagiert und so im Gestein verbleibt (Climeworks, 2020b).

Des Weiteren gibt es noch die Ozeandüngung, bei welcher mit verschiedenen Mineralien die CO₂-Aufnahme von Algen erhöht wird, welche dieses in der Pflanze oder im Meeresgrund speichern (BAFU, 2020).

Als weitere Methode gibt es die Möglichkeit, die Verwitterung von Mineralien durch Zerkleinerung zu beschleunigen. Dabei wird CO₂ chemisch gebunden. Diese Produkte können daraufhin im Erdboden oder im Meer gespeichert werden (BAFU, 2020).

2.3.2 CO₂ Capture Systeme

Wie zuvor erwähnt kann DAC auch für Direct Air Carbon Capture and Utilisation (DACCU) verwendet werden, um Produktionsprozesse oder Produkte CO₂-neutral zu machen. So kann CO₂ z.B. genutzt werden, um Komponenten in einem Produktionsprozess voneinander zu trennen, um Anlagen zu reinigen, und um Stoffe zu imprägnieren (Weidner & Pollak, 2015). Des Weiteren wird es von der Öl-Industrie verwendet, um mit Enhanced Oil Recovery Ölvorkommen weiter auszuschöpfen (Melzer, 2012). Ausserdem wird als Beispiel oft ein Power-to-Fuel-System genannt. Dabei wird das von der DAC-Anlage gesammelte CO₂ an ein Power-to-Fuel-System weitergeleitet, wo dieses dann

mittels Strom und Wasserstoff zu synthetischem Treibstoff weiterverarbeitet wird, welcher dadurch CO₂-neutral wird, da bei gebrauch kein zusätzliches CO₂ aus der Erde in Umlauf gerät (Köllner, 2021). Eine andere Möglichkeit, das CO₂ zu verwenden, ist Carbon Enrichment for plant Stimulation. Hierbei werden Pflanzen mit dem CO₂ angereichert, welches von diesen gespeichert wird und dadurch zu einem schnelleren Wachstum führt. Mit dieser Methode könnte also gleichzeitig die Nahrungsproduktion effizienter gestaltet werden (Bao et al., 2018). Wichtig zu erwähnen ist, dass mit DACCU keine negativen Emissionen geschaffen werden können.

Ein System, welches bereits seit langem angewandt wird, ist Post Combustion Capture (PCC). Hier wird das CO₂ direkt nach dem Verbrennen, von z.B. Kohle, im Kraftwerk aus der Abluft gefiltert und anschliessend gespeichert. Dieses Verfahren hat eine hohe Effizienz, da Abgase aus der Industrie eine deutlich höhere CO₂-Konzentration enthalten als sonstige Umgebungsluft. Allerdings wird spezifisch nur der CO₂-Ausstoss dieses Kraftwerks vermindert (Wang et al., 2017) was auch keine negativen Emissionen sondern CO₂-Neutralität darstellt.

Da PCC-Systeme nur keine negativen Emissionen ermöglichen, werden sie, wie die Ozeandüngung oder die beschleunigte Verwitterung, welche ganz andere Prozesse darstellen, nicht in dieser Arbeit inkludiert. BECCS und Aufforstung wird in dieser Arbeit einzig als Konkurrenz zu DAC inkludiert aber nicht weiter untersucht. Der Fokus liegt auf den noch jungen DAC-Systemen.

2.4 Bestehende DAC-Methoden

Im Allgemeinen gibt es drei verschiedene Methoden, wie eine DAC-Anlage funktionieren kann. Die High-Temperature-aqueous-solution-Methode, die Temperature-Swing-Methode und die Moisture-Swing-Methode (Caskie, 2020). Die genauere Funktionsweise dieser Methoden wird nachfolgend beschrieben.

2.4.1 High Temperature aqueous solution System (HT)

Dieses System ist in zwei gleichzeitig ablaufende Zyklen aufgeteilt, wie ersichtlich in Abbildung 1. Im ersten Zyklus erfolgt eine Absorption des CO_2 aus der Luft. Hier wird Umgebungsluft mit Hilfe von Ventilatoren in den Air-Contactor gesaugt. Dort trifft die CO_2 -reiche Luft auf eine flüssig gesprayte Lösung. Zum jetzigen Zeitpunkt wird hier meistens Natrium-Hydroxid verwendet. Das CO_2 reagiert daraufhin mit der Lösung und bleibt daran hängen, während die restliche, nun CO_2 -arme, Luft wieder aus der Anlage geleitet wird (Fasihi et al., 2019). Nun beginnt der zweite Zyklus. Hier findet die Regeneration der Natrium-Hydroxid-Lösung statt. Im Causticiser, welcher eine Lauge aus Calciumhydroxid enthält, wird das CO_2 vom Natrium-Hydroxid gelöst und Kalziumkarbonat entsteht. Daraufhin wird das regenerierte Natrium-Hydroxid zurück in den Air-Contactor geleitet (Fasihi et al., 2019).

Anschliessend folgt die Aktion, welche die meiste Energie benötigt. Im Calciner wird das Kalziumkarbonat auf 900°C erhitzt, um dann das reine CO_2 ableiten zu können. Als letzter Schritt wird das Kalziumoxid mit Wasser regeneriert und wieder in den Causticiser gelenkt (Fasihi et al., 2019). Bei dieser Methode fallen in der Regel höhere Energiekosten an, da keine Abwärme genutzt werden kann und somit ein hoher Energiebedarf besteht, um die 900°C zu erreichen.

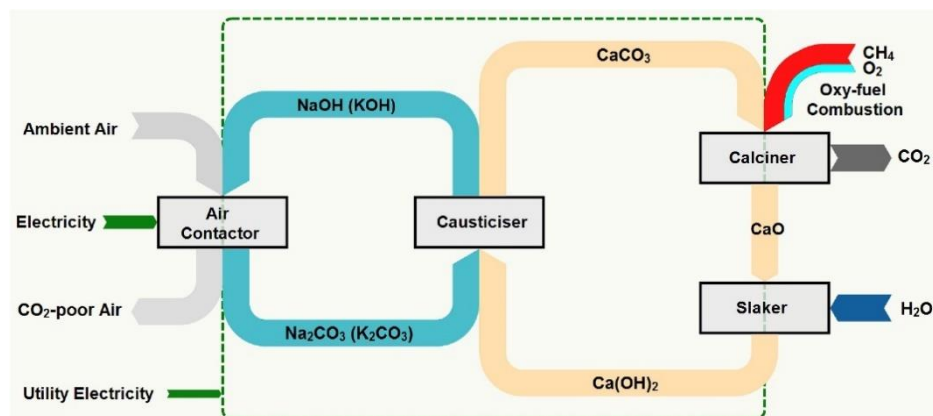


Abbildung 1 Zyklen von High Temperature aqueous solution cycle Systemen (Fasihi et al., 2019)

2.4.2 Temperature-Swing- (TSA) und Moisture-Swing- (MSA) Systeme

Diese Systeme werden auch als Low-Temperatur-Systeme (LT) bezeichnet. Wie in Abbildung 2 zu sehen, bestehen diese Systeme aus nur einer Einheit. Blau zeigt die Phase, während der das System für die Luftzirkulation offen ist und aktiv CO_2 aus der Luft absorbiert. Rot zeigt, dass das System geschlossen ist und die Regeneration stattfindet. Der grosse Unterschied zu HT-Systemen besteht darin, dass das Filtermaterial, auch Sorptionsmittel genannt, hier nicht eine flüssige Lösung, sondern ein fester Stoff ist. Wenn das System läuft, wird Luft mit Hilfe von Ventilatoren angesaugt und durch die Einheit gelenkt. Dabei bleibt das CO_2 aufgrund einer chemischen Reaktion am Filter hängen, und die CO_2 -arme Luft verlässt die Einheit wieder (Fasihi et al., 2019). Sobald das Absorptionsmittel vollständig gesättigt ist, wird die Einheit für die Regeneration geschlossen und überschüssige Luft durch erhöhten Druck aus dem System entfernt. Anders als bei dem High-Temperature-aqueous-solution-System werden in der Literatur viele verschiedene Mittel als Filter vorgeschlagen. Hier unterscheiden sich nun auch Temperature-Swing- und Moisture-Swing-Systeme, wenn auch nur geringfügig. Bei TSA-Systemen wird die Einheit nun, je nach Filter, auf eine gewisse Temperatur erhitzt, wodurch das gebundene CO_2 gelöst wird und abtransportiert werden kann. Vorteil gegenüber der HT-Methode ist, dass eine sehr viel tiefere Temperatur benötigt wird. Je nach Filtermaterial um die 80°C bis 100°C (Fasihi et al., 2019). Daraufhin muss die Einheit abkühlen, bevor sie wieder geöffnet werden kann, um einen weiteren Zyklus zu starten. Bei MSA-Systemen besteht der einzige Unterschied darin, dass zum Lösen des CO_2 vom Filter zusätzlich zur Hitze auch noch Feuchtigkeit benutzt wird. Meistens heisser Dampf. Der Vorteil dabei ist, dass durch die geringe Hitze, je nach Verfügbarkeit, Abwärme von anderen Kraftwerken oder Industrien genutzt werden kann.

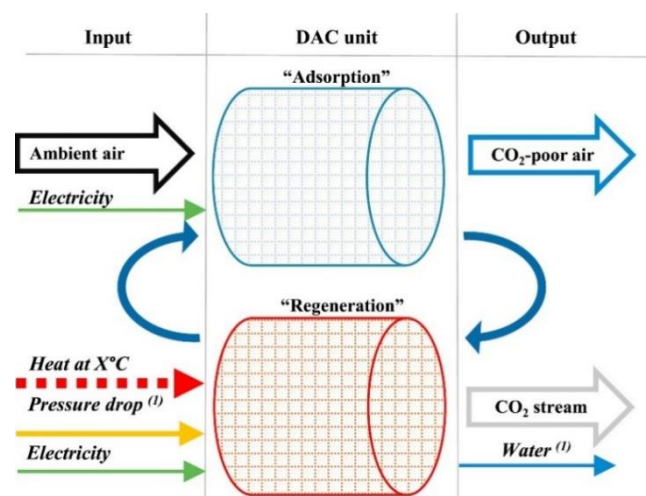


Abbildung 2 Zyklus von Temperature Swing und Moisture Swing Systemen (Fasihi et al., 2019)

2.4.3 Vorteile der DAC-Systeme gegenüber alternativen CDR-Optionen

Aufgrund des ambitionierten Ziels des Pariser Klimaabkommens ist sich die Wissenschaft einig, dass es Negativ Emissions Technologien (NET) braucht. Dazu wurden schon etliche IAMs durchgeführt, bei welchen festgestellt wurde, dass NETs essenziell wichtig sind, um das Ziel einer Erderwärmung von unter 2°C einzuhalten (Azar et al., 2010). DAC bietet dabei diverse Vorteile gegenüber anderen NETs.

Bisher wurden vor allem Aufforstung und BECCS als Lösung gesehen. Das Problem bei beiden ist allerdings die Menge an Land, welche benötigt wird, um die Biomasse oder Bäume zu pflanzen sowie das Wasser, welches von diesen konsumiert wird. Laut einer Studie, welche mit einem IAM mögliche Pathways zur CO₂-Reduktion mittels BECCS untersucht hat, steigt der weltweite Landgebrauch zum Anpflanzen der Bioenergie-Pflanzen und zum Aufforsten auf 11%. Am Ende dieses Jahrhunderts werden so 18% der weltweiten Fläche für BECCS und Aufforstung benötigt. Dies entspricht 26 Millionen km² (Realmonte, 2018, S.90), was 1,5 mal Russlands Fläche ist (CIA, 2021). Damit konkurriert BECCS sowie Aufforstung direkt mit der weltweiten Nahrungsproduktion. Wenn hingegen nur auf DAC gesetzt wird, muss weltweit nur 0,05% der vorhandenen Fläche genutzt werden. Dies hat allerdings Auswirkungen auf die Kosten der CO₂-Reduktion, da DAC immer noch die teuerste Variante ist. Mit einer Kombination aus DAC und BECCS kann die benötigte Fläche auf 9% reduziert, und die Kosten gesenkt werden (Realmonte, 2018).

Das Gleiche gilt für den Wasserverbrauch. Zwar benötigt auch DAC, vor allem die HT-aqueous-solution-Variante Wasser, jedoch um ein Vielfaches weniger als BECCS und Aufforstung. Wenn DAC zusammen mit BECCS und Aufforstung benutzt wird, kann der Wasserverbrauch um 5% beim 2°C-Ziel und um 15% beim 1.5°C-Ziel reduziert werden (Realmonte, 2018, S.90).

Des Weiteren bietet DAC den Vorteil, dass nicht wie bei PCC nur von einem Kraftwerk oder einer industriellen Anlage Emissionen abgefangen werden, sondern dass jegliche Emissionen, welche in die Luft gelangen, reduziert werden können. So z.B. verteilte oder mobile Emissionsquellen wie Individualverkehr, Aviatik oder private Haushalte, welche über 50% der globalen Emissionen ausmachen (Zeman, 2014).

Durch die Menge an CO₂, die durch einen massiven Einsatz von DAC in relativ kurzer Zeit gefangen werden kann, verringert DAC die Dringlichkeit der Reduktion des CO₂ in

der Luft. In verschiedenen IAMs, wie dem WITCH-, dem IMAGE- und dem TIAM-Modell, wurden solche Szenarien schon errechnet (Realmonte, 2018; Vitali, 2016). Da jedes dieser Modelle die DAC-Technologie als eine Backstop-Technologie sieht und sie somit massiv in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts einsetzt, ermöglicht es in der ersten Hälfte eine erhöhte Nutzung von fossilen Brennstoffen. Dies bringt gleich mehrere Vorteile mit sich.

Zum einen führt eine langsamere Veränderung des Stromnetzes zu einem wesentlich kleineren Rückgang des weltweiten BIPs, da länger günstige fossile Energie benutzt werden kann. Damit einhergehend hat sich auch herausgestellt, dass Energy-Exporting-Countries (EEX) bei einem Einsatz von DAC sehr viel mehr zur CO₂-Reduktion beitragen. Dies, da sie in einem Szenario ohne DAC die grössten Verlierer bezüglich des BIPs wären. So können sie weiterhin Öl, Gas und Kohle exportieren (Chen & Tavoni, 2013). Auf die mit diesen Vorteilen einhergehenden Risiken, wird im Verlaufe dieser Arbeit noch weiter eingegangen.

Zum anderen können mehrere DAC-Anlagen in einem nahen Umfeld zueinander aufgebaut werden, da die Luft ständig auf natürliche Art durchmischt und verteilt wird. Somit besteht keine Gefahr, dass sich um die Anlagen CO₂-arme Luft ansammelt (Goepfert et al., 2012).

2.5 Forschungsfrage

DAC könnte zwar, wie gezeigt, mit vielen Vorteilen zur Reduzierung der CO₂-Konzentration in der Luft beitragen, diese Methode ist allerdings immer noch jung und mit vielen Unsicherheiten behaftet. Zudem konzentrieren sich viele Studien auf die ferne Zukunft. Daher wird diese Arbeit mit folgender Forschungsfrage aufzeigen, durch was die Zukunft der DAC Technologie beeinflusst wird und welche Bedingungen in naher bis mittelfristiger Zukunft bestehen müssen, damit sie einen relevanten Beitrag leisten kann:

Wie und unter welchen Bedingungen kann DAC mittelfristig einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion der CO₂-Konzentration in der Luft leisten?

Dazu werden folgende Teilfragen beantwortet:

- a) Welche Faktoren beeinflussen die Zukunft der DAC-Technologie?
- b) Welche Bedingungen müssen in naher bis mittelfristiger Zeit bestehen, damit DAC eine Zukunft hat?

3 Methodik

3.1 Backcasting Approach

Diese Arbeit stellt einen Backcasting Approach dar. Bei herkömmlichem forecasting werden aus heutiger Sicht Schritte ausgearbeitet, um in der Zukunft ein bestimmtes Ziel zu erreichen. Dies kann allerdings problematisch sein, wenn vergangene Trends beeinflussen, was als realistische Strategie für die Zukunft angesehen wird (Holmberg & Robert, 2000).

Ein Backcasting Approach zeichnet sich also dadurch aus, dass von vielen möglichen Zukunftsszenarien ein wünschenswertes Szenario (desirable future) ausgewählt wird. Daraufhin werden Schritte von der Zukunft aus rückwärts bis zum heutigen Zeitpunkt definiert. So werden Pathways entwickelt, welche, losgelöst von vergangenen Trends, zeigen, was passieren muss, um diese Zukunft zu erreichen (Holmberg & Robert, 2000). Laut Holmberg und Robert ist ein Backcasting Approach besonders sinnvoll, wenn:

- dass zu untersuchende Problem komplex ist.
- eine grosse Veränderung benötigt wird.
- dominante Trends Teil des Problems sind.
- das Problem zu einem Grossteil aus Externalitäten besteht.
- der Umfang gross genug und der Zeithorizont lang genug ist, um einen beträchtlichen Spielraum für eine bewusste Entscheidung zu lassen.

Da diese Arbeit untersucht, wie sich eine neuartige Technologie zur Bekämpfung des Klimawandels in Zukunft durchsetzen kann, treffen hier gleich mehrere dieser Kriterien zu. Das Problem ist komplex, da es von vielen verschiedenen Faktoren beeinflusst wird, welche teils auch nur schwer vorherzusagen sind. Zudem bedarf es bei der Lösung des Problems der Klimaerwärmung einer grossen Veränderung, um die Klimaziele von 1.5°C zu erreichen. Ein dominanter Trend, der Teil des Problems ist, ist der rasante und fortwährende Anstieg der CO₂-Konzentration in der Luft (Umwelt Bundesamt, 2020). Ausserdem sind der Umfang und der Zeitraum noch gross genug, damit die Länder bewusste Entscheidungen treffen können, wie sie diese Ziele erreichen wollen.

3.2 Systematische Literaturrecherche

Um die Daten zu sammeln, aufgrund derer die Bedingungen entwickelt werden sollen, wird eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Grund dafür ist, dass das Auswahlverfahren der Literatur nachvollziehbar und durch eine andere Person reproduzierbar ist. Daher wurde das Vorgehen wie folgt festgehalten.

3.2.1 Datenbank

Als Datenbank für die Suche wurde Google Scholar gewählt, da dies eine wissenschaftliche Suchmaschine ist, welche eine grosse, multidisziplinäre Abdeckung von Publikationen hat. Dies, da Google Scholar jegliche Links von Universitäten abrufen sowie Verträge mit Fachdatenbanken und Fachverlagen hat (Weinhold et al., 2011).

3.2.2 Vorgehen bei der Datensammlung

Gesucht wurde nach deutschen und englischen Publikationen. Aus der Fragestellung und den Teilfragen wurden daraufhin verschiedene Schlagwörter abgeleitet, um Studien zu finden, die sich mit diesem Thema befassen.

In der Tabelle 1 sind die unterschiedlichen Schlagwörter und Methoden aufgeführt, welche zu Treffern führten, die nachfolgend für die systematische Literaturrecherche benutzt wurden. Wenn die Suchbegriffe in “ ” stehen, wird nach genau dieser Phrase gesucht.

Da bei den ersten Suchvorgängen ohne ein Attribut gesucht wurde, war die Menge an gefundenen Studien zu gross. Mit der Verwendung des Attributes “allintitle” werden nur Studien, welche die Suchbegriffe im Titel beinhalten, aufgelistet. Dabei wird davon ausgegangen, dass Studien, welche die Suchbegriffe im Titel haben, dieses Thema auch zum Mittelpunkt ihres Inhaltes machen.

Nr.	Suchbegriff	Methode	Anzahl Treffer
1	“Direct Air Capture”	Im Text	4050
2	“Direct Air Capture” AND Future OR Benefits	Im Text	3320
3	“Direct Air Capture” AND Future AND Benefits	Im Text	2870
4	“Direct Air Capture” AND Storage	Im Text	2680
5	“Direct Air Capture”	allintitle	229
6	“Direct Air Carbon Capture”	allintitle	10
7	Direct AND Air AND Carbon AND Capture	allintitle	54

Tabelle 1 Schlagwörter und Anzahl Treffer

Um präzisere Resultate zu erhalten, wurde im fünften Durchlauf mit der genauen Phrase «Direct Air Capture» gesucht. Ausserdem sind auch die Resultate von den Suchverläufen sechs und sieben im finalen Datenpool enthalten. Suchverlauf sechs wurde gemacht, um sicherzustellen, dass auch Studien, welche diesen alternativen Namen für die Technologie benutzen, im Pool enthalten sind. Im siebten Suchverlauf wurden Resultate gesucht, welche alle diese Wörter im Titel enthalten, jedoch nicht in genau der Reihenfolge. Der finale Datenpool besteht somit aus Suchverlauf fünf, sechs und sieben. Insgesamt wurden so 293 Studien gefunden.

3.2.3 Bereinigung der Daten

Mit Hilfe der Software «Harzing’s Publish or Perish» wurden die Suchergebnisse in ein Excel File exportiert. Dabei wurden verschiedene Attribute wie Autoren, Titel, URL-Link, Jahr der Publikation und die Anzahl Zitierungen übernommen. Anschliessend wurde dieser Pool Schritt für Schritt gesichtet. Zuerst wurden Zitierungen, danach Duplikate gelöscht.

3.2.3.1 Erster Filter

Weiter wurden Studien gelöscht, welche, dem Titel nach zu urteilen, von Verfahrenstechnik handeln oder nur physikalische sowie chemische Prozesse des Direct Air Capture untersuchen. Dies, da in dieser Arbeit ein vollumfängliches Bild von Faktoren und Bedingungen geschaffen werden soll, welche die Zukunft von DAC bestimmen.

3.2.3.2 Zweiter Filter

Nun wurden ein weiteres Mal Schlagwörter von den Teilfragen abgeleitet, welche im Titel der Studie vorhanden sein mussten, um nicht aussortiert zu werden. Diese Schlagwörter sind unterhalb aufgelistet. Bei diesem Schritt wurde nicht mehr nach Direct Air Capture gesucht, da dies schon durch den ersten Filter gegeben ist.

- | | |
|----------------|-----------------------|
| 1. Forecast | 10. Role |
| 2. State of... | 11. Rolle |
| 3. Cost | 12. Assessment |
| 4. Kosten | 13. Negative emission |
| 5. Economic | 14. Mitigation |
| 6. Review | 15. Price |
| 7. Scenario | 16. Pricing |
| 8. Pathways | 17. Benefits |
| 9. Policy | |

3.2.3.3 Dritter Filter

Die 44 übrig gebliebenen Studien wurden daraufhin einem Abstract Screening unterzogen. Hier wurde von der quantitativen Methode der genauen Schlagwörter auf eine mehr qualitative Methode gewechselt. Es wurde darauf geachtet, ob das Abstract von Szenarien, Pathways oder spezifischen Vor- oder Nachteilen handelt. Ein weiteres Kriterium war, dass das Abstract in die Zukunft blicken soll. Im finalen Pool befinden sich noch 28 Studien, ersichtlich in Anhang 9.1. Diese werden nun einer Volltextsuche unterzogen, um die verschiedenen Faktoren, welche die Zukunft von DAC beeinflussen, rauszufiltern und zu strukturieren.

3.2.4 Volltextsuche

Bei der Volltextsuche wurde jeweils die ganze Studie nach Aussagen und Ergebnissen durchsucht, welche Faktoren beschreiben, die DAC-Technologien in der Zukunft beeinflussen werden.

3.2.4.1 Framework

Als Framework zur Strukturierung und Analyse der Daten, welche aus der Volltextsuche der gefundenen Literatur entstanden sind, wird das PESTEL- Framework verwendet.

Das Akronym PESTEL steht für Political, Economical, Social, Technological, Environmental und Legal. Dieses Framework wird dazu verwendet, das Makro Umfeld eines

Unternehmens auf den oben genannten Ebenen zu untersuchen. Ziel dabei ist es, zukünftige Chancen und Risiken des Marktes für die Firma zu finden (Schomaker & Sitter, 2020). Damit eignet es sich bestens für diese Arbeit. Gefundene Faktoren können somit in die verschiedenen Ebenen eingeteilt und von dort aus weiter strukturiert werden. Falls Faktoren gefunden werden, welche sich nicht oder nur schlecht einordnen lassen, werden diese in einer Tabelle gesammelt. Daraufhin werden sie auf Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede hin untersucht und strukturiert, um sie auch als Ergebnisse verwenden zu können.

3.2.4.2 Methode der Datenanalyse

Nach erfolgter Volltextsuche wurden die gefundenen Faktoren für jede Studie in das PESTEL Framework eingetragen. Da der gleiche Faktor in verschiedenen Studien immer unterschiedlich genannt wird und z.B. einmal in positiver Form und einmal in negativer Form vorkommen kann, wurde dieser Schritt zwei Mal durchgeführt.

Im ersten Durchgang wurden die gefundenen Faktoren, so wie in der Studie genannt, rausgeschrieben, um einen Überblick über alle, in der ausgewählten Literatur, genannten Faktoren zu bekommen. Danach wurden daraus 14 übergeordnete Faktoren synthetisiert. So konnten im zweiten Durchgang alle Faktoren, unabhängig von ihrer genauen Beschreibung in der Studie, einem dieser 14 Faktoren zugeordnet werden. Dies geschah auf einer quantitativen Ebene. Wenn der Faktor in der Studie als sehr wichtig für die Zukunft von DAC angesehen wird, wurde ihm der Zahlenwert 2 zugeordnet. Wenn der Faktor nur nebensächlich erwähnt wird, ohne weiter darauf einzugehen, wurde ihm der Wert 1 zugeordnet. Wenn er überhaupt nicht erwähnt wird, erhielt er den Wert 0.

Zum Schluss wurden daraus für jeden Faktor zwei Werte berechnet. Einerseits die Summe, womit gezeigt werden kann, welche Faktoren von der Literatur als besonders wichtig angesehen werden, und andererseits die Häufigkeit, mit welcher der Faktor in den Studien erwähnt wird.

3.3 Experten Interviews

3.3.1 Aufbau der Interviews

Interviews können in unzählige Kategorien aufgeteilt werden. In dieser Arbeit werden leitfadengestützte Interviews angewendet. Dabei wurde zu Beginn ein Leitfaden mit bereits formulierten Fragen erstellt. Dieser ist in Anhang 9.4 zu finden. Des Weiteren wurden die Interviews semistrukturiert durchgeführt. Dies bedeutet, dass die Hauptfragen im Vorhinein bestimmt werden, aber während des Interviews, je nach Bedarf, auch weggelassen oder neue Fragen hinzugenommen werden können. Ausserdem kann die Reihenfolge der Fragen variieren (Kohlbrunn & Scheytt, n.d.). Dies ermöglicht einen besseren Gesprächsfluss sowie eine bessere Anpassung an den Interviewpartner, während die Antworten aufgrund derselben Fragen vergleichbar bleiben. Zudem wurden nur Personen, welche Experten auf dem betreffenden Gebiet sind, befragt, was diese Interviews somit zu Experten-Interviews macht.

Um ein mögliches Bias bei den genannten Faktoren zu verhindern, wurde den Interviewpartnern die Frage, welche Faktoren ihrer Meinung nach wichtig für DAC seien, gestellt, bevor ihnen die Ergebnisse dieser Arbeit präsentiert wurden.

3.3.2 Interviewpartner

Nachfolgend sind die Interviewpartner und ihre Positionen in der jeweiligen Organisation aufgelistet.

<i>Identifikationsnummer</i>	<i>Name</i>	<i>Organisation</i>	<i>Position</i>
1	Herr Dr. Lukas Braunreiter	ZHAW	Wissenschaftlicher Mitarbeiter
2	Herr Dr. Gianfranco Guidati	Energy Science Center ETH	Researcher
3	Herr Mag. Kai Landwehr	MyClimate	Pressesprecher
4	Frau Dr. Sophie Wenger	BAFU	Wissenschaftliche Mitarbeiterin

Tabelle 2 Interviewpartner und ihr Hintergrund

3.3.3 Auswertung der Interviews

Im Anschluss daran wurden die geführten Interviews wörtlich transkribiert und aus Gründen der Leserlichkeit teils doppelte oder Füllwörter entfernt. Die Transkripte wurden anschliessend mit dem Programm MAXQDA (MAXQDA, 2021) bearbeitet, um die Ergebnisse zu strukturieren. Dazu wurde jedes Transkript codiert. Als Codes wurden einerseits die in Abbildung 4 aufgeführten Faktoren gewählt, um zu weiteren Erkenntnissen für die Diskussion zu gelangen. Zusätzlich wurden die unten aufgeführten Codes gewählt, um die Antworten der Interviewpartner möglichst vollständig codieren zu können. Eine komplette Übersicht über alle verwendeten Codes und derer Häufigkeit ist in Kapitel 9.5 zu finden.

- **Überschuss nutzen:** Hierunter fallen Textstellen, welche beinhalten, dass man den Fakt nutzt, dass mit DAC das CO₂-Budget überschritten und später trotzdem wieder eingehalten werden kann.
- **Neue Erkenntnisse:** Dieser Code wurde für neue Erkenntnisse genutzt, welche in der Literaturrecherche noch nicht gefunden wurden.
- **Wird gebraucht/nicht gebraucht:** Hier handelt es sich um Aussagen, in welchen spezifisch erwähnt wurde, ob DAC gebraucht oder nicht gebraucht wird.
- **Private Investoren:** Dies bezieht sich auf die präsentierten Ergebnisse der Literaturrecherche, um dazu Meinungen der Experten einzufangen.
- **Preis, um CO₂ im Boden zu halten:** Unter diesen Punkt fallen Aussagen, dass ein globaler Preis bestehen muss, um das CO₂ im Boden zu speichern.
- **Dringlichkeit:** Dies bezeichnet die Dringlichkeit, CO₂ in der Atmosphäre zu verringern, hervorgerufen durch verstärkte Auswirkungen des Klimawandels und somit auch starkem sozialem Druck.
- **Strenge Ziele:** Hierunter fallen alle Aussagen, welche davon handeln, dass DAC immer wichtiger wird, je strenger die Ziele sind.
- **BIP-Verluste mindern:** Dies wurde in manchen IAMs gefunden und auch in Interviews erwähnt, weshalb es als Code aufgenommen wurde.
- **Transport Infrastruktur:** Wurde ebenfalls in mehreren Interviews erwähnt, aber nur sehr spärlich in der Literatur behandelt, weshalb es zuvor nicht als Faktor aufgenommen wurde.

Auf diese Art können die Ergebnisse einerseits übersichtlicher qualitativ ausgewertet werden, da alle relevanten Textpassagen gefunden und zusammengefasst werden können. Andererseits besteht die Möglichkeit, die Codes mit MAXQDA auch quantitativ zu analysieren, da Häufigkeiten oder Zusammenhänge aufgezeigt werden können. Von einer tiefgreifenden quantitativen Analyse wird in dieser Arbeit aber abgesehen, da zu wenig Daten vorhanden sind. Ausserdem wurden die Interviews wörtlich transkribiert, wodurch die Häufigkeit der Codes, z.B. durch Gedankensprünge, an Aussagekraft verliert. Einzig werden allfällige starke Abweichungen vermerkt.

3.4 Unterstützendes Material

Unter untenstehendem Link ist folgendes unterstützendes Material zu finden. Bis Ende 2021 ist der Zugriff auf diese Dateien garantiert.

- PESTEL Analysen der Studien
- Excel Tabelle zur Herleitung des finalen Pools der Literaturrecherche
- Excel Tabelle mit den Quantitativen Ergebnissen der Literaturrecherche

Link: <https://1drv.ms/u/s!AkG7FTAfN8Pz7wFED7wR5J0TuVqo?e=Juwv4n>

4 Ergebnisse der Literaturrecherche

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche präsentiert. Zuerst werden die 14 identifizierten Faktoren qualitativ erläutert und danach in Kapitel 4.2 quantitativ analysiert.

4.1 Qualitative Ergebnisse

Die einzelnen Faktoren wurden der Übersicht halber in Kategorien aufgeteilt. Diese lehnen sich an die PESTEL Analyse an, welche in der Literaturrecherche verwendet wurde.

4.1.1 Politische Faktoren

4.1.1.1 *Unterstützung der Politik*

In der Literatur wurden viele verschiedene Möglichkeiten gefunden, wie die Politik die Zukunft von DAC beeinflussen kann. Sehr oft wurde genannt, dass DAC schon jetzt in Projekten berücksichtigt werden muss, damit mit Subventionen R&D vorangetrieben wird. Den noch grösseren Effekt schreibt die Forschung aber der zukünftigen Gesetzgebung für CO₂ zu. Caskie A. (2020) hat dazu eine umfassende Analyse gemacht und Auswirkungen verschiedener Arten von Gesetzen bewertet. Dies wird nachfolgend zusammengefasst:

Momentan gibt es vier verschiedene Arten von Gesetzgebungen, welche Emissionen behandeln. Aus der Literaturrecherche ging hervor, dass diese Gesetze auf irgendeine Art einen ökonomischen Anreiz zur Nutzung von DAC schaffen sollten, um die, bis jetzt, hohen operationalen Kosten indirekt zu senken.

EU ETS – European Union Emission Trading System

Im europäischen Emissionshandel müssen Unternehmen, welche CO₂ emittieren, mittels Zertifikaten in der Höhe ihres CO₂-Ausstosses dazu berechtigt sein. Jedes Jahr gibt es eine begrenzte Anzahl an Zertifikaten, welche die registrierten Unternehmen kostenlos erhalten. Wenn sie daraufhin weniger ausstossen als sie Zertifikate besitzen, können sie diese weiterverkaufen. Wenn sie allerdings mehr ausstossen, weil sie z.B. nicht über genug Geld verfügen, um ihre Emissionen zu reduzieren, haben sie die Möglichkeit mehr Zertifikate zu kaufen. Das Problem für DAC ist, dass das ETS keine Kompensation von Emissionen vorsieht und es einem Unternehmen somit nichts bringen würde, in DAC zu investieren (Caskie, 2020, S. 89-90).

CfD, Contracts for Difference Gesetze

Differenzkontrakte funktionieren, indem die Regierung dem berechtigten Produzenten von CO₂-neutraler Energie einen im Voraus bestimmten Energiepreis bezahlt, auch wenn der Marktpreis tiefer ist. Falls der Marktpreis den abgemachten Betrag übersteigt, zahlt der Produzent der Regierung die Differenz zurück. Dies hilft direkt neuen Technologien mit hohen Kosten, bessere und sichere Einnahmen zu generieren (EMR, 2020). Wenn DAC-Anlagen mit einer Power-to-Fuel-Anlage verbunden werden können, würden sie auch in diese Kategorie fallen und könnten somit hiervon profitieren (Caskie, 2020, S. 89-90).

CDM, Clean Development Mechanism

Dies ist ein Mechanismus, welcher vom Kyoto Protokoll vorgesehen ist. Es ermöglicht Industriestaaten, mit rechtlich bindenden Klimazielen, sogenannte CER's zu kaufen. Das sind Certified Emission Reduction Credits und belegen, dass Emissionen des Industriestaates kompensiert werden. Mit dem Geld werden Projekte in Entwicklungsländern gefördert, um auch dort CO₂-Emissionen zu reduzieren. Da DAC genau dies ermöglicht, könnte es ebenfalls als ein solches Projekt angesehen und finanziert werden (Caskie, 2020 S. 89-90).

45Q Legislation

Hier handelt es sich um eine Steuerreduktion für jede Tonne gespeichertes CO₂, welche zurzeit in den USA aktiv ist. Somit spricht es direkt DACCS an. Dieses Subsystem der DAC-Methode ist umso mehr auf Unterstützung angewiesen, da hier im Gegensatz zu DACCU kein Ertrag des verkauften CO₂ besteht. Das Problem ist allerdings, dass der steuerliche Rabatt höher sein sollte, als die Kosten zur Speicherung von einer Tonne CO₂. Momentan gibt es aber nur einen Rabatt von \$34/tCO₂ (Beck, 2020), während die Kosten zwischen \$94/tCO₂ und \$232/tCO₂ liegen (Caskie, 2020). Ein weiterer Nachteil dieses Systems ist, dass öffentliche Gelder verwendet werden (Caskie, 2020).

4.1.1.2 Strommix

Der Strommix ist relevant für DAC, da der Energiebedarf dafür sehr hoch ist. So ist sich die Literatur einig, dass DAC den weltweiten Energiebedarf leicht erhöhen wird. Zwei durchgeführte IAMs prognostizieren den totalen Verbrauch auf 6% des weltweiten Energieverbrauchs (Vitali, 2016, S. 43). Wenn die Energie aus nicht CO₂-neutralen Quellen kommt, hier ist sich die Literatur einig, wird die Effizienz der DAC-Anlagen stark verringert. Dies deshalb, weil für jede Tonne gesammeltes CO₂ auch wieder CO₂ für die benötigte Energie ausgestossen wird. Verschiedene Studien schätzen die Höhe, je nach Energiequelle, auf bis zu 0.48 t CO₂, welches pro gefangene Tonne CO₂ wieder ausgestossen wird. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass die Energie für DAC von CO₂-neutralen Energiequellen kommt. Dies sind z.B. Erdgasanlagen mit CCS oder, noch besser, erneuerbare Energien. Des Weiteren kann auch Energie aus BECCS- Anlagen und aus synthetischem Brennstoff, welches mittels DAC-Anlagen aus gefangenem CO₂ produziert wird, verwendet werden. Bei der Benutzung von erneuerbaren Energien hat sich herausgestellt, dass die Effizienz der Anlagen sehr wichtig ist. Dies haben Breyer et al. (2020) in ihrem Report festgehalten. Sie kommen zum Schluss, dass sich die Maghreb Region hervorragend für den Einsatz von DAC-Anlagen, gekoppelt mit Solarenergie, eignet. Auch Windenergie wird rege genutzt, jedoch erwarten sie einen stärkeren Wandel zur Solarenergie hin, durch deren bisherige stärkere positive Kostenentwicklung.

Um eine DAC-Anlage unter Volllast konstant nutzen zu können, bedarf es einer gleichmässigen Energielieferung. Dies bedingt bei unregelmässiger Energieproduktion den Einsatz von Batterien, was wiederum bedeutet, dass zu den Energiekosten auch noch Energie-Speicherkosten hinzukommen.

4.1.1.3 Soziale Akzeptanz

Wie bei jeder breit eingesetzten Technologie spielt auch hier die soziale Akzeptanz eine Rolle. In der Literatur wurden vor allem der Bau von Pipelines zum Transport des CO₂s, Sorgen zur Toxizität der Filtermaterialien, welche mit der Luft in Kontakt kommen, sowie das Entweichen des CO₂s aus den Speichern genannt. Dies sind allerdings nur Vermutungen der Wissenschaft, da bis zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch keine Studien zur sozialen Akzeptanz durchgeführt wurden.

4.1.1.4 Einsatz anderer NET

Damit Ende des Jahrhunderts die 2°C- oder 1.5°C-Ziele des Klimaabkommens erreicht werden können, wurde von vielen verschiedenen IAMs berechnet, wie viel CO₂ pro Jahr eingefangen werden müsste. Chen und Tavoni (2013, S. 65) haben herausgefunden, dass in einem Szenario, in welchem nur DAC eingesetzt wird, 16 Gt CO₂/Jahr absorbiert werden müssten. Wenn allerdings andere Technologien, wie PCC oder ein breiterer Einsatz von BECCS, eingesetzt werden, wird die notwendige Leistung von DAC-Anlagen bis auf 3 Gt CO₂/Jahr reduziert. Dies ist vor allem dem günstigeren Preis pro Tonne CO₂ der anderen Technologien zuzuschreiben.

4.1.1.5 Anzahl an gebauten DAC-Anlagen

Der erste relevante Punkt sind Economies of scale. Dies bedeutet unter anderem, viele Anlagen zu bauen, um von der Lernkurve zu profitieren, Sorptionsmittel in grossen Mengen zu kaufen, um Rabatte zu realisieren sowie Produktionsschritte der DAC-Anlagen zu automatisieren (Realmonte, 2018). Zudem wird DAC ökonomisch attraktiver, je schneller mehr Anlagen gebaut werden. Dies hat auch Vitali M. (2016), nach der Durchführung des WITCH-IAMs, festgestellt. Das WITCH-Modell installierte eine Menge von 27 Gt CO₂/Jahr (Vitali, 2016, S. 40), womit das weltweite BIP um 2.5% weniger sank als ohne DAC (Vitali, 2016, S.53). Wenn nun weniger DAC installiert werden würde, würde auch dieser Effekt kleiner ausfallen.

4.1.2 Ökonomische Faktoren

4.1.2.1 Variable Kosten

Darunter fallen Kosten des Filtermaterials, welche nicht nur die Herstellungskosten betreffen, sondern auch die Zykluszeit, die Zeit bis der Filter gewechselt wurde und wie viel Material pro Tonne CO₂ benötigt wird (Azarabadi & Lackner, 2019). Die Energie-Kosten beinhalten einerseits die Stromkosten, um die Anlage zu betreiben, und andererseits die Kosten für die Wärme, um das Filtermaterial zu regenerieren (Deutz & Bardow, 2020). Ausserdem stellte Zeman F. (2014) fest, dass diffuse Emissionen, also der Verlust von CO₂ aus der Anlage, 30% der Kosten pro Tonne ausmachen. Hinzu kommen die Kosten des CO₂-Transports. Je nach Entfernung zum Speicher oder Ort der Verwendung, werden Schiffe, LKWs oder Pipelines benötigt (Caskie, 2020).

All diese Kosten führen bei DAC-Anlagen momentan zu einem sehr viel höheren Preis pro Tonne gefangenes CO₂, als bei anderen NET, wobei man auch Sherwoods Regel beachten muss. Diese besagt, dass die Kosten für das Extrahieren eines Materials, in diesem Fall CO₂, mit tieferer Konzentration im umgebenden Material, steigen. Daher ist DAC automatisch etwas teurer als PCC (Vitali, 2016, S. 6).

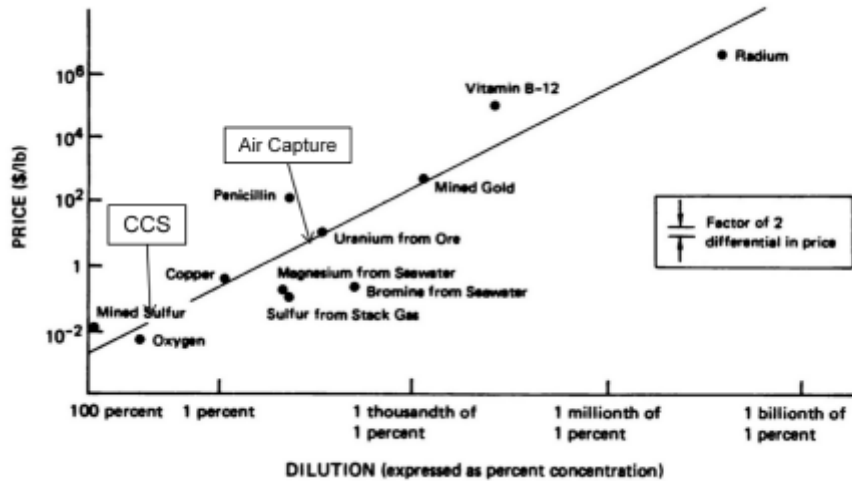


Abbildung 3 Sherwoods Rule (Vitali, 2016, S. 6)

4.1.2.2 Fixkosten der Anlage

Unter Fixkosten fallen:

- **Materialkosten:** Wie Zeman F. (2014) festhielt, hat das Material, welches in den Anlagen benutzt wird, einen grossen Einfluss auf die Kosten pro Tonne CO₂. So können z.B. die Kosten um \$118/tCO₂ gesenkt werden, wenn der Contactor anstelle aus Metall aus Plastik hergestellt wird.
- **Baukosten:** Eine weitere Rolle spielen die Kosten für die Installation der Anlagen. Hier kommt es darauf an, in welchem Land die Anlage gebaut wird (Lohnkosten der Bauarbeiter), ob das CO₂ auf dem Land oder im Meer gespeichert wird und wie zugänglich das Gelände ist.
- **Lohnkosten:** Sie hängen davon ab, wie viele Mitarbeiter eingestellt werden müssen und wie hoch die Lohnkosten im jeweiligen Land sind.
- **Kapitalkosten:** Sie spielen eine wichtige Rolle, da vor allem am Anfang signifikante Investitionen getätigt werden müssen, um die ersten Anlagen zu bauen. Vitali M (2016, S. 29) hat für eine DAC-Anlage mit einer Leistung von einer MtCO₂/Jahr Kapitalkosten von \$185 Millionen pro Jahr berechnet.

4.1.2.3 günstige Energie-/Wärme-Preise

Vielen Studien zeigen, dass der Energieverbrauch und, je nachdem ob die HT- oder die LT-Variante eingesetzt wird, auch der Verbrauch von Thermal-Energie sehr hoch ist. Daher spielt der Preis, zu welchem der benötigte Strom und die benötigte Wärme gewonnen werden kann, eine ebenso grosse Rolle.

Darunter fällt auch die Verfügbarkeit von Abwärme, womit sehr kleine bis keine Kosten für Wärme anfallen würden. Genauso auch die Verfügbarkeit von überschüssiger erneuerbarer Energie. Dies bezieht sich darauf, dass Netzbetreiber oftmals, um das Stromnetz stabil zu halten, absichtlich die Leistung von erneuerbaren Energien einschränken, wenn gerade nicht so viel gebraucht wird (Specht, 2019). Daggash et al. (2018) rechnen damit, dass sich durch den Wandel zu mehr erneuerbaren Energiequellen immer häufiger solche Überproduktionen ansammeln werden. So kann diese Energie günstig für DAC-Anlagen genutzt werden.

4.1.2.4 CO₂ Markt und Preis besteht

Dieser Faktor gliedert sich in zwei Teile. Erstens ging aus der Literatur hervor, dass es wichtig ist, dass ein Markt für CO₂ vorhanden ist und zweitens, dass ein für DAC vorteilhafter CO₂-Preis besteht.

Oft wird genannt, wie bedeutend es ist, dass jetzt schon ein Nischenmarkt für CO₂ von DAC-Anlagen existiert. Des Weiteren wird aber auch gesagt, dass der Markt in Zukunft stark wachsen muss, um genügend CO₂ verarbeiten zu können. Hierfür werden oft verschiedene Power-to-Fuel- oder Power-to-X-Produktionen vorgeschlagen, bei welchen CO₂-neutrales Gas oder Kraftstoff hergestellt wird. Hier gilt es anzumerken, dass auf die benötigte Reinheit geachtet werden muss, da verschiedene Anwendungen wie EOR- oder Microalgen-Produktion sehr viel tiefere Reinheitsgrade als andere Prozesse benötigen. Dies ist insofern wichtig, da ein tieferer Reinheitsgrad des CO₂ mit tieferen Kosten des Filterns einhergeht (Wilcox et al., 2017).

Neben dem Bestehen des Marktes spielt auch der Preis des CO₂s eine wichtige Rolle. Denn mit dem Verkauf des CO₂s können DAC-Anlagen einerseits Umsatz generieren, und andererseits spart man sich so die Kosten, um das CO₂ geologisch zu speichern.

4.1.3 Technologische Faktoren

4.1.3.1 Verfügbarkeit von Abwärme

Dies betrifft vor allem die LT-Variante des DAC, da dafür tiefere Temperaturen benötigt werden, um das CO₂ vom Filter zu lösen. Da es für diesen Prozess bei der HT-Variante 900°C braucht, kommt hierfür keine Abwärme in Frage. Einerseits gibt es keine Industrieprozesse, welche Abwärme in dieser Höhe in genügender Menge bereitstellen. Andererseits muss beim Transfer der Abwärme auch an Thermodynamik gedacht werden. So kommen schon bei einer DAC-Anlage, welche 120°C benötigt, nur industrielle Anlagen mit einer Abwärme von mehr als 140°C in Frage (Realmonte, 2017, S. 53). Darunter fallen z.B. Industrie-Sektoren mit einem hohen Anteil Abwärme. Dies sind z.B. Stahlwerke, Glasmanufakturen, Chemieanlagen sowie Papierwerke. Des Weiteren kann Abwärme auch aus der Energie-Produktion gewonnen werden. Hier sind es Atomkraftwerke oder Solarthermal Energie (Realmonte, 2017, S. 53-54).

DAC ist dabei auf zwei Arten betroffen. Einerseits ermöglicht Abwärme tiefere operationale Kosten, da der Preis niedriger ist, als wenn Wärmepumpen an der DAC-Anlage installiert werden müssten. Andererseits wird die Wahl des Standortes der DAC-Anlagen eingeschränkt, da sie in unmittelbarer Nähe zum Emittenten der Abwärme gebaut werden müssen.

4.1.3.2 Technologische Verbesserungen durch R&D

Research und Development spielt, wie bei jeder noch jungen Technologie, auch für DAC eine grosse Rolle. In der Literatur wird diesem Gebiet sehr grosses Potenzial zugeschrieben, um die Kosten zu reduzieren. Dabei wird immer wieder auf die Preisentwicklung von Wind und Solarenergie hingewiesen. Der Preis von Solaranlagen sank um das Hundertfache, dank dem Effekt der Lernkurve (Lackner, 2015). Dies wird auch von der DAC-Technologie erwartet, da der Effekt der Lernkurve mit der Anzahl gebauter Produkte steigt. Des Weiteren wird von vielen Studien die Relevanz von R&D für neue Filtermaterialien hervorgehoben, was nicht nur heisst, sie günstiger herzustellen, sondern auch, dass sie mehr CO₂ aufnehmen können und einfacher in der Regeneration sind (Azarabadi & Lackner, 2019). Ein weiterer Punkt, der immer wieder hervorgehoben wird, ist, den Energieverbrauch der Anlagen mit weiterem R&D zu senken (Realmonte, 2017, S.72), da dieser zur Zeit immer noch für Diskussionen sorgt.

4.1.3.3 Sorptionsmittel

Es gibt zwei verschiedene Arten von Sorptionsmitteln. Eines, das CO₂ absorbiert und eines, welches es adsorbiert. In der HT-Variante, in welcher eine flüssige Lösung benutzt wird, wird das CO₂ absorbiert und in der LT-Variante, bei welcher das Sorptionsmittel fest ist, wird es adsorbiert. Diese Methoden unterscheiden sich schon einmal stark in der Energie, welche benötigt wird, um das CO₂ wieder vom Filter zu lösen und das Material/die Lösung zu regenerieren.

Ausserdem spielen die Kosten für das Rohmaterial des Sorptionsmittels, sowie dessen Verhalten im Einsatz, eine Rolle. Dies haben Azarabadi und Lackner (2019) genauer untersucht. Zu diesen Charakteristika gehören laut ihrer Studie:

- **Sorptions-Kapazität:** Wie viele mmol CO₂/g Sorptionsmittel aufgenommen werden können, da mit höherer Effizienz weniger Sorptionsmittel benötigt wird und somit die Kosten sinken.
- **Sorptions-Zyklus:** Wie lange ein Zyklus dauert, bis das Mittel mit CO₂ gesättigt ist und wieder regeneriert werden muss. Je kürzer die Dauer, desto öfter kann das Mittel CO₂ binden.
- **Haltbarkeit:** Wie viele Zyklen das Mittel übersteht, bis es nicht mehr zu gebrauchen ist. Bei jedem Zyklus verliert das Mittel durch den Luftstrom sowie durch den Regenerationszyklus etwas seines Materials.
- **Umgang mit Verschmutzungen:** Die Luft kann nur in geringem Masse gefiltert werden. Da bei zu starkem Filtern der Luftstrom zu sehr eingeschränkt wird, muss das Sorptionsmittel gut mit etwas Verunreinigung der Luft umgehen können.
- **Komplexität des Wechsels von neuem Mittel:** Je nach Sorptionsmittel kann es umständlich sein, Neues einzufüllen, da manche Mittel aus zwei Komponenten bestehen, welche vorher noch gemischt werden müssen.

4.1.4 Ökologische Faktoren

4.1.4.1 *Speicherkapazität von CO₂*

Die Speicherkapazität für CO₂ bezieht sich auf das geologische permanente Speichern von CO₂, womit direkte negative Emissionen erzeugt werden. Dafür kommen verschiedene Möglichkeiten in Frage. CO₂ kann, wie es von Climeworks in Island gemacht wird, in porösen Stein geleitet werden, mit dem es chemisch reagiert und selbst zu Feststoff wird (Climeworks, 2020b). Des Weiteren können auch Ölfelder für die Speicherung genutzt werden, indem mit dem CO₂ EOR betrieben wird. Die Speicherkapazität beeinflusst den Einsatz von DAC mit den folgenden Faktoren:

- Globale Kapazität an natürlichen Speichern
- Kosten der Speicherung
- Regionale Verteilung
- Art des CO₂-Transports

Wie unter anderem Vitali M. (2016) mit der Durchführung zweier IAMs zeigte, spielt die Menge an global verfügbaren Speichern eine signifikante Rolle. In einem Szenario mit weniger Speicherkapazität wurden weniger DAC-Anlagen installiert, da weniger Kapazität das Speichern teurer macht und damit DAC ökonomisch unattraktiver wird. Die Kosten für die Speicherung hängen davon ab, wie teuer die Energie in dem jeweiligen Land ist, da das CO₂ zur Speicherung verdichtet werden muss, bevor es in den Boden injiziert wird. Somit spielt es auch eine Rolle, in welchen Ländern wie viel Speicherkapazität vorhanden ist. Ausserdem ist es auch von Bedeutung, wie weit die Speicher von den DAC-Anlagen entfernt sind und wie das CO₂ dorthin transportiert wird. Dafür wurden in der Literatur je nach Distanz Schiffe, LKWs oder Pipelines vorgeschlagen.

4.1.4.2 *Beschaffenheit der Luft*

Da DAC-Anlagen weltweit in verschiedensten Klimazonen eingesetzt werden würden, sind sie auch alle unterschiedlich trockener, feuchter, kalter oder warmer Luft ausgesetzt. Wie Lackner (2015) festhielt, kann keine DAC-Methode genutzt werden, bei welcher die Luft noch aufbereitet werden muss. Die damit verbundene Energie-Kostensteigerung wäre untragbar. Des Weiteren spielt die Verschmutzung der Luft eine Rolle. Hierzu wird ein Filter benötigt, um die Luft zu reinigen. Dies wiederum erhöht den Energiebedarf, da der Luftstrom dadurch vermindert wird und manuell verstärkt werden muss (Broehm et al., 2015).

4.2 Quantitative Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der quantitativen Analyse präsentiert. Dies ist in Abbildung 4 ersichtlich. Durch Zuordnung der Zahlen zu den einzelnen Faktoren kann einerseits mit der Summe aufgezeigt werden, welche Faktoren von der Literatur als am wichtigsten empfunden werden. Andererseits kann mit der Häufigkeit der Nennung des Faktors gezeigt werden, wie oft dem Faktor in der Literatur Beachtung geschenkt wird.

	Fikosten	Einsatz anderer NET	Technologische Verbesserungen durch R&D	Günstige Energie- /Wärme-preise	Sopkonmittel	CO ₂ Markt und Preis besteht	Anzahl an gebauten DAC Anlagen
	2	2	2	0	0	0	1
	1	0	2	1	0	1	1
	1	0	1	1	2	1	1
	1	0	2	2	0	2	1
	1	0	2	0	0	1	1
	1	0	2	0	0	2	1
	1	0	0	0	1	0	1
	2	0	2	0	0	1	0
	2	1	0	1	0	1	2
	2	0	1	1	0	1	0
	1	0	0	2	0	0	0
	0	0	1	2	0	0	2
	1	1	2	2	0	1	2
	1	0	2	1	2	1	2
	2	0	1	0	1	2	2
	1	0	2	0	2	1	1
	1	0	0	0	0	2	1
	2	0	2	2	1	0	1
	1	0	1	2	0	0	1
	1	0	1	2	0	0	1
	2	0	1	1	0	1	1
	2	0	0	0	1	2	0
	1	0	2	1	0	2	1
	1	0	1	0	2	2	1
	2	1	1	2	2	1	1
	2	0	1	2	0	1	1
	1	0	1	2	1	1	1
	1	0	1	2	2	2	1
	1	0	1	2	0	1	1
	1	0	1	2	1	1	1
	37	5	34	29	18	27	28
	26	4	23	18	12	21	23

Studien	Faktoren							
	Speicherkapazität von CO ₂	Beschaffenheit der Luft	Verfügbarkeit von Abwärme	Strommix	Soziale Akzeptanz	Unterstützung der Politik mit CO ₂ Gesetzen	Variable Kosten	
Studie #1	1	0	0	0	0	0	2	
Studie #2	0	0	0	2	0	0	2	
Studie #3	0	2	2	2	0	1	2	
Studie #4	2	2	2	2	0	1	2	
Studie #5	2	0	1	2	0	2	1	
Studie #6	0	0	0	0	0	0	2	
Studie #7	1	1	1	2	1	0	2	
Studie #8	0	0	0	2	0	1	2	
Studie #9	2	0	2	2	0	2	2	
Studie #10	0	1	1	2	0	0	2	
Studie #11	1	0	1	2	0	0	2	
Studie #12	2	0	2	2	0	0	2	
Studie #13	1	0	2	2	1	2	1	
Studie #14	1	0	1	2	0	1	2	
Studie #15	1	0	2	2	1	2	2	
Studie #16	0	0	0	0	0	0	2	
Studie #17	0	0	1	2	0	2	2	
Studie #18	0	0	1	2	0	2	2	
Studie #19	1	0	1	2	0	2	2	
Studie #20	1	0	1	2	1	1	2	
Studie #21	1	0	0	0	0	0	2	
Studie #22	1	0	0	2	0	0	1	
Studie #23	0	0	0	2	0	0	2	
Studie #24	1	0	2	2	0	2	2	
Studie #25	0	0	2	2	2	0	1	
Studie #26	1	0	1	2	2	1	2	
Studie #27	0	0	0	2	0	2	2	
Studie #28	0	0	0	2	0	2	2	
Summe	20	6	26	48	6	30	52	
Häufigkeit	16	4	18	24	5	18	28	

Abbildung 4 Quantitative Ergebnisse der Literaturrecherche. Hierbei steht 2 für eine Erwähnung als Hauptfaktor, 1 für eine Erwähnung als Nebenfaktor und 0 dafür, dass es nicht erwähnt wurde.

4.2.1 Festlegung der wichtigsten Faktoren

Die Summe kann auch als Anhaltspunkt für die Stärke der Auswirkung des Faktors auf die Zukunft von DAC gesehen werden. Wenn ein Faktor in einer Studie als Hauptfaktor genannt wurde, wurde immer auch der starke Impact erwähnt. In Abbildung 5 ist die Verteilung der Faktoren aufgrund ihrer erreichten Punkte zu sehen. Auf der X-Achse ist aufgeführt, in wie vielen der 28 Studien sie erwähnt wurden und auf der Y-Achse, welches die Summe ihrer erhaltenen Punkte ist. Die rote Linie markiert den Median der Häufigkeit und die gelbe Linie den Median der Summe.

Mittels einer Cluster-Analyse wurden vier Cluster identifiziert und daraufhin klassifiziert. Allen Punkten (Faktoren), welche auf beiden Achsen über dem Median liegen, wurde die Priorisierung 1 zugeordnet, da dies mit einem hohen Impact und einer Allgegenwärtigkeit in der Literatur einhergeht. Danach wurden drei weitere Priorisierungsklassen identifiziert. Klasse 2 besteht aus Punkten, welche sich mit einem Wert auf den Medianen befinden oder mit dem anderen darüber. Klasse 3 besteht aus zwei Punkten, welche mit beiden Werten unter den Medianen liegen, aber sich dennoch deutlich von der Klasse 4 unterscheiden.

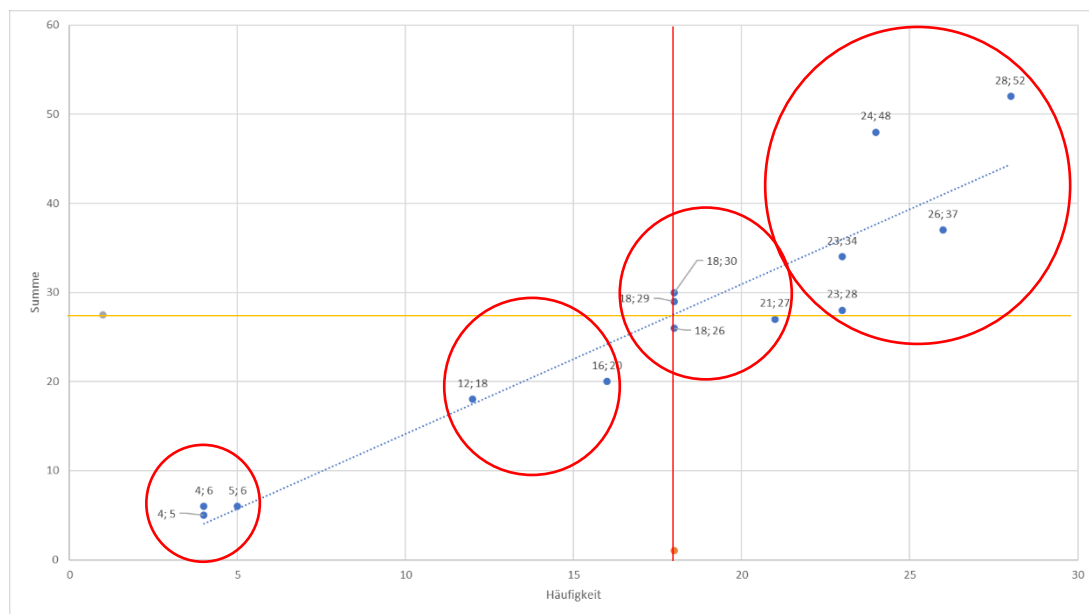


Abbildung 5 Punktediagramm der Faktoren aufgrund der Summe der Punkte und ihrer Häufigkeit. Für Hintergrundinformationen siehe Anhang 9.3

In Tabelle 3 sind die Faktoren der Priorisierungsklasse 1 aufgeführt. Diese werden die grösste Auswirkung haben und sollten somit die Ziele sein, welche zugunsten von DAC verändert werden müssen. Im Anhang 9.3 ist die vollständige Tabelle der Faktoren und ihrer Priorisierungen zu finden.

<i>Faktor</i>	<i>Häufigkeit</i>	<i>Summe</i>	<i>Prio</i>
<i>Strommix</i>	24	48	1
<i>Variable Kosten</i>	28	52	1
<i>Fix Kosten</i>	26	37	1
<i>Technologische Verbesserungen durch R&D</i>	23	34	1
<i>Anzahl an gebauten DAC Anlagen</i>	23	28	1

Tabelle 3 Die fünf, als am wichtigsten identifizierten Faktoren

Um die zweite Teilfrage beantworten zu können, wird nun der Backcasting Approach angewendet. Dabei werden diese Faktoren als desirable future gewählt, und nachfolgend wird geklärt, was in mittelfristiger Zukunft passieren muss, um diese zu erreichen.

4.3 Anwendung des Backcasting-Ansatzes

4.3.1 Bestimmung der desirable futures

Die Literatur ist sich einig, dass DAC frühestens ab 2040 grossflächig eingesetzt wird. Damit dies geschehen kann, muss die Technologie allerdings schon zum jetzigen Zeitpunkt einsatzbereit gemacht werden. Während die in Tabelle 3 aufgeführten Faktoren die Ziele darstellen, welche für einen grossflächigen Einsatz von DAC-Anlagen einen starken Einfluss auf die Machbarkeit haben, sind die Wege dorthin etwas komplexer, wie schon in Kapitel 2.1.1 aufgezeigt wurde. Daher wird nachfolgend dargelegt, durch was die Faktoren der Prio Klasse 1 beeinflusst werden können.

4.3.2 Einflüsse auf desirable futures

4.3.2.1 Strommix

Wie bereits erwähnt, muss sich der Strommix so verändern, dass der Strom möglichst CO2-neutral ist. Dies wird beeinflusst durch:

- **Politik:** Diese kann mit Energiegesetzen festlegen, zu welchem Anteil der Strom aus erneuerbaren Energien oder aus Erdgas mit CCS stammen soll. Des Weiteren kann sie diese Technologien subventionieren.

- **Umweltbewusstsein der Endverbraucher:** Je mehr Endverbraucher grünen Strom verlangen, desto mehr wird die Wirtschaft und Politik dafür tun, um den Strommix grüner zu gestalten.
- **Ökonomische Attraktivität dieser Technologien:** Da vor allem in frühen Entwicklungsstadien erneuerbarer Energien die Kosten oftmals noch höher waren, ist es wichtig, dass diese schnell rentabel werden, damit die Wirtschaft mehr davon nutzt.

4.3.2.2 *Variable Kosten*

Hierbei können die Kosten des **Sorptionsmittels**, der diffusen Emissionen sowie die Energiekosten durch **technologische Verbesserungen** verringert werden, indem günstigere und langlebigere Sorptionsmittel gefunden werden. Auch durch eine bessere Bauweise können diffuse Emissionen verringert und der Energieverbrauch gesenkt werden. Ebenso kann die **Politik** einiges bewirken, indem sie die Energiepreise beeinflusst.

Da die variablen und die fixen Kosten darauf abzielen, die Ausgaben pro gefilterte Tonne CO₂ zu senken, ist hier auch die Möglichkeit, das **CO₂ zu einem guten Preis zu verkaufen**, von Belang, da so indirekt Kosten gemindert werden können.

4.3.2.3 *Fixe Kosten*

Einerseits können die Material- sowie die Baukosten der Anlage durch eine grössere **Anzahl an gebauten DAC-Anlagen** gemindert werden, und andererseits durch **technologische Verbesserungen mittels R&D**, wenn günstigere Materialien gefunden oder effizientere Bauverfahren angewendet werden. Lohnkosten können ebenfalls durch erweitertes R&D verringert werden, indem man mehr Prozesse automatisiert. Auch Kapitalkosten können reduziert werden, indem die **Politik** DAC-Unternehmen finanziell fördert, sodass weniger Kapital für anfängliche Investitionen aufgetrieben werden muss oder zumindest zu besseren Konditionen beschafft werden kann.

4.3.2.4 Technologische Verbesserungen durch R&D

Damit dies geschieht, muss mehr Geld in R&D gesteckt werden. Dieses Geld kann entweder vom **Privat-Sektor** kommen oder von **staatlicher Unterstützung**. Beide Investoren müssen jedoch darauf hingewiesen werden, dass sie einen Return on Investment erhalten können. Daher ist hier der **Markt und der Preis für CO₂** von grosser Bedeutung. Des Weiteren, wie oben schon angetönt, ist auch hier die Politik von Nöten, um Forschungsprojekte voranzutreiben.

4.3.2.5 Anzahl an gebauten DAC-Anlagen

Dieser Punkt wird wohl am meisten von anderen Faktoren beeinflusst. Damit eine grosse Anzahl an DAC-Anlagen gebaut wird, müssen die **Kosten pro gefangene Tonne CO₂** tief sein, es muss ein **genug grosser Markt für das CO₂** bestehen, die Technologie muss genügend ausgereift sein mit **Fortschritten in R&D**, und die **Politik** muss ausreichend Anreize schaffen, um DAC ökonomisch attraktiver zu gestalten.

4.3.3 Identifikation der nötigen Bedingungen

Im vorherigen Kapitel wurde synthetisiert, wodurch die identifizierten Ziele beeinflusst werden können. Diese Einflüsse stellen Bedingungen dar, welche in naher Zukunft bestehen müssen, um die DAC-Technologie attraktiver zu präsentieren. Damit kann sie im weiteren Verlauf des Jahrhunderts auch wirklich einen bedeutsamen Einfluss auf die Erreichung der Klimaziele bewirken.

1. Die Politik kann davon überzeugt werden, dass DAC nicht nur die Möglichkeit bietet, CO₂ aus der Luft zu filtern, sondern auch BIP-Verluste minimiert und die Produktion von CO₂-neutralen synthetischen Brennstoffen ermöglicht. Dadurch werden von der Regierung Forschungsprojekte gefördert sowie Gesetze verabschiedet, welche Subventionen oder sonstige monetäre Unterstützungen für DAC-Unternehmen sichern und den Strommix CO₂-neutral gestalten.
2. Mehr Investoren können von den ökonomischen Vorteilen überzeugt werden. Mit Hilfe dieser Investitionen in R&D gelingen technologische Neuerungen, welche drastisch tiefere Kosten ermöglichen.
3. Anwendungsmöglichkeiten für das, mittels DAC, gefangene CO₂ werden weiter untersucht, um einen potenziellen Markt dafür aufzubauen, welcher das CO₂ abnehmen und DAC somit rentabel machen kann.

5 Ergebnisse der Interviews

In diesem Teil werden die Ergebnisse der Experten-Interviews aufgezeigt, um daraufhin in der Diskussion die Ergebnisse von Kapitel 4.3.3 validieren zu können. Wie zuvor erwähnt, wird, aufgrund der Art der Transkription, auf eine genauere quantitative Analyse der Codes verzichtet.

5.1 Nennung der identifizierten Faktoren

Als Erstes wurden die Interviewpartner gefragt, welche Faktoren für sie DAC beeinflussen werden. Die Resultate stimmten mit den in der Literaturrecherche identifizierten Faktoren weitgehend überein. Einzig Abweichungen beim Faktor «Einsatz anderer NET» werden unten näher beschrieben. Es wurden alle Faktoren, bis auf zwei, von den Experten genannt und diese somit weiter validiert. Die Faktoren «Beschaffenheit der Luft» und «Soziale Akzeptanz» kamen in keinem der Interviews zur Sprache, was die Ergebnisse der Literaturrecherche, in welchen sie als Prio Klasse 4 eingestuft wurden, bestätigen. Ausserdem wurde die «Unterstützung der Politik» am häufigsten genannt, gefolgt vom «Einsatz anderer NET».

5.1.1 Einsatz anderer NET

Im Interview 2 wurde hervorgehoben, dass BECCS, also alles was mit Biomasse zu tun hat, die entscheidende Konkurrenz zu DAC ist. Von Klärwerken mit CCS über Waldbewirtschaftung / Totholz-Sammlung bis hin zu spezifisch dafür angebauten Energiepflanzen. Da diese Variante bis jetzt immer noch sehr viel günstiger ist, wird in den Kosten die grosse Herausforderung für die DAC-Technologie gesehen. In den Interviews 1 und 4 wurde erwähnt, dass schon mit einer Umstellung auf einen grünen Strommix, Elektromobilität und CCS, ein Grossteil der Klimaziele erreicht werden kann. Die Interviewpartner 1 und 4 hoben somit stärker als die Literatur hervor, dass DAC zu allen anderen Mitigationsstrategien in Konkurrenz steht. Im Interview 3 wurde dazu ergänzend noch von einer stärkeren Nutzung der Kreislaufwirtschaften gesprochen.

5.2 Zukunft der DAC-Technologie

Drei der Interviewpartner waren sich einig, dass DAC in der Zukunft eine Bedeutung haben wird. Im Interview 1 wurde vor allem über die Ergebnisse von vielen verschiedenen Energieszenarien, in welchen DAC und CCS eine grosse Rolle spielen, gesprochen. In Interview 3 wurde erwähnt, dass MyClimate eine Verwendung von DAC in der

Zukunft sieht, aber eher, um die letzte Etappe der schwer vermeidbaren Emissionen zu bewältigen. Dies wurde auch im Interview 4 im Kontext der Schweizer Klimastrategie so erwähnt. Ausserdem wurde dort hinzugefügt, dass für ambitionierte Ziele, wie Netto null bis 2050 NETs, essentiell wichtig sind. Im Interview 2 hingegen wurde im Schweizer Kontext davon gesprochen, dass er momentan DAC noch nicht als Lösung sieht, da nach jetzigen Schätzungen genügend negativ Emissionen mit BECCS geschaffen werden können. Er betonte allerdings auch, dass dies mit dem jetzigen Stand der Forschung zusammenhängt und sich in Zukunft noch ändern könnte. Zudem brachte er auch zur Sprache, dass BECCS ohne DAC zwar für die Schweiz eine Lösung sein kann, es allerdings in anderen Ländern wieder ganz anders aussehen kann. Auf diesen Punkt wird in der Diskussion noch weiter eingegangen.

5.3 Weitere Erkenntnisse und Einflüsse auf DAC

Nachfolgend werden weitere Erkenntnisse, welche durch die Interviews gewonnen werden konnten, näher beschrieben.

5.3.1 Dringlichkeit

In den Interviews 1 und 3 wurde erwähnt, dass die Dringlichkeit zur Bekämpfung des Klimawandels einen sehr entscheidenden Einfluss auf den Einsatz von DAC haben wird. Damit gemeint ist der soziale Druck. Nicht zu verwechseln mit der sozialen Akzeptanz, welche als Faktor in der Literaturrecherche identifiziert wurde. Es wurden die regionalen Unterschiede sowie die Abweichungen zwischen Industrieländern und Entwicklungsländern hervorgehoben. Während in Industrieländern manchmal fast schon gegen Klimaschutzmassnahmen gestimmt wird, bekommen andere, häufig auch Entwicklungsländer, bereits jetzt die Auswirkungen des Klimawandels zu spüren. Des Weiteren wurde erwähnt, dass, je mehr Menschen davon akut ökonomisch betroffen sind, oder sich dadurch sogar in einer lebensbedrohlichen Lage befinden, desto grösser der Druck aus der Bevölkerung auf die Regierung wird, etwas dagegen zu unternehmen. Dies bewirkt, dass sich Politik und Unternehmen dazu «gezwungen» sehen, drastische Veränderungen zu fördern. Somit besteht die Möglichkeit, dass die Kosten von DAC eine kleinere Rolle spielen, solange schnell eine grosse Kapazität aufgebaut werden kann.

5.3.2 Globaler Preis, um CO₂ im Boden zu halten

Aus der Literaturanalyse ging vor allem hervor, dass ein Markt bestehen sollte, um das CO₂ verkaufen zu können, damit zumindest im jetzigen Stadium der Technologie ein ökonomischer Anreiz geschaffen werden kann. Zudem sollten DAC-Unternehmen mit Gesetzen, wie der 45Q Legislation, unterstützt werden. Im Gegensatz dazu haben alle Interviewpartner die Wichtigkeit eines Preises pro Tonne CO₂, um es unter der Erde zu speichern, hervorgehoben. In Interview 3 wurde erwähnt, dass, wenn man DAC als ein reines marktwirtschaftliches Instrument nutzt, es viel zu lange dauern würde, bis sich so ein Markt entwickelt hätte, weshalb es eines Eingriffs der Regierung bedarf. Es soll ein globales Handelssystem aufgebaut werden, mit welchem negative Emissionen wirklich entlohnt werden. Dabei stehen NETs, wie in jedem andern Markt auch, in direkter Konkurrenz zueinander. Auf diesem Weg kann sich die günstigere, effizientere Technologie durchsetzen. Nach diesem ersten staatlichen Eingriff ist zu erwarten, dass sich der Markt selber reguliert. Wenn sich am Anfang z.B. BECCS mit tieferen Kosten durchsetzt, dann aber nicht genügend Kapazität aufgebaut werden kann, würde der Preis für negativ Emissionen steigen und DAC somit rentabel werden. Im Interview 1 wurde dazu gesagt, dass, wenn es keinen solchen globalen CO₂-Preis gibt, DAC nur zu einem kleinen Teil eine Rolle spielen wird.

Dieser Punkt fällt auch unter den Faktor «Politische Unterstützung» und beleuchtet das Thema von einer anderen Seite, welche in der Literatur nur im Ansatz erwähnt wurde.

5.3.3 Transportinfrastruktur

Dieser Punkt wurde von den Interviewpartnern 1 und 2 kommentiert. Im Interview 1 wurde dies vor allem im Zusammenhang mit der Möglichkeit, Pipelines und sonstige Infrastruktur von schon bestehenden CCS-Prozessen zu nutzen, genannt. Ausserdem ist es der Meinung, dass der CO₂-Transport auch weitere Business Cases generieren könnte, womit Arbeitsplätze geschaffen werden und eben auch die BIP-Verluste gemindert werden könnten. Das Interview 2 bezog sich vor allem darauf, dass der Aufbau einer solchen Infrastruktur, z.B. mit Pipelines durch ganz Europa, eine extrem langwierige Sache ist. So kann man zwar eventuell die DAC-Anlagen relativ schnell aufbauen, aber die ganze Transport-Infrastruktur müsste schon vorgängig vorbereitet werden.

5.4 Bewertung der in Kapitel 4.3.3 aufgeführten Bedingungen

	<i>Politik</i>	<i>Wirtschaft</i>	<i>Private Investoren</i>
<i>Interview 1</i>	5	2	5
<i>Interview 2</i>	5	2	4
<i>Interview 3</i>	4	2	4
∅	4.67	2	4.34

Tabelle 4 Quantitative Bewertungen durch die Interviewpartner auf die Frage wie Sie diese Treiber nach Relevanz bewerten würden (1-5).

Bei diesen Ergebnissen zeigt sich, dass die Politik und die privaten Investoren als wichtiger angesehen werden, als die Wirtschaft. Die quantitative Bewertung der Treiber wurde nur in drei Interviews durchgeführt. Im vierten Interview wurden die Treiber nur qualitativ bewertet. Doch auch dort wurden die Politik und die privaten Investoren als wichtiger bewertet, als die Wirtschaft. Zu den drei Treibern konnten auch noch Anmerkungen und Änderungsvorschläge gesammelt werden. Wie in Kapitel 5.3.2 beschrieben, wurde vor allem der Treiber «Politik» angepasst.

6 Diskussion

In diesem Teil werden die Ergebnisse der Literaturrecherche und der Interviews benutzt, um die definierten Teilfragen zu beantworten sowie die Ergebnisse kritisch zu diskutieren.

6.1 Diskussion der Ergebnisse zur Beantwortung der Teilfrage a)

Zur Beantwortung der ersten Teilfrage tragen die Ergebnisse aus Kapitel 4.1 dieser Arbeit massgeblich bei. Dies, da die gewählten Faktoren ebenfalls in den Interviews von den Experten erwähnt und somit validiert wurden. Da die Analyse der Literatur allerdings schnell gezeigt hat, wie komplex dieses Thema ist, werden hier manche Erkenntnisse noch weiter vertieft und die Ergebnisse kritisch diskutiert, um die Teilfrage möglichst vollständig beantworten zu können.

6.1.1 Anpassung der identifizierten Faktoren

In den Interviews konnten die Faktoren Dringlichkeit, globaler Preis, um CO₂ im Boden zu halten, und die Transportinfrastruktur identifiziert werden. Davon wird allerdings nur Letzteres als weiterer Faktor, welcher DAC in Zukunft beeinflussen wird, aufgenommen. Dies, da die Dringlichkeit von den Auswirkungen der Natur abhängt und somit nur sehr schwer vorhersehbar und beeinflussbar ist. Der Faktor «globaler Preis, um CO₂ im Boden zu halten», wurde verwendet, um den Faktor «politische Unterstützung» anzupassen und stellt somit keinen eigenständigen Faktor dar. Der Übersicht halber werden nachfolgend alle endgültig identifizierten Faktoren mit ihren Klassenzuteilungen nochmals aufgelistet. Da der Faktor «Transportinfrastruktur» in den Interviews identifiziert und somit nicht quantitativ untersucht wurde, kann er keiner Klasse zugeordnet werden.

- | | |
|--|--|
| 1. Strommix | 2. CO ₂ -Markt und -Preis besteht |
| 1. Variable Kosten | 2. günstige Energie- /Wärme-preise |
| 1. Fixkosten | 3. Speicherkapazität von CO ₂ |
| 1. Anzahl an gebauten DAC-Anlagen | 3. Sorptionsmittel |
| 1. Technologische Verbesserungen durch R&D | 4. Beschaffenheit der Luft |
| 2. Verfügbarkeit von Abwärme | 4. Soziale Akzeptanz |
| 2. Unterstützung der Politik | 4. Einsatz anderer NET |
| | N/A Transportinfrastruktur |

6.1.1.1 Einsatz anderer NETs

Hier zeigt sich die grösste Diskrepanz zwischen den Ergebnissen der Literaturrecherche und der Interviews. In der Literatur wurde darauf hingewiesen, dass DAC aufgrund seiner Funktionsweise mit Aufforstung und BECCS verglichen werden muss und nicht mit PCC oder anderen Technologien, welche nur den Ausstoss von weiterem CO₂ verhindern, aber nicht aktiv negativ Emissionen erzeugen. In den Interviews wurde jedoch von allen Teilnehmern auch die Konkurrenz zu vielen weiteren Möglichkeiten und Technologien, wie PCC, erneuerbare Energien oder der Elektrifizierung des Individualverkehrs betont. Da Zusammenhänge zwischen verschiedenen Mitigationsstrategien vor allem in IAMs aufgezeigt werden (Realmonte, 2018; Vitali, 2016), wird als Grund für die spärliche Behandlung dieses Faktors gesehen, dass momentan in der Literatur noch sehr wenige IAMs mit DAC im Portfolio durchgeführt wurden und dieser Punkt aufgrund der Komplexität nur schwer abzuschätzen ist. Daher wird er zwar nur wenig in Studien behandelt (Prio 4), wird allerdings in dieser Arbeit schliesslich trotzdem als wichtiger Faktor eingeschätzt.

Wenn in Zukunft weitere IAMs mit DAC im Portfolio durchgeführt werden, wird erwartet, dass dieser Punkt in Zukunft auch in der Literatur stärker behandelt wird.

6.1.1.2 Unterstützung der Politik

Dieser Faktor wurde mittels der Literaturrecherche aufgrund seiner erhaltenen Punkte «nur» in Klasse 2 eingeteilt. Nach der Anpassung dieses Faktors mit den Ergebnissen der Interviews wird nun ein stärkerer Fokus auf ein globales Handelssystem für negativ Emissionen gelegt, gefolgt von Energiegesetzen, um mehr grüne Energie bereitzustellen und zum Schluss die Förderung von Projekten. Zudem wird er nun als wichtiger angesehen als in der Literatur erwähnt. Wie später aufgezeigt wird, kann sich der Fokus der Forschung mit der Zeit ändern. Im jetzigen Stadium der Technologie fokussiert sich die Wissenschaft noch auf technische Herausforderungen der DAC-Methode. Wenn dafür in Zukunft Lösungen gefunden werden können, wird erwartet, dass dieser Faktor auch vermehrt in Studien untersucht und an Relevanz gewinnen wird.

6.1.2 Kosten pro, mittels DAC, gefangene Tonne CO₂

Bei den anfallenden Kosten für eine mit DAC gefangene Tonne CO₂ herrscht seit langem eine grosse Unsicherheit. Bis heute gibt es dazu keinen Konsens, jedoch wurde, je aktueller die Studien waren, bei der Literaturanalyse ein deutlicher Abwärtstrend festgestellt. Der Zeitpunkt, ab dem die Literatur anfängt, tiefere Kosten zu prognostizieren, stimmt in etwa mit dem Zeitpunkt überein, als die ersten grösseren DAC-Anlagen von Climeworks und Global Thermostat in Betrieb genommen wurden. Somit standen reale Daten zu Energieverbrauch und Unterhaltskosten zur Verfügung. Während zu Beginn Studien, wie der APS Report von 2011, Kosten von bis zu \$ 610 und manche sogar bis zu \$ 1000 pro Tonne CO₂ prognostizierten (JRC - European Commission, 2019), konnten in der analysierten Literatur Prognosen für Mitte des Jahrhunderts von weit unter \$ 100 gefunden werden.

Die Abbildung 6 zeigt einerseits den Abwärtstrend der Kostenprognosen der Literatur aus dem finalen Pool der Studien, welche eigene Vorhersagen errechnet haben. An den Trendlinien lässt sich aber auch erkennen, dass die Unterschiede zwischen den optimistischen und pessimistischen Schätzungen innerhalb einer Studie immer kleiner werden, was darauf schliessen lässt, dass die Unsicherheiten bezüglich der Kosten langsam aber sicher abnehmen. Bei weiterer Forschung und dem Bau von Pilot-Anlagen scheint also eine drastische Kostensenkung durch Lerneffekte und technologische Entwicklungen, wie es prognostiziert wurde, realistisch.

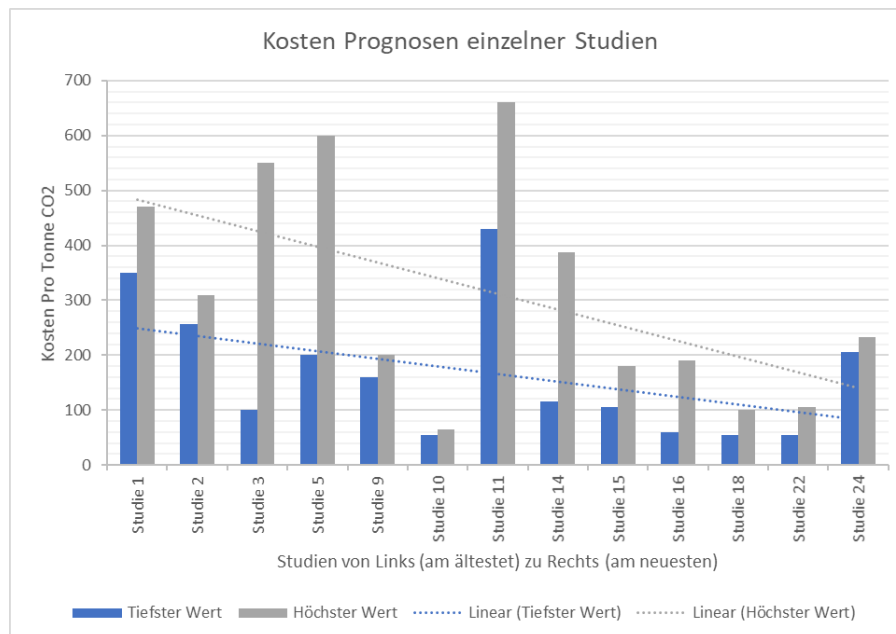


Abbildung 6 Kostenprognosen von Studien aus dem Finalen Pool

6.1.3 Unterschiedliche Beteiligung einzelner Länder

Etwas, was vor allem in den durchgeführten IAMs aufgezeigt wurde, ist die unterschiedliche Beteiligung einzelner Länder an einer globalen Installation von DAC- Anlagen. Darauf wurde in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen, da diese Beteiligung pro Land kein eigener Faktor ist, sondern von den zuvor definierten Faktoren abhängt, wie z.B. dem Strommix im jeweiligen Land, wie vorausschauend die Regierung denkt usw. Einzig die IAMs gaben weitere Erkenntnisse darauf, dass energie-exportierende Länder, wie der Mittlere Osten, Nord Afrika, Russland und Sub-Sahara Afrika, sich sehr viel mehr an der Reduktion der CO₂-Konzentration in der Luft beteiligen, wenn DAC angewendet wird (Vitali, 2016, S.49). Denn so können sie ihre BIP-Verluste minimieren, da, wie zuvor aufgezeigt, in Szenarien mit DAC fossile Brennstoffe länger verwendet werden können. Auch in den Interviews wurden die Risiken dieses Vorgehens noch mal angesprochen. So könnte DAC dann als eine Art Verzögerungstaktik eingesetzt werden, nur um momentan noch nicht so viel gegen den Klimawandel unternehmen zu müssen.

Ausserdem wurde belegt, dass in manchen dieser Regionen DAC sehr attraktiv wird, weil erneuerbare Energien, wie Solarenergie, in grossen Mengen und zu günstigen Preisen hergestellt werden können (Breyer et al., 2020). Dazu haben Marcucci et al. (2017) in ihrem Paper festgehalten, dass Regionen wie der Mittlere Osten und Afrika, Russland und Kanada bei einem Einsatz von DAC stärker zur Reduktion der CO₂-Konzentration beitragen, da dort grosse Mengen an Lagerstätten zu finden sind. Dies ist sehr gut in

Abbildung 7 ersichtlich. In (a) wird gezeigt, dass 11.4 Gt CO₂ im Jahr 2100 gefangen werden müssen, um das 2°C-Ziel mit einer 50%-Wahrscheinlichkeit zu erreichen. Um mit einer Wahrscheinlichkeit von 66% unter 2°C zu bleiben, müssen 21.4 Gt CO₂, und um mit einer 50%-Wahrscheinlichkeit unter 1.5°C zu bleiben, müssen 38.3 Gt CO₂ gefangen werden. Die grauen Balken zeigen das jeweilige Szenario ohne DAC. Daraus können zwei verschiedene Schlüsse gezogen werden. Einerseits, dass mit strikteren Klimazielen DAC immer wichtiger wird und im 1.5°C-Szenario vom angewendeten Modell nicht einmal ein Szenario ohne DAC in Erwägung gezogen wird, und andererseits, dass, je strikter die Klimaziele sind, globale Kooperation immer wichtiger wird. Bei (a) sind RUS, MEA und CANZ im Jahre 2100 für 71% des gesamten DAC-Volumens verantwortlich. Bei (b) nur noch ca. 60% und bei (c) ungefähr 44%.

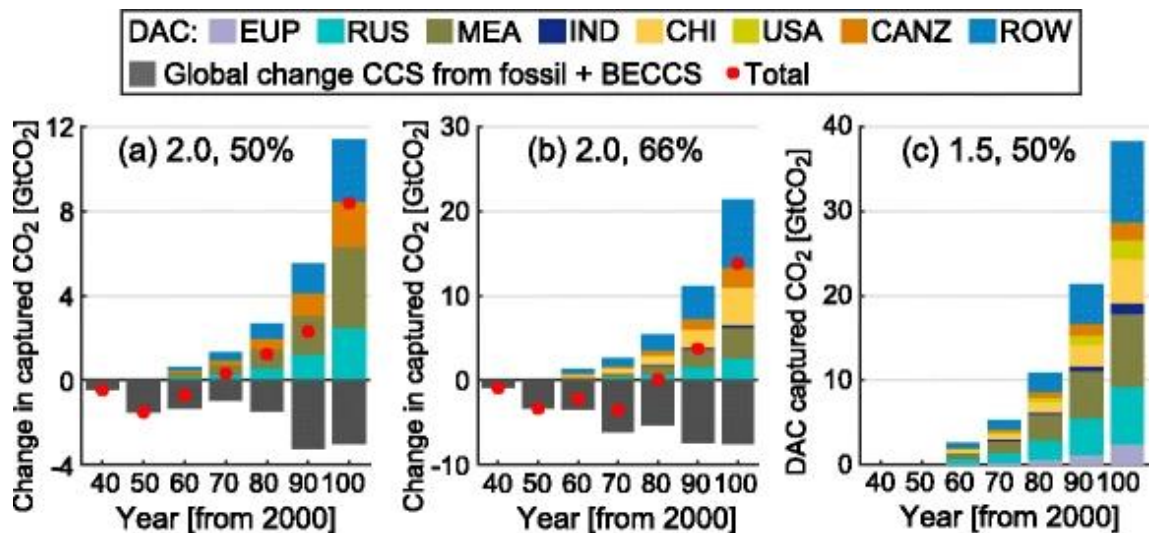


Abbildung 7 Anteil einzelner Regionen/Länder an der mit DAC gefangenen Menge CO₂ (Marcucci et al., 2017)

Wenn diese Resultate noch mit weiteren Studien aus der Literaturrecherche verbunden werden, wird ersichtlich, dass diese Regionen auch eine hohe Verfügbarkeit von erschwinglicher und grüner Energie aufweisen. So kann die MEA-Region sehr günstige erneuerbare Energie produzieren und besitzt viel Fläche, welche nicht anderweitig genutzt wird. Das gleiche Muster zeigt sich für Russland, welches günstig Erdgas produzieren kann, was, verbunden mit einer CCS-Anlage, ebenso CO₂-neutral ist und für tiefe Kosten sorgt (Zeman, 2014). Auch Russland verfügt über grosse, ungenutzte Flächen.

Ebenfalls ist zu sehen, dass bei strengeren Zielen China immer wichtiger wird, da dieses Land, als eines der grössten Emittenten (Global Carbon Project, 2020), einen immer wichtigeren Einfluss auf die kleineren CO₂-Budgets hat.

Auch Herr Guidati hob diese regionalen Unterschiede hervor. Durch die Einsatzmöglichkeiten von BECCS sieht er zwar momentan DAC nicht als realistische Lösung für die Schweiz, doch nannte er das Beispiel von südlich gelegenen Ländern. Wie auch Breyer et al. (2020) aufzeigten, ist dort, durch die Menge an verfügbarem Solarstrom sowie evtl. auch die Nähe zu leeren Gas- oder Ölfeldern, DAC sehr viel attraktiver, was die Speicherung vereinfachen würde.

Daher wird eine globale Kooperation als enorm wichtig angesehen, um regionale Potenziale vollständig auszuschöpfen.

6.1.4 Veränderung der Forschung mit der Zeit

Da die Studien in der Abbildung 4 zeitlich von alt zu neu geordnet sind, können weitere Schlüsse daraus gezogen werden, wie sich die Anzahl Erwähnungen einzelner Faktoren mit der Zeit verändert.

Dies ist der Fall beim Faktor «Sorptionsmittel». Es wird in den älteren Studien, welche analysiert wurden, kaum erwähnt. In den neueren allerdings wird häufig darauf eingegangen, und es wird ihm ein hoher Impact zugesprochen. Dies zeigt, wie sehr sich der Fokus der Wissenschaft mit der Zeit verschieben kann. Daher ist zu erwarten, dass Faktoren, welche in dieser Arbeit als wichtig identifiziert wurden, in Zukunft weniger stark untersucht werden, falls akzeptable Lösungen für deren Probleme gefunden werden. Die Forschung kann sich somit einem weniger untersuchten Problem widmen.

Des Weiteren wird dies auch als Grund angesehen, dass der Faktor «Beschaffenheit der Luft» nur in den früheren Studien erwähnt wurde und auch nur spärlich. Denn so wie Lackner (2015) sagte, kamen keine Technologien in Frage, welche die Luft zuvor aufbereiten müssen. Da nun allerdings entsprechende Methoden gefunden und erste Anlagen gebaut wurden, spielt dieser Faktor keine Rolle mehr, ausser wenn neue Methoden entwickelt werden würden.

6.2 Diskussion der Ergebnisse zur Beantwortung der Teilfrage b)

In diesem Teil werden die Ergebnisse diskutiert, um die zweite Teilfrage zu beantworten. Als Grundlage dazu dienen die Erkenntnisse aus Kapitel 4.3.3. Des Weiteren werden die Ergebnisse der Interviews und sonstige Erkenntnisse genutzt.

6.2.1 Einsatz Zeitpunkt der DAC-Anlagen

Ein wichtiger Aspekt, welcher in der Literatur immer angesprochen wird, ist der Zeitpunkt, wann DAC als NET eingesetzt werden wird, um die Klimaziele zu erreichen. Dabei gibt es nur kleinere Unterschiede. Generell herrscht ein Konsens, dass DAC erst Mitte dieses Jahrhunderts in grossem Masse eingesetzt werden würde. Den frühesten Zeitpunkt, wann DAC installiert werden könnte, hat Vitali M. (2016, S. 40) mit 2020 prognostiziert. Dies war das Ergebnis des WITCH-IAMs. Heute kann man sagen, dass dies nicht eingetreten ist und ein Einsatz erst Mitte des Jahrhunderts immer wahrscheinlicher wird. Ansonsten setzen verschiedene IAMs DAC jeweils zwischen 2040 und 2070 ein, was auch von diversen Studien so eingeschätzt wird.

6.2.2 Wie sich DAC durchsetzen wird

Da es zurzeit zwei Varianten von DAC-Anlagen gibt, stellt sich die Frage, ob sich die LT- oder die HT-Variante durchsetzen wird. Beide haben ihre Vor- und Nachteile. Die LT-Variante benötigt viel weniger Energie, da nur Temperaturen um die 100°C anstatt, wie bei der HT-Variante, 900°C erreicht werden müssen, um das CO₂ zu gewinnen (Fasihi et al., 2019). Shayegh et al. (2021) haben in ihren Studien ebenfalls aufgezeigt, dass in Zukunft die LT-Variante mit festen Sorptionsmitteln tiefere Kosten pro Tonne CO₂ erzeugen könnte, wiesen aber auch darauf hin, dass die Variante der DAC-Technologie zum jetzigen Zeitpunkt kein entscheidender Faktor ist.

Bei der Bestimmung der Zusammensetzung des eingesetzten NET-Portfolios spielen die Kosten pro Tonne CO₂, die Effizienz der Methoden, mögliche maximale Kapazität, generelle Machbarkeit und vieles mehr eine Rolle. In verschiedenen IAMs (Realmonde, 2018; Vitali, 2016) sowie den Interviews wurde aufgezeigt, in welchem Ausmass sich DAC sehr wahrscheinlich durchsetzen wird. Dabei hat sich gezeigt, dass DAC nicht als einzige NET eingesetzt werden wird, da dies zu enormen Kosten führen würde, obwohl man, wie zuvor aufgezeigt, BIP-Verluste mindern kann. Vielmehr wird es einen NET-Mix aus BECCS und DAC geben, sowie eine starke Nutzung von erneuerbaren Energien und Gas mit CCS. Zudem werden weiter PCC-Anlagen in der Industrie verwendet. So können die, zum jetzigen Zeitpunkt, tieferen Kosten von BECCS mit den Vorteilen von DAC, wie der Möglichkeit grosse Kapazitäten aufzubauen und BIP-Verluste zu minimieren, vereint werden, um möglichst effizient die Klimaziele zu erreichen.

6.2.3 Validierung und Anpassung der Ergebnisse aus Kapitel 4.3.3

Nun werden die Treiber und ihre Bedingungen aus Kapitel 4.3.3 mit den Expertenmeinungen validiert und allenfalls überarbeitet. So kann entschieden werden, welche Treiber am Schluss eine Bedingung dafür darstellen, ob DAC einen relevanten Beitrag zur Reduktion der CO₂-Konzentration in der Luft leisten wird.

Politik: Alle Interviewpartner haben, wie die Literatur, die Wichtigkeit der Politik als sehr hoch eingestuft. Herr Landwehr, Herr Guidati und Frau Wenger sehen sie auch als klaren Akteur, während Herr Braunreiter meinte, dass die Politik, seiner Ansicht nach, kein eigener Treiber ist, sondern sich nach den Stimmen der Wirtschaft und Wissenschaft richtet. Allerdings haben Shayegh et al. (2021) ebenfalls in ihren Expertenbefragungen herausgefunden, dass die Politik einer der wichtigsten, wenn nicht sogar der wichtigste Treiber ist. Allerdings werden mit den Erkenntnissen der Interviews die Aktionen der Politik, wie in Kapitel 4.3.3 aufgeschrieben, angepasst. Während Energiegesetze für einen grüneren Strommix wichtig sind und allfällige Subventionen eine Rolle spielen können, wurde von allen Interviewpartnern hervorgehoben, dass die wesentlichste Aktivität der Politik sein wird, für negativ Emissionen einen globalen Preis zu definieren. Dabei spielen die Klimaziele der Länder eine grosse Rolle. Je strikter sie sind, desto höher ist der Bedarf an negativ Emissionen, was die Bildung eines Marktes begünstigt.

Dies bedeutet, dass zumindest anfangs ein künstlicher Markt von der Politik geschaffen werden muss, in welchem Unternehmen, welche CO₂ unter der Erde speichern, pro Tonne Geld bekommen. Zudem wird mit steigenden Emissionssteuern DAC als Investition für Unternehmen immer attraktiver (Vitali, 2016, S. 39). Aus diesen Gründen wird es als eine Bedingung dafür angesehen, dass die Politik Rahmenbedingungen für einen solchen Markt schafft und die Produktion von CO₂-neutraler Energie fördert. Erst dadurch könnte DAC einen relevanten Beitrag als Mitigationsstrategie leisten.

Private Investoren: Dieser Punkt wurde von den Experten als Zweitwichtigster eingestuft. Als Investoren werden nun mit den Erkenntnissen ganz klar grosse Unternehmen gesehen. Denn einerseits wurde von allen Interviewpartnern bestätigt, dass R&D-Investitionen bedeutsam sind, um technologische Durchbrüche zu erreichen, und andererseits hat Herr Braunreiter auch die enorme Signalwirkung hervorgehoben, welche es haben kann, wenn grosse Player der Wirtschaft sich öffentlich für DAC aussprechen, um damit ihre Emissionen zu verringern und sich von anderen Unternehmen abzugrenzen. Mit dieser Signalwirkung und den Geldern können bessere Materialien, effizientere Designs für die Anlage sowie Möglichkeiten, den Energiebedarf zu senken, gefunden werden. Daher wird es ebenfalls als Bedingung angesehen, dass kapitalstarke Investoren gefunden werden, damit DAC in einem allfälligen globalen Markt für negativ Emissionen am effizientesten wirken kann.

Wirtschaft: Hier waren die Meinungen der Interviewpartner, im Gegensatz zur Literatur, etwas zurückhaltender. Es haben alle gesagt, dass die Wirtschaft, und damit einhergehend genügend Anwendungsmöglichkeiten, schon eine Rolle spiele. Im Interview 1 z.B. kam zur Sprache, dass die Nutzung von CO₂ in der Wirtschaft in einem viel zu kleinen Ausmass stattfinden wird. Damit meinte er vor allem Anwendungen in der Getränkeindustrie oder in Gewächshäusern, um das Pflanzenwachstum zu fördern. Im Interview 2 hingegen kam zur Sprache, dass es natürlich auch sehr interessant ist, dass man mit DAC eben nicht nur CO₂ im Boden speichern, sondern auch Industrien mit CO₂ versorgen kann und so kein neues CO₂ aus der Erde gewonnen werden muss. Als wichtiges Beispiel für eine Power-to-Fuel-Anwendung wurde die Aviatik genannt. Dies, da es dort extrem schwierig ist, auf etwas anderes als Treibstoff umzusteigen. Mit Power-to-Fuel könnte dann ein künstlicher Treibstoff verwendet werden.

Auch im Interview 4 wurde bestätigt, dass dies vor allem am Anfang der Technologie helfen könnte, da ein ökonomischer Anreiz geschaffen wird. Dies stellt aber keine entscheidende Bedingung dar, denn wie auch im Interview 2 hervorgehoben wurde, ist DAC im Gespräch, da negativ Emissionen gebraucht werden. Somit soll DAC auch dazu benutzt werden, CO₂ zu fangen und permanent unter der Erde zu speichern. Des Weiteren meinte er, dass, wenn man DAC als rein marktwirtschaftliches Instrument ansieht, die Entwicklung viel zu lange dauern würde, bis es rentabel ist und umfangreich eingesetzt wird. Mit all diesen Ergebnissen kann man sagen, dass die Möglichkeit, gefangenes CO₂ weiterzuverarbeiten, zusätzliche ökonomische Anreize für Unternehmen bietet, um weitere Investitionen zu tätigen. Im Moment ist es aber kein ausschlaggebender Faktor dafür, ob DAC in Zukunft einen relevanten Beitrag zur CO₂-Reduktion leisten wird und konnte somit nicht als Bedingung validiert werden.

7 Schlussfolgerung

Diese Arbeit untersuchte die Frage, welche Faktoren die Zukunft der DAC- Technologie beeinflussen werden und was konkret in naher/mittlerer Zukunft passieren muss, damit DAC einen relevanten Beitrag zur CO₂-Reduktion leisten kann.

Durch die systematische Literaturrecherche, welche in dieser Arbeit als erstes angewendet wurde, konnte ein fundiertes Bild über den aktuellen Stand der Forschung, bezüglich techno-ökonomischen Studien geschaffen werden. Aus den 28 Studien konnten mittels einer Volltextsuche 14 Faktoren synthetisiert werden, welche die Zukunft von DAC beeinflussen. Durch eine quantitative Analyse dieser Daten konnte festgestellt werden, dass aus Sicht der Wissenschaft der Strommix, die variablen Kosten, die Fixkosten, technologische Verbesserungen durch R&D sowie die Anzahl an gebauten DAC-Anlagen die grösste Auswirkung haben werden. Dazu kommt, dass sie am häufigsten in den Studien erwähnt wurden.

Da im Verlaufe dieser Arbeit festgestellt werden konnte, dass sich die Wissenschaft darüber einig ist, dass DAC erst ca. Mitte des Jahrhunderts eingesetzt werden würde, werden die Auswirkungen der oben genannten Faktoren auch erst zu diesem Zeitpunkt ersichtlich sein. Somit werden diese auch erst in Zukunft eine Rolle spielen. Jedoch muss die Technologie und allfällige Infrastruktur jetzt schon vorbereitet werden, damit sie einsatzbereit ist, wenn sie benötigt wird. Daher wurden diese fünf Faktoren als desirable futures eines Backcasting-Ansatzes definiert, um so von dieser wünschenswerten Zukunft aus identifizieren zu können, was in naher/mittlerer Zukunft getan werden muss, um dies zu erreichen.

Es wurden drei Treiber ausgearbeitet, welche jetzt schon mit ihren Aktionen DAC in Zukunft beeinflussen können. Dies ist die **Politik**, welche mit Energiegesetzen und Förderungsgeldern die Entwicklung der DAC-Technologie vorantreibt. Des Weiteren wurde die **Wirtschaft** als Treiber identifiziert, welche mit Abnehmermärkten für das absorbierte CO₂ einen ökonomischen Anreiz für DAC bietet. Als letzte Treiber wurden dann **private Investoren**, wie Apple, Microsoft, Tesla usw. als bedeutsam identifiziert, um, vor allem am Anfang, über genügend Geld für weiteres R&D zu verfügen.

Mit den durchgeführten Interviews mit Experten, welche das Thema aus der wissenschaftlichen Perspektive, der Marktperspektive und der politischen Perspektive sehen,

konnten die gefundenen Faktoren bis auf zwei validiert werden. Die Beschaffenheit der Luft sowie die soziale Akzeptanz der Technologie wurden in keinem der Interviews angesprochen, was aber nicht weiter verwunderlich ist, da diese Faktoren auch in der Literatur nur sehr spärlich behandelt wurden.

Bei der Validierung der drei identifizierten Treiber hat sich ganz klar herausgestellt, dass die Politik und die privaten Investoren die essentiellen Treiber sind. Die Aktionen der Politik wurden im Vergleich zum letzten Ergebnis in Kapitel 4.3.3 nochmals überarbeitet. So konnte zum Schluss identifiziert werden, dass die wichtigste Aktion der Politik sein wird, durch ihre Klimaziele einen Bedarf an negativ Emissionen und so einen, zumindest anfangs, künstlichen Markt zu schaffen. Des Weiteren sollte sie Rahmenbedingungen erarbeiten, wie man NETs definiert und was Anlagen erfüllen müssen um berechtigt zu sein, Geld für die Speicherung des CO₂ zu bekommen. Zudem konnte festgelegt werden, dass die privaten Investoren vor allem am Anfang eine wichtige Rolle spielen, da sie einerseits mit Investitionen R&D der DAC-Unternehmen stark fördern können, und andererseits eine starke Signalwirkung nach aussen haben. Damit kann anderen Firmen und evtl. sogar Staaten demonstriert werden, dass es sich lohnt, DAC zu fördern.

Die Wirtschaft konnte nur teilweise als wichtiger Treiber für DAC validiert werden. Für einige Interviewpartner übt diese keinen grossen Einfluss aus. Andere sahen zwar den Vorteil, dass DAC einen ökonomischen Anreiz bekommt, wenn man das CO₂ verkaufen und damit evtl. in Zukunft auch vermehrt synthetische Treibstoffe herstellen kann, jedoch nannte es niemand einen wirklichen Treiber. Daher wird es als unwahrscheinlich angesehen, dass sich ein genügend grosser Markt mit einem entsprechend hohen Preis bilden wird, um DAC attraktiv zu machen.

7.1 Kritische Reflexion und weiterführende Forschung

Nachfolgend wird die Arbeit kritisch reflektiert, und es werden Anmerkungen dargelegt, wie die Forschung in diesem Gebiet weitergeführt werden könnte.

Während die Zuteilung zu den 14 übergeordneten Faktoren in Abbildung 4 aufzeigt, welche Faktoren in der Literatur genannt werden und wie oft, muss beachtet werden, dass es einzelne Studien gibt, welche sich auf einen spezifischen Faktor der DAC- Technologie fokussieren und daher die meisten anderen identifizierten Faktoren ausser Acht lassen. Allerdings eben nicht aus dem Grund, weil sie sie nicht für wichtig halten.

Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass alle befragten Experten aus der Schweiz stammen. So beriefen sich diese in manchen Fällen auf ausländische Studien und Experten, um den globalen Kontext zu erläutern. Bei Gesprächen mit Experten aus dem Ausland hätten weitere Erkenntnisse zur Lage in anderen Ländern aus Primärquellen eingeholt werden können.

Zudem hätte die Interdependenz der einzelnen Faktoren noch weiter untersucht werden können, um ein noch vollständigeres Bild zu erhalten. Da dies jedoch die Komplexität des Themas noch weiter erhöhen und somit den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, wurde darauf nur teilweise eingegangen.

Zumal identifiziert wurde, dass die Politik eine sehr wichtige Rolle spielen wird, wird es nötig sein, weitere Untersuchungen durchzuführen. Dabei gilt es festzustellen, wie die Rahmenbedingungen für einen Markt für negativ Emissionen aussehen könnten und wie ein globales Handelssystem aufgebaut werden kann. Zudem konnte ermittelt werden, dass es viele IAMs gibt, welche Szenarien mit verschiedensten Mitigationsstrategien errechnen, jedoch nur sehr wenige, welche DAC miteinbeziehen. Daher sollten mehr IAMs mit DAC als Möglichkeit durchgeführt werden, um besser verstehen zu können, wie sich DAC am besten in das Portfolio der entsprechenden Methoden zur Reduktion der CO₂-Konzentration in der Luft eingliedern kann.

8 Literaturverzeichnis

- Azar, C., Lindgren, K., Obersteiner, M., Riahi, K., van Vuuren, D. P., den Elzen, K. M. G. J., Möllersten, K., & Larson, E. D. (2010). The feasibility of low CO₂ concentration targets and the role of bio-energy with carbon capture and storage (BECCS). *Climatic Change*, *100*(1), 195–202. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9832-7>
- Azarabadi, H., & Lackner, K. S. (2019). A sorbent-focused techno-economic analysis of direct air capture. *Applied Energy*, *250*, 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.012>
- BAFU. (2020). *Negativemissionstechnologien*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/emissionsverminderung/negativemissionstechnologien.html>
- Bao, J., Lu, W.-H., Zhao, J., & Bi, X. T. (2018). Greenhouses for CO₂ sequestration from atmosphere. *Carbon Resources Conversion*, *1*(2), 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2018.08.002>
- Beck, L. (2020). *The US Section 45Q Tax Credit for Carbon Oxide Sequestration: An Update Global CCS Institute*. https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/04/45Q_Brief_in_template_LL.B.pdf
- Beutler, C., Charles, L., & Wurzbacher, J. (2019). The Role of Direct Air Capture in Mitigation of Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions. *Frontiers in Climate*, *1*(10), 10. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00010>
- Breyer, C., Fasihi, M., & Aghahosseini, A. (2020). Carbon dioxide direct air capture for effective climate change mitigation based on renewable electricity: a new type of energy system sector coupling. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *25*(1), 43–65. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-9847-y>
- Breyer, C., Fasihi, M., Bajamundi, C., & Creutzig, F. (2019). Direct Air Capture of CO₂: A Key Technology for Ambitious Climate Change Mitigation. In *Joule* (Vol. 3, Issue 9, pp. 2053–2057). Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.08.010>
- Broehm, M., Strefler, J., & Bauer, N. (2015). Techno-Economic Review of Direct Air Capture Systems for Large Scale Mitigation of Atmospheric CO₂. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2665702>
- Bundesministerium für Umwelt. (2020). *Emissionshandel | BMU*. <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/emissionshandel/>
- Caskie, A. (2020). *Technical, policy and stakeholder analysis of direct air capture* [Delft University of Technology]. https://cdrlaw.org/wp-content/uploads/2020/08/finished_1.pdf
- Chatterjee, S., & Huang, K. W. (2020). Unrealistic energy and materials requirement for direct air capture in deep mitigation pathways. In *Nature Communications* (Vol. 11, Issue 1, pp. 1–3). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17203-7>

- Chen, C., & Tavoni, M. (2013). Direct air capture of CO₂ and climate stabilization: A model based assessment. *Climatic Change*, 118(1), 59–72. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0714-7>
- CIA. (2021). *Area - The World Factbook*. <https://www.cia.gov/the-world-factbook/field/area/country-comparison>
- climate engineering. (n.d.). *Aufforstung-von-Waeldern - SPP Climate Engineering*. Retrieved April 1, 2021, from <https://www.spp-climate-engineering.de/index.php/Aufforstung-von-Waeldern.html>
- Climeworks. (2020a). *Reverse climate change by removing CO₂ from the air*. <https://climeworks.com/story-to-reverse-climate-change>
- Climeworks. (2020b). *Reverse climate change by removing CO₂ from the air*. <https://climeworks.com/co2-removal>
- CORTES, V., & LASKA, C. (2020). *Economics of Direct Air Capture of Carbon Dioxide*. https://dukespace.lib.duke.edu/dspace/bitstream/handle/10161/20450/DAC_MP_Final.pdf?sequence=1
- Daggash, H. A., Patzschke, C. F., Heuberger, C. F., Zhu, L., Hellgardt, K., Fennell, P. S., Bhawe, A. N., Bardow, A., & MacDowell, N. (2018). Closing the carbon cycle to maximise climate change mitigation: Power-to-methanol: vs. power-to-direct air capture. *Sustainable Energy and Fuels*, 2(6), 1153–1169. <https://doi.org/10.1039/c8se00061a>
- Deutz, S., & Bardow, A. (2020). How (Carbon) Negative Is Direct Air Capture? Life Cycle Assessment of an Industrial Temperature-Vacuum Swing Adsorption Process. *ChemRxiv*. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv.12833747.v1>
- Eadbhard, P. (2021). Something in the Air? Assessing the Role of Direct Air Capture in the Energy Transition - Journal | OGEL Journal. *OGEL*, 19(1). <https://doi.org/1875-418X>
- EMR. (2020). *What is a Contract for Difference and why do we need it?* <https://www.emrsettlement.co.uk/about-emr/contracts-for-difference/>
- European Commission. (n.d.). *Ursachen des Klimawandels | Klimapolitik*. Retrieved March 21, 2021, from https://ec.europa.eu/clima/change/causes_de
- Evans, S., & Hausfather, Z. (2018, October 2). *Q&A: How “integrated assessment models” are used to study climate change*. <https://www.carbonbrief.org/qa-how-integrated-assessment-models-are-used-to-study-climate-change>
- Fasihi, M., Efimova, O., & Breyer, C. (2019). Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production*, 224, 957–980. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>
- Gambhir, A., & Tavoni, M. (2019). Direct Air Carbon Capture and Sequestration: How It Works and How It Could Contribute to Climate-Change Mitigation. *One Earth*, 1(4), 405–409. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.11.006>

- Global Carbon Project. (2020, December). *CO2 Emissions | Global Carbon Atlas*. <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>
- Goeppert, A., Czaun, M., Surya Prakash, G. K., & Olah, G. A. (2012). Air as the renewable carbon source of the future: An overview of CO₂ capture from the atmosphere. In *Energy and Environmental Science* (Vol. 5, Issue 7, pp. 7833–7853). The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c2ee21586a>
- Greenpeace. (2019). *Internationale Klimakonferenzen | Greenpeace*. <https://www.greenpeace.de/themen/klimakrise/klimaschutz/internationale-klimakonferenzen>
- Hansen, S. V., Daioglou, V., Steinmann, Z. J. N., Doelman, J. C., Van Vuuren, D. P., & Huijbregts, M. A. J. (2020). The climate change mitigation potential of bioenergy with carbon capture and storage. *Nature Climate Change*, *10*(11), 1023–1029. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0885-y>
- Holmberg, J., & Robert, K.-H. (2000). Backcasting-a framework for strategic planning. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, *7*(4), 291–308. <https://doi.org/10.1080/13504500009470049>
- Houghton, J., Filho, L. M., Lee, H., Bruce, J., Haites, E., Harris N., & Maskell K. (1995). *Climate change 1994: radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC 1992 IS92 emission scenarios*. https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/cc1994/climate_change_1994.pdf
- Ishimoto, Y., Sugiyama, M., Kato, E., Moriyama, R., Tsuzuki, K., & Kurosawa, A. (2017). Putting Costs of Direct Air Capture in Context. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2982422>
- JRC - European Commission. (2019). *FACTS BEHIND THE DEBATE - Direct Air Capture (DAC)*. <https://doi.org/10.1260/0958-305X.23.2-3.319>
- Kohlbrunn, Y., & Scheytt, C. (n.d.). *Unterschiedliche Formen qualitativer Interviews*. Retrieved May 21, 2021, from <https://methodenzentrum.ruhr-uni-bochum.de/e-learning/qualitative-erhebungsmethoden/qualitative-interviewforschung/unterschiedliche-formen-qualitativer-interviews/>
- Köllner, C. (2021, February 16). *Was steckt hinter Power-to-X? #Update | springerprofessional.de*. <https://www.springerprofessional.de/betriebsstoffe/emissionen/was-steckt-hinter-power-to-x-/16747404>
- Lackner, K. S. (2015). *State of Direct Air Capture Carbon Management Technologies Conference*. Sugarland, Texas. <https://pdfs.semanticscholar.org/431a/bddc55efea89fc5e5865216118c07742ff80.pdf>
- Lackner, K. S., Ziock, H., & Grimes, P. (1999). Carbon Dioxide Extraction from Air: Is it an Option? *Proceedings of the 24th International Conference on Coal Utilization & Fuel Systems*, 885–886. <https://www.osti.gov/biblio/770509>

- Loesche, D. (2018, April 19). • *Infografik: Die Geschichte des Kohlendioxid Ausstoßes* | Statista. <https://de.statista.com/infografik/13569/weltweite-kohlendioxidemissionen/>
- Marcucci, A., Kypreos, S., & Panos, E. (2017). The road to achieving the long-term Paris targets: energy transition and the role of direct air capture. *Climatic Change*, *144*(2), 181–193. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2051-8>
- MAXQDA. (2021). *MAXQDA | Die #1 Software für Qualitative Datenanalyse & Mixed-Methods*. <https://www.maxqda.de/>
- McQueen, N., Psarras, P., Pilorgé, H., Liguori, S., He, J., Yuan, M., Woodall, C. M., Kian, K., Pierpoint, L., Jurewicz, J., Lucas, J. M., Jacobson, R., Deich, N., & Wilcox, J. (2020). Cost Analysis of Direct Air Capture and Sequestration Coupled to Low-Carbon Thermal Energy in the United States. *Environmental Science and Technology*, *54*(12), 7542–7551. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00476>
- Melzer, L. S. (2012). Carbon Dioxide Enhanced Oil Recovery (CO₂ EOR): Factors Involved in Adding Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) to Enhanced Oil Recovery. In *carboncapturecoalition.org*. https://carboncapturecoalition.org/wp-content/uploads/2018/01/Melzer_CO2EOR_CCUS_Feb2012.pdf
- myclimate. (2020). *Was sind «Negativemissionen»?* <https://www.myclimate.org/de/informieren/faq/faq-detail/was-sind-negativemissionen/>
- Rahmanifard, H., & Plaksina, T. (2017). *A Technical and Economic Assessment of Direct Air Capture with Zeolite 13X and Sequestration Systems*. https://geoconvention.com/wp-content/uploads/abstracts/2017/164_GC2017_A_Technical_and_Economic_Assessment_of_Direct_Air_Capture.pdf
- Realmonte, G. (2018). *Direct Air Capture and Negative Emission Technologies in Deep Mitigation Pathways* [SCHOOL OF INDUSTRIAL AND INFORMATION ENGINEERING]. <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/142512>
- Realmonte, G., Drouet, L., Gambhir, A., Glynn, J., Hawkes, A., Köberle, A. C., & Tavoni, M. (2019). An inter-model assessment of the role of direct air capture in deep mitigation pathways. *Nature Communications*, *10*(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10842-5>
- Rogelj, J., Shindell, D., Jiang, K., Fifita, S., Forster, P., Ginzburg, V., Handa, C., Kheshgi, H., Kobayashi, S., Kriegler, E., Mundaca, L., Séférian, R., & Vilariño, M. V. (2018). *Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development*. Pallav Purohit. <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-2/>
- Schomaker, R. M., & Sitter, A. (2020). Die PESTEL-Analyse – Status quo und innovative Anpassungen. *Der Betriebswirt*, *61*(1), 3–21. <https://doi.org/10.3790/dbw.61.1.3>
- Shayegh, S., Bosetti, V., & Tavoni, M. (2021). Future Prospects of Direct Air Capture Technologies: Insights From an Expert Elicitation Survey. *Frontiers in Climate*, *3*, 630893. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.630893>

- Specht, M. (2019, June 25). *Renewable Energy Curtailment 101: The Problem That's Actually Not a Problem At All - Union of Concerned Scientists*. <https://blog.ucsusa.org/mark-specht/renewable-energy-curtailment-101>
- Sutherland, B. R. (2019). Pricing CO2 Direct Air Capture. In *Joule* (Vol. 3, Issue 7, pp. 1571–1573). Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.06.025>
- Tertilt, M. (2018, October 26). *Warum so wenig CO2 eine so große Wirkung hat - quarks.de*. Quarks. <https://www.quarks.de/umwelt/klimawandel/so-eine-grosse-wirkung-hat-so-wenig-co2/>
- Umwelt Bundesamt. (2020). *Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen | Umweltbundesamt*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#kohlendioxid->
- UNFCCC. (2015). Adoption of the Paris Agreement. In *Conference of the Parties on its twenty-first session* (Issue December). <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>
- Van Der Giesen, C., Meinrenken, C. J., Renékleijn, R., Sprecher, B., Lackner, K. S., & Kramer, G. J. (2016). *A Life Cycle Assessment Case Study of Coal-Fired Electricity Generation with Humidity Swing Direct Air Capture of CO2 versus MEA-Based Postcombustion Capture*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05028>
- Viebahn, P., Scholz, A., & Zelt, O. (2019). The Potential Role of Direct Air Capture in the German Energy Research Program—Results of a Multi-Dimensional Analysis. *Energies*, 12(18), 3443. <https://doi.org/10.3390/en12183443>
- Vitali, M. (2016). *The Role of Direct Air Capture to Meet the Paris Climate Agreement: a Multi Model Assessment [SCHOOL OF INDUSTRIAL AND INFORMATION ENGINEERING]*. <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/135879>
- Wang, Y., Zhao, L., Otto, A., Robinius, M., & Stolten, D. (2017). A Review of Post-combustion CO2 Capture Technologies from Coal-fired Power Plants. *Energy Procedia*, 114, 650–665. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1209>
- Weidner, E., & Pollak, S. (2015). Einsatz und Verwendung von CO2. In *CO2: Abtrennung, Speicherung, Nutzung* (Vol. 2, pp. 93–110). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19528-0_5
- Weinhold, T., Bekavac, B., Schneider, G., & Bauer, L. (2011). *Wissenschaftliche Suchmaschinen-Übersicht, Technologien, Funktionen und Vergleich*. https://edoc.unibas.ch/30331/1/20131118212005_528a7675e5c05.pdf
- Wilcox, J., Psarras, P. C., & Liguori, S. (2017). Assessment of reasonable opportunities for direct air capture. *Environmental Research Letters*, 12(6), 065001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6de5>
- Wohland, J., Witthaut, D., & Schlessner, C.-F. (2018). Negative Emission Potential of Direct Air Capture Powered by Renewable Excess Electricity in Europe. *Earth's Future*, 6(10), 1380–1384. <https://doi.org/10.1029/2018EF000954>
- Zeman, F. (2014). Reducing the cost of ca-based direct air capture of CO2. *Environmental Science and Technology*, 48(19), 11730–11735. <https://doi.org/10.1021/es502887y>

9 Anhang

9.1 Finaler Pool der Literaturrecherche

Identifikationsnummer	Autoren	Titel	Jahr
#1	C Chen, M Tavoni	Direct air capture of CO ₂ and climate stabilization: a model based assessment	2013
#2	F Zeman	Reducing the Cost of Ca-Based Direct Air Capture of CO ₂	2014
#3	M Broehm, J Strefler, N Bauer	Techno-economic review of direct air capture systems for large scale mitigation of atmospheric CO ₂	2015
#4	KS Lackner	State of Direct Air Capture	2015
#5	A Marcucci, S Kypreos, E Panos	The road to achieving the long-term Paris targets: energy transition and the role of direct air capture	2017
#6	J Wilcox, PC Psarras, S Liguori	Assessment of reasonable opportunities for direct air capture	2017
#7	C van der Giesen, CJ Meinrenken...	A Life Cycle Assessment Case Study of Coal-Fired Electricity Generation with Humidity Swing Direct Air Capture of CO ₂ versus MEA-Based Postcombustion Capture	2017
#8	Y Ishimoto, M Sugiyama, E Kato, R Moriyama...	Putting costs of direct air capture in context	2017
#9	M VITALI	The role of direct air capture to meet the Paris climate agreement: a multi model assessment	2017

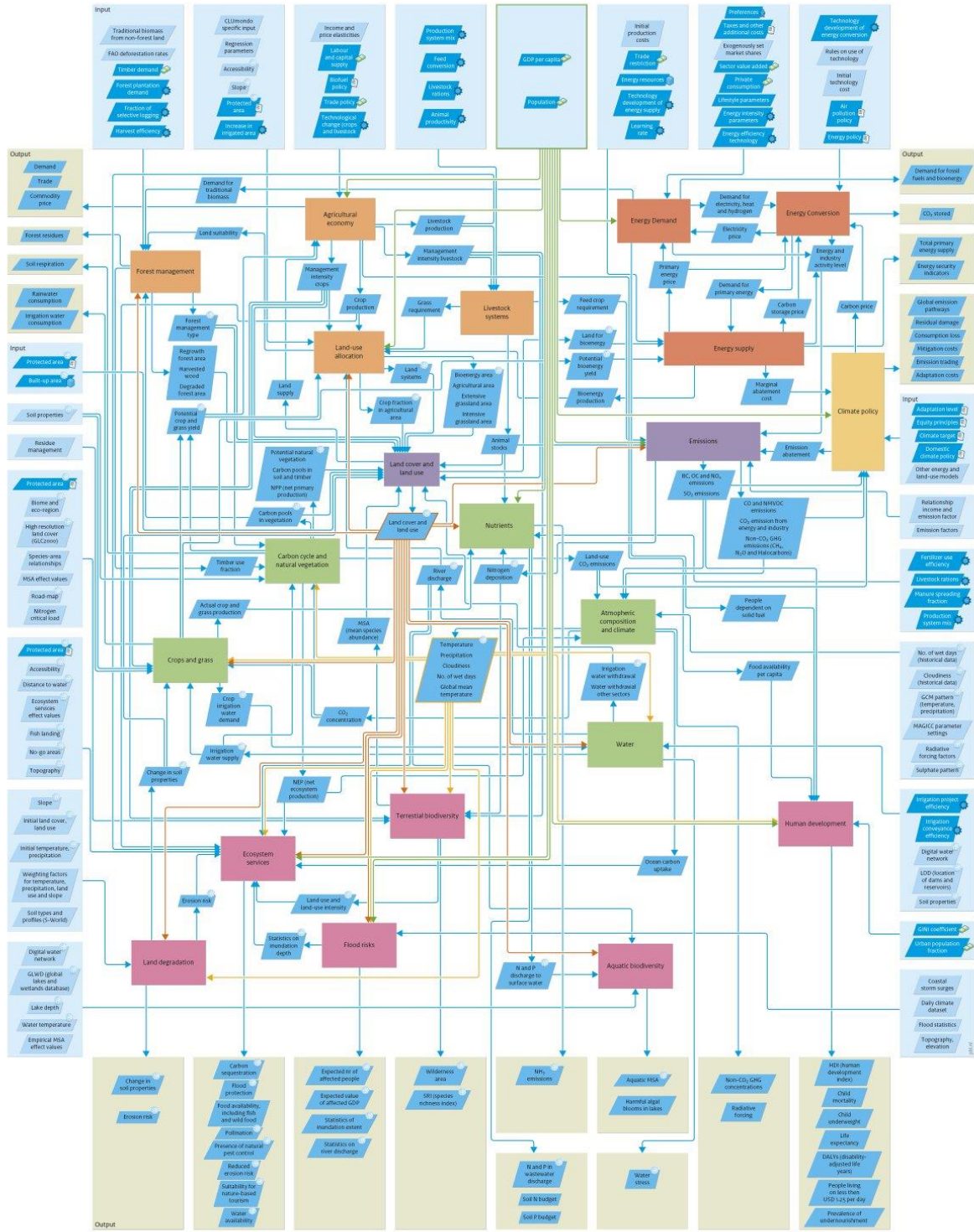
#10	H Rahmanifard, T Plaksina	A Technical and Economic Assessment of Direct Air Capture with Zeolite 13X and Sequestration Systems	2017
#11	HA Daggash, CF Patzschke, CF Heuberger...	Closing the carbon cycle to maximise climate change mitigation: power-to-methanol vs. power-to-direct air capture	2018
#12	J Wohland, D Witt-haut, CF Schleussner	Negative emission potential of direct air capture powered by renewable excess electricity in Europe	2018
#13	G Realmonte	Direct air capture and negative emission technologies in deep mitigation pathways	2018
#14	M Fasihi, O Efimova, C Breyer	Techno-economic assessment of CO2 direct air capture plants	2019
#15	G Realmonte, L Drouet, A Gambhir, J Glynn...	An inter-model assessment of the role of direct air capture in deep mitigation pathways	2019
#16	H Azarabadi, KS Lackner	A sorbent-focused techno-economic analysis of direct air capture	2019
#17	C Beuttler, L Charles, J Wurzbacher	The role of direct air capture in mitigation of anthropogenic greenhouse gas emissions	2019
#18	C Breyer, M Fasihi, C Bajamundi, F Creutzig	Direct air capture of CO2: A key technology for ambitious climate change mitigation	2019
#19	A Gambhir, M Tavoni	Direct air carbon capture and sequestration: how it works and how it could contribute to climate-change mitigation	2019

#20	P Viebahn, A Scholz, O Zelt	The Potential Role of Direct Air Capture in the German Energy Research Program—Results of a Multi-Dimensional Analysis	2019
#21	BR Sutherland	Pricing CO2 Direct Air Capture	2019
#22	C Breyer, M Fasihi, A Aghahosseini	Carbon dioxide direct air capture for effective climate change mitigation based on renewable electricity: a new type of energy system sector coupling	2020
#23	S Chatterjee, KW Huang	Unrealistic energy and materials requirement for direct air capture in deep mitigation pathways	2020
#24	N McQueen, P Psar- ras, H Pilorgé...	Cost Analysis of Direct Air Capture and Sequestration Coupled to Low-Carbon Thermal Energy in the United States	2020
#25	S Deutz, A Bardow	How (Carbon) Negative Is Direct Air Capture? Life Cycle Assessment of an Industrial Temperature-Vacuum Swing Adsorption Process	2020
#26	A Caskie	Technical, policy and stakeholder analysis of direct air capture	2020
#27	V CORTES, C LASKA	Economics of Direct Air Capture of Carbon Dioxide	2020
#28	E Pernot	Something in the Air? Assessing the Role of Direct Air Capture in the Energy Transition	2021

Tabelle 5 Finaler Pool der Literaturrecherche

9.2 Beispiel der Inputs und Outputs des IMAGE IAMs

Image 3.0 in detail



Source: PBL 2014

Abbildung 8 Inputs und Outputs des IMAGE IAM (Evans & Hausfather, 2018)

9.3 Priorisierung der Quantitativen Ergebnisse der Literaturrecherche

	<i>Häufigkeit</i>	<i>Summe</i>	<i>Prio Klasse</i>
<i>Speicherkapazität von CO₂</i>	16	20	3
<i>Beschaffenheit der Luft</i>	4	6	4
<i>Verfügbarkeit von Abwärme</i>	18	26	2
<i>Strommix</i>	24	48	1
<i>Soziale Akzeptanz</i>	5	6	4
<i>Unterstützung der Politik</i>	18	30	2
<i>Variable Kosten</i>	28	52	1
<i>Fix Kosten</i>	26	37	1
<i>Einsatz anderer NET</i>	4	5	4
<i>Technologische Verbesserungen durch R&D</i>	23	34	1
<i>günstig Energie- /Wärme-preise</i>	18	29	2
<i>Sorptionsmittel</i>	12	18	3
<i>CO₂ Markt und Preis besteht</i>	21	27	2
<i>Anzahl an gebauten DAC Anlagen</i>	23	28	1
<i>Median</i>	18	27.5	-

Tabelle 6 Quantitative Ergebnisse der Literaturrecherche und Priorisierung

9.4 Interview Leitfaden

Leifrage	Memospalte	Weiterführende Fragen
Was ist ihr Hintergrund zum Thema Direct Air Capture (and Storage)?	Ausbildung, Anzahl Jahre Erfahrung, Firma	
Was denken Sie wird DAC in Zukunft für eine Rolle spielen?		
Verschiedene Studien kommen auf eine Kapazität von DAC von 10Gt/Jahr bis 2100 realistisch wäre andere auf eine von 40/Gt/Jahr bis 2100. Was ist ihre Meinung zur Machbarkeit einer Installation von DAC Anlagen in dieser Menge?	Je nach Kompetenz	Können Sie noch weiter ausführen? Hat sich Ihre Meinung zu DAC im Verlaufe der Zeit geändert?
Welche Faktoren sind aus Ihrer Sicht entscheidend dafür, ob sich DAC durchsetzen wird?		Was denken Sie über die Verschiebung der Dringlichkeit in die Zukunft? Eher positiv oder Riskant?
Auf meine präsentierten Narrative bezogen, als wie realistisch schätzen sie ein, dass diese passieren?	Siehe nächste Tabelle	Sie schätzen ... als ... ein. Weshalb denken Sie so?
Haben Sie noch weitere Anmerkungen wie auf was in Zukunft geachtet werden muss?		

Tabelle 7 Interview Leitfaden

<p>Treiber: Politik</p> <p>Ereignis: Erkenntnis für Bedeutung von DAC wächst. Z.B. aufgrund von XYZ Förderung von Subventionen für DAC, CO2 Gesetze welche DAC unterstützen, Anforderungen an den Strommix bezüglich grüner Energie</p>	<p>1 2 3 4 5</p> <p><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p> <p>Anmerkungen:</p>
<p>Treiber: Wirtschaft</p> <p>Ereignis: Es werden weitere Anwendungsmöglichkeiten für CO2 in ausreichender Grösse gefunden. Bis dahin werden schon bestehende Nischen Märkte wie Mikroalgen Produktion oder EOR genutzt während sich ein grösserer Markt entwickelt (z.B Power-to-Fuel). So kann ein globaler CO2 Preis entstehen zu dem CO2 verkauft werden kann.</p>	<p>1 2 3 4 5</p> <p><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p> <p>Anmerkungen:</p>
<p>Treiber: Private Investoren</p> <p>Ereignis: Es werden grosse Investoren, z.B grosse Tech Firmen wie z.B Apple, Microsoft oder Tesla gewonnen. Ihre Investitionen werden für weiteres R&D genutzt um technologische Durchbrüche zu schaffen und die Kosten drastisch zu senken.</p>	<p>1 2 3 4 5</p> <p><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p> <p>Anmerkungen:</p>

Tabelle 8 Ergebnisse der Literaturrecherche für Interviews aufbereitet

9.5 Codes für Codierung der Transkripte

Codesystem 133

<i>Überschuss nutzen</i>	2
<i>Neue Erkenntnisse</i>	7
<i>Dringlichkeit</i>	8
<i>Wird gebraucht/nicht gebraucht</i>	11
<i>Private Investoren</i>	5
<i>Preis um CO2 im Boden zu halten</i>	3
<i>Strenge Ziele</i>	3
<i>BIP Verluste mindern</i>	2
<i>Transport Infrastruktur</i>	5
<i>Anzahl an gebauten DAC Anlagen</i>	1
<i>CO2 Markt und Preis besteht</i>	14
<i>Sorptionsmittel</i>	1
<i>günstige Energie/Wärmepreise</i>	4
<i>Technologische Verbesserungen durch R&D</i>	4
<i>Einsatz anderer NETS</i>	18
<i>Kosten</i>	9
<i>Unterstützung der Politik</i>	22
<i>Soziale Akzeptanz</i>	0
<i>Strommix</i>	5
<i>Verfügbarkeit von Abwärme</i>	1
<i>Beschaffenheit der Luft</i>	0
<i>Speicherkapazität von CO2</i>	8

Tabelle 9 Codes aus MAXQDA zur Kodierung der Interviews