Report:
Evaluation zur Nutzung von Kohlendioxid (CO_2) als Rohstoff in der Emscher-Lippe-Region - Erstellung einer Potentialanalyse

Dezember 2016

Ansprechpartner Auftragnehmer: Tom Koch, Dr. Tanja Scheelhaase
Ansprechpartner Auftraggeber: Peter Karst, Dr. Klaus Rammert-Bentlage

Autoren: Tom Koch, Dr. Tanja Scheelhaase, Niklas Jonas, Maximilian Hungsberg, Daniel Osswald

Inhaltsangabe

1 Einleitung ... 3
2 Zirkuläre Wertschöpfung ... 5
2.1 Konzept der Zirkulären Wertschöpfung ... 5
2.2 Chancen einer regionalen Wertschöpfung ... 6
2.3 Potentiale für die Region Emscher-Lippe ... 7
2.4 CO_2 als Nährstoff für die Zirkuläre Wertschöpfung ... 8
3 Metastudie ... 10
3.1 CO_2 Abtrennung und Reinigung ... 15
3.1.1 Kohlendioxid: Quellen und mögliche Verunreinigungen ... 15
3.1.2 Verfahren zur Abtrennung von CO_2 aus Gasgemischen ... 17
3.1.3 Ökonomische Aspekte der CO_2-Abtrennung ... 19
3.2 Chemische Verfahren ... 21
3.2.1 Methanisierung ... 21
3.2.2 Herstellung von Kraftstoffen und Basischemikalien ... 21
3.2.3 Synthese hochwertiger organischer Produkte ... 26
3.2.4 Karbonatisierung ... 30
3.2.5 Direktnutzung ... 31
3.2.6 Photo- und elektrochemische Reduktion von CO_2 ... 32
3.3 Biologische Verfahren ... 33
3.3.1 Direktnutzung in der Landwirtschaft ... 34
3.3.2 Biologische Nutzung mittels Algenkulturen ... 34
3.3.3 Biotechnologische Nutzung mittels Mikroorganismen ... 40
4 Regionale Infrastruktur ... 42
4.1.1 Darstellung der wichtigsten Chemieparks in der Region ... 43
4.1.2 Erreichung der Klimaziele durch den Kohleausstieg ... 45
4.2 Spezifische regionale CO_2-Quellen ... 46
4.2.1 Kriterium 1: Menge der CO_2-Emissionen ... 48
4.2.2 Kriterium 2: Einschätzung der Kohlendioxidqualität ... 51
4.2.3 Kriterium 3: CO_2-Potentiale der Biogasaufbereitungsanlagen ... 54
4.2.4 Zusammenfassende Priorisierung der CO_2-Emittenten ... 55
4.3 Potentielle regionale Abnehmer von CO_2 ... 57
4.4 Nutzung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien ... 61
4.4.1 Akteure in der Region ... 62
4.4.2 Unternehmen in der Region ... 62
4.4.3 Wasserstoff-Projekte in der Region ... 63
4.4.4 Wasserstoff-Infrastruktur ... 64

4.5 Prognose und Speicherbedarf erneuerbarer Energien 65
5 Geeignete Techniken und Konzepte für die Region.....69
5.1 Ergebnisse der Nutzungsmöglichkeiten für CO_2 als Rohstoff in der Region 69
5.1.1 Potentialanalyse der Mengen des nutzbaren CO_2..... 69
5.1.2 Identifikation potentiell geeigneter Techniken für die Emscher-Lippe-Region.... 70
5.2 Priorisierte Verfahren 74
5.3 Projektskizzen 75
5.4 Strategien zum Ausbau synergetisch vernetzter Kooperationen zwischen Unternehmen..... 83
6 Qualitative Interviews 85
7 Zusammenfassung.....97
8 Literaturverzeichnis 103
9 Anhang.....111

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Transformation eines regionalen Wertschöpfungsmodells. 6
Abbildung 2: CO_2 in biologischen und technischen Kreisläufen. 8
Abbildung 3: Akteure in der Forschung & Entwicklung von CCU-Technologien. 11
Abbildung 4: BioPower2Gas-Anlage.....14
Abbildung 5: Verfahren zur CO_2-Abtrennung nach Kraftwerkstyp. 17
Abbildung 6: Reaktionsgleichung der Methanisierung. 21
Abbildung 7: Kohlendioxid-Wertschöpfungskette im Bereich Kraftstoffe und Basischemikalien einschließlich der Methanisierung.....22
Abbildung 8: Reaktionsgleichung der umgekehrten Wassergas-Shift Reaktion zu Erzeugung von Synthesegas.....23
Abbildung 9: Reaktionsschema der Synthesegaserzeugung mittels eines Zink/Zinkoxid-Zyklus.....23
Abbildung 10: Synthese und Wertschöpfungsketten von Synthesegas und der Fischer-Tropsch-Synthese. 24
Abbildung 11: Reaktionsgleichung für die direkte Synthese von Methanol aus CO_2. 25
Abbildung 12: Reaktionsschema der Alkoholyse von Harnstoff. 27
Abbildung 13: Reaktionsschema zur Produktion von DME durch die Umesterung von Ethylencarbonat mit Methanol. 27
Abbildung 14: Direkte Synthese von Dimethylcarbonat aus Methanol. 28
Abbildung 15: Allgemeines Reaktionsschema für Polycarbonate.. 28
Abbildung 16: Synthese von Polyethercarbonat-polyolen aus Propylenoxid und CO_2 unter Anwesenheit von Dimethyl-carbonat. 29
Abbildung 17: Reaktionsgleichung für die Harnstoffsynthese aus CO_2 und Ammoniak.....29
Abbildung 18: Darstellung der Wertschöpfungskette von Kohlendioxid. 30
Abbildung 19: Künstliche Bäume nach Influx Studio 32
Abbildung 20: EADS erster Flug mit einem Algentreibstoff betriebenem Flugzeug 36
Abbildung 21: Fotobioreaktoren der RWE-Algenprojekt in Bergheim-Niederaussem 38
Abbildung 22: BIQ - Das Algenhaus 38
Abbildung 23: Kooperation von BASF mit Solix Biofuels.....39
Abbildung 24: Die Emscher-Lippe-Region. 42
Abbildung 25: Chemiepark Marl 43
Abbildung 26: Chemiepark Gelsenkirchen-Scholven 44
Abbildung 27: Industriepark Castrop-Rauxel 44
Abbildung 28: Industriepark Dorsten/Marl.....45
Abbildung 29: Emissionskataster Emscher-Lippe 47
Abbildung 30: CO_2-Emissionen nach Sektoren.....48
Abbildung 31: Wasserstoff Pipeline-Netz.....64

Abbildung 32: Szenarien zum Anteil erneuerbarer Energien am Strombedarf. 66
Abbildung 33: Jahresganglinie Stromlast und fluktuierende Stromeinspeisung.....67
Abbildung 34: Funktionsprinzip von Power-to-Gas mit Wirkungsgradverlusten in der Prozesskette. 67
Abbildung 35: Relevante Akteure der Region und ihre Zusammenführung.....84

Tabelle 1: Kohlendioxid – Quellen und mögliche Verunreinigungen 16
Tabelle 2: Verfahren zur Abtrennung von CO_2 aus Gasgemischen. 18
Tabelle 3: Kosten und Wirkungsgrade der CO_2-Abscheidung bei Kohlekraftwerken.....19
Tabelle 4: Strombedarf durch CO_2-Abscheidung. 20
Tabelle 5: CO_2-Einbindung in Biomasse 33
Tabelle 6: CO_2-Emissionen in Tonnen pro Jahr (2012) auf regionaler Ebene.....47
Tabelle 7: CO_2-Emissionen der Chemischen Industrie (EKL-NRW, 2012) 49
Tabelle 8: CO_2-Emissionen des Energiesektors / Raffinerien (EKL-NRW, 2012).....50
Tabelle 9: CO_2-Emissionen der Metallindustrie (EKL-NRW, 2012) 51
Tabelle 10: CO_2-Emissionen Sonstiger Industrien (EKL-NRW, 2012).....51
Tabelle 11: Anforderungen an Kohlendioxid für den Pipelinetransport.....52
Tabelle 12: CO_2-Potential Biogasaufbereitung Dorsten. 54
Tabelle 13: CO_2-Potential durch Erweiterung der Biogasaufbereitung. 55
Tabelle 14: Szenarien zum Anteil erneuerbarer Energien am Strombedarf. 65
Tabelle 15: Potential zur Wasser-Elektrolyse und Methanisierung von Überschussstrom. ...68
Tabelle 16: Identifizierte Technologien für die Emscher-Lippe-Region 72
Tabelle 17: Aufzählung der Priorisierten Verfahren für die Emscher-Lippe-Region.....74

1 Einleitung

Die industrielle Entwicklung der vergangenen Jahrzehnte und die damit verbundenen steigenden CO_2-Emissionen sind maßgeblich für den anthropogenen Klimawandel verantwortlich. Um dieser Entwicklung entgegenzusteuern, fokussierten sich Regulatoren, Industrien und Umweltschützer insbesondere auf CO_2-Reduktionssysteme. Seit einigen Jahren forschen Wissenschaftler, auch im Rahmen der fortschreitenden Energiewende, an einem positiven Ansatz, den sogenannten „Carbon Capture and Utilization"(CCU)-Technologien. Das Ziel: Ähnlich wie in der Natur, in der Kohlenstoffdioxid durch die Photosynthese stetig in einem natürlichen Kreislauf gehalten werden kann, soll es die Erforschung dieser Methoden zukünftig ermöglichen, CO_2 als industriellen Rohstoff wieder nutzbar zu machen und somit einen technischen Kohlenstoffkreislauf entstehen zu lassen. CO_2 würde nicht länger nur als ein in der Industrie anfallendes „schädliches" Abfallprodukt (Emissionen), sondern vielmehr als ein potentieller Rohstoff betrachtet werden [(1)].

Dass Kohlenstoffdioxid bereits genutzt werden kann und eine CO_2-Abtrennung und -Nutzung aus Abgasströmen heutzutage technisch realisierbar ist, zeigen verschiedene Beispiele, insbesondere im Chemiesektor. Auch wird CO_2 u.a. zur Herstellung von Produkten, zur Nahrungsmittelproduktion oder für die Feinchemie verwertet. Es wird geschätzt, dass jedes Jahr etwa 2 Milliarden Tonnen CO_2 für die Produktion von Rohstoffen industriell genutzt werden könnten [(2)].

Im Vorfeld einer potentiellen Implementierung der genannten Umwandlungsverfahren gilt es verschiedene Fragen zu beantworten:

- Ist CO_2 aus Abgasströmen eine geeignete Kohlenstoffquelle für die Ausgangsstoffe der Chemischen Industrie?
- Kann man die Überschussenergie aus regenerativen Quellen sinnvoll in H_2 speichern und daraus am Ende der Prozesskette in Verbindung mit CO_2 Rohstoffe (wie etwa Feinchemikalien) herstellen?
- Können diese Verfahren dazu beitragen das Stromnetz zu stabilisieren und die Energiewende voranzutreiben?
- Kann durch die Verwendung von CO_2 als Rohstoff der Treibhauseffekt reduziert werden? Sind entsprechende Mengen überhaupt möglich oder bleibt die Nutzung von CO_2 langfristig Nische-Thema?
- Wo liegen die „großen Stellschrauben": Bei der Umstellung auf regenerative Energien oder der Substitution von fossilen Kohlenstoffträgern als Ausgangssubstanz für die Chemische Industrie?
- Welche sind die effektivsten Einsatzmöglichkeiten und Speichertechnologien für Überflussstrom aus erneuerbaren Energien? Gibt es Möglichkeiten in der Chemischen Industrie, fakultativ anfallende Überschussenergie sinnvoll zu nutzen?

Diese Fragen werden im Rahmen dieser Studie für eine potentielle Nutzung von CO_2 als Rohstoff in der sich in Nordrhein-Westfalen befindenden Emscher-Lippe-Region untersucht.

Die Emscher-Lippe-Region, traditionell geprägt durch eine Bergbau- und Chemieindustrie, hat sich in den vergangenen Jahrzehnten zu einem Standort für innovative Zukunftstechnologien und moderne

Dienstleistungen entwickelt. Den zukünftigen Herausforderungen des Klimawandels und der zunehmenden Ressourcenknappheit stellt sich die Region mit der Entwicklung einer zirkulären Wertschöpfung, die den Weg vom Recycling zum Upcycling ebnen und das Wirtschaftswachstum vom Verbrauch von Primärrohstoffen entkoppeln soll. Das Ziel: Langfristig Stoffkreisläufe schließen und somit Ressourcen schonen. Für die Nutzung von CO_2 als Rohstoff bedeutet dies, dass CO_2 als „Abfall" des einen Unternehmens als Rohstoff zur Herstellung eines neuen Produktes für ein anderes Unternehmens verwendet werden könnte.

Eine zirkuläre Wertschöpfung, sowie ein durch die Nutzung von CO_2 betriebener Klimaschutz, werden als Fortschrittsmotor begriffen, der die CO_2-Emissionen reduzieren und die Wirtschaftskraft in der Emscher-Lippe-Region erhöhen kann. Hierfür müssen Akteure aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik verstärkt zusammenarbeiten, um die Potentiale einer zirkulären Wertschöpfung für die wirtschaftliche Entwicklung, Ressourcenschonung und Klimaschutz zu entfalten und bisherige Lücken in den Wertschöpfungsketten zu schließen.

Um die Potentiale einer möglichen Implementierung verschiedener CCU-Technologien[1] abzuschätzen und beurteilen zu können, werden in der vorliegenden Studie die Grundlagen der Zirkulären Wertschöpfung dargestellt (Kap. 2), die CO_2-Abtrennungsverfahren sowie biologische und chemische Nutzungstechnologien untersucht (Kap. 3), die regionale Infrastruktur hinsichtlich ihrer CO_2-Emittenten und potentiellen Abnehmer analysiert (Kap. 4) und geeignete Technologien für die Emscher-Lippe-Region vorgestellt (Kap.5). Abschließend werden diese in Form von Experteninterviews mit Akteuren aus der Region diskutiert.

[1] Manche Literaturquellen verwenden auch den synonymen Begriff CCR (Carbon Capture and Reuse/Recycling)

2 Zirkuläre Wertschöpfung

Vor dem Hintergrund des Strukturwandels und den damit verbundenen regionalen wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und ökologischen Herausforderungen wurde im Rahmen des Umbau 21 [(3)] der Emscher-Lippe-Region der Ansatz der Zirkulären Wertschöpfung aufgenommen. Dieser soll dazu beitragen, das übergeordnete Ziel - die Stabilisierung der Region sowie die Förderung neuer Entwicklungsimpulse – zu erreichen.

2.1 Konzept der Zirkulären Wertschöpfung

Ressourcenverschwendung sowie die damit einhergehende Ressourcenknappheit und -verteuerung sind schon jetzt erhebliche Probleme für viele Industriezweige, die sich in der Zukunft noch verstärken werden. Der Ansatz der „Zirkulären Wertschöpfung“ bietet Unternehmen eine zukunftsfähige und profitable Alternative zur linearen Durchlaufwirtschaft. [(1)] Das Konzept einer Zirkulären Wertschöpfung ist eine Innovationsplattform, die das wirtschaftliche Wachstum von Primärrohstoffen entkoppelt und dadurch unabhängig von einer voranschreitenden Ressourceneffizienz die Ressourceneffektivität in den Vordergrund stellt. Wachstum ist trotz einer Primärrohstoffverknappung möglich. Dadurch hat die Zirkuläre Wertschöpfung ein enormes ökonomisches und ökologisches Potential.

Zukunftsorientierte strategische Entscheidungen über das Stoffstrommanagement werden durch Impulse einer Circular Economy gelenkt, die gezielt restaurativ oder regenerativ aufgebaut ist. Dabei ist das Konzept, welches an Cradle to Cradle® bzw. die neue „Circular Economy“ (CE) angelehnt ist, deutlich weitreichender als das der gegenwärtigen deutschen Kreislaufwirtschaft. Der Ansatz von Cradle to Cradle® und somit auch der Zirkulären Wertschöpfung zielt darauf ab, von Anfang an die richtigen Weichen für zukunftsfähige Material- und Stoffströme zu stellen, um dauerhaft funktionierende und gewinnbringende Kreisläufe zu etablieren. Dabei wird Abfall eliminiert und durch das Konzept des Rohstoffes / Nährstoffes ersetzt. In einem holistischen Gesamtkonzept wird die Verbesserung der Qualität und die Erhöhung des Materialmehrwerts entlang der Lieferketten, der Herstellung, über die Nutzung, bis hin zur Entsorgung und Wiederverwertung betrachtet.

Wertschöpfungsprozesse in der Industrie und in den nachgelagerten Dienstleistungsbereichen sollen so – als hybride Wertschöpfung –im Sinne eines innovationsbasierten und qualitativen Wachstums weiterentwickelt werden. Beispielsweise könnte dieses insbesondere in der Region Emscher-Lippe als Leuchtturm etabliert werden, da dort offenbar aufgrund der Wirtschaftsstruktur ideale Voraussetzungen herrschen.

CO_2 wird im Sinne einer Zirkulären Wertschöpfung als Nährstoff und Ressource verstanden. Wenn CO_2 als Treibhausgas in die Atmosphäre gelangt, ist dieses ein Missmanagement im Umgang mit der Ressource Kohlenstoff. Es besteht der Anspruch, durch geeignete Umwandlungsschritte den im CO_2 enthaltenen Kohlenstoff wieder nutzbringend als Grundstoff der chemischen Industrie zum Einsatz zu bringen oder in den “Biologischen Kreislauf” zu re-integrieren. Eine technische Nutzung zielt darauf ab, fossile Kohlenstoffquellen zu substituieren und hat oftmals einen starken Bezug zur Transformation der Energieversorgung von fossilen zu regenerativ erzeugten Energieträgern (bspw. Power to Gas Technologien zur Methanherstellung aus H_2 und CO_2).

2.2 Chancen einer regionalen Wertschöpfung

Im Sinne des Stoffstrommanagementansatzes stellen Regionen wie die Emscher-Lippe-Region Systeme dar, welche oft stark durch den Import von Rohstoffen und Energie sowie einem entsprechend großen Finanzmittelabfluss geprägt sind. Dem steht die Erkenntnis gegenüber, dass Stoffstrommanagement und regionale Wertschöpfung durch neue zirkuläre Geschäftsmodelle dabei helfen können, vorhandene Potentiale umfassend zu nutzen und Investitionen auszulösen. Durch die auf diese Weise erzielten Wertschöpfungseffekte können Finanzströme nachhaltig regional gebunden werden und zur Stärkung sowie Attraktivität von Regionen beitragen. Nachfolgendes Systemmodell veranschaulicht dieses Potential einer regionalen zirkulären Wirtschaft.

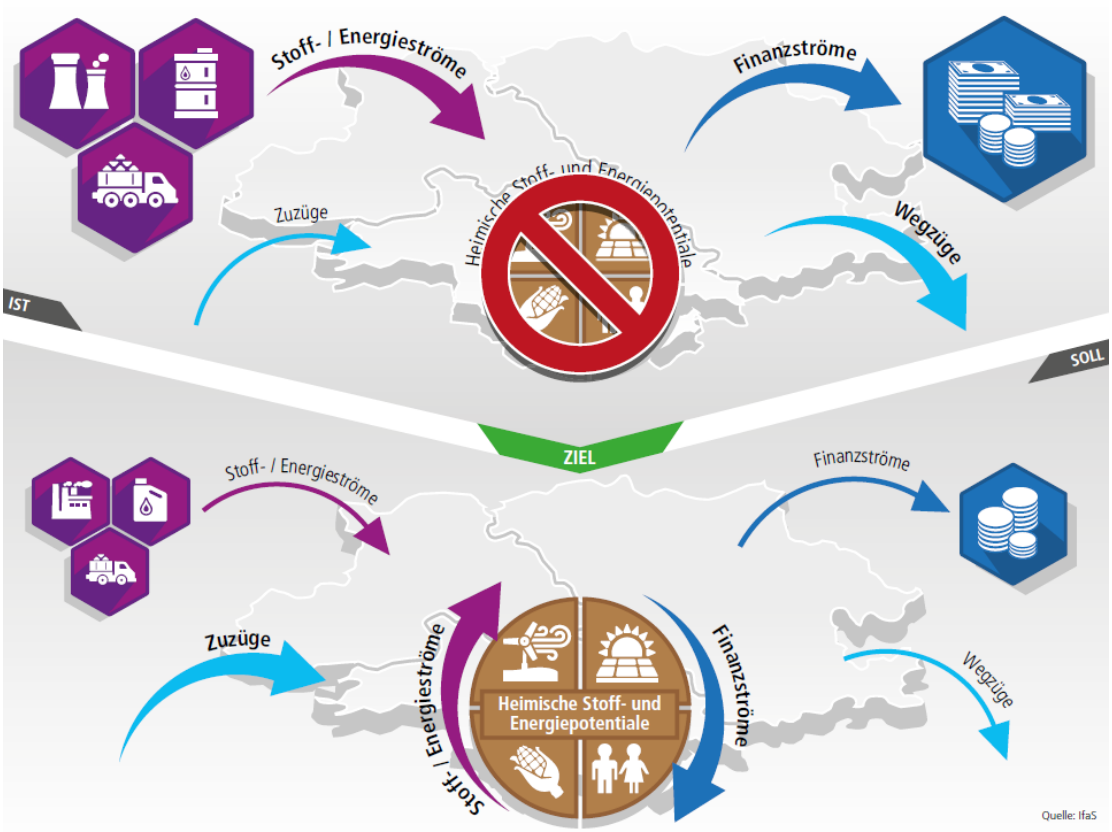


Abbildung 1: Darstellung der Transformation eines regionalen Wertschöpfungsmodells.

Die Konzeption und Einführung eines regionalen Stoffstrommanagements analysiert zunächst die Stoff- und Energieströme innerhalb eines Systems im Status quo. Dabei werden bereits Synergieeffekte und Optimierungspotentiale deutlich. Im Weiteren werden systematisch die regionalen Potentiale identifiziert, quantifiziert und ggf. monetär bewertet. Aus der Differenz werden Ziele für einen Entwicklungspfad zu mehr zirkulären Geschäftsmodellen und regionaler Wertschöpfung entwickelt. Schließlich lassen sich im Sinne eines Managementansatzes Maßnahmen in Form von konkreten Projekten identifizieren und priorisieren.

2.3 Potentiale für die Region Emscher-Lippe

Deutschland ist Pionier des grünen Wirtschaftswachstums und genießt weltweite Anerkennung als Entwickler und Hersteller hochinnovativer Produkte und Technologien. Neuartige Technologien und Geschäftsmodelle, die zur Umsetzung einer "Zirkulären Wertschöpfung" benötigt werden, sind allerdings vielfach noch in der Entwicklung oder frühen Phase der Markteinführung. Dies ist auch der Grund, warum die Europäische Kommission aktuell ein Forschungsprogramm über 650 Mio. € zum Thema Circular Economy aufgelegt hat und erste Strategiepapiere [(2)] veröffentlicht.

Die WiN Emscher-Lippe GmbH hat früh erkannt, dass in den neu entstehenden Wirtschaftskonzepten und Technologien ein großes Potential für eine Weiterentwicklung der regionalen Wirtschaft liegt. Die vorliegende Studie soll die Potentiale einer Nutzung von Kohlendioxid (CO_2) als Rohstoff als ein zentrales Element der Zirkulären Wertschöpfung für den Wirtschaftsstandort Emscher-Lippe beleuchten und konkrete, regionalspezifische Handlungsempfehlungen erarbeiten. Es bietet sich an, in der Emscher-Lippe-Region, einer hochindustrialisierten Region mit dem Schwerpunkt in den Branchen Energie und Chemie, das Thema der „Zirkulären Wertschöpfung" aufzugreifen und den Fokus auf die stoffliche Nutzung von CO_2 (CCU Carbon Capture and Utilization) zu setzen. Ziel ist es, dass durch neue Konzepte die Region gestärkt und der Strukturwandel vorangetrieben werden.

Mit der zukünftigen Implementierung neuer innovativer Konzepte zur Wertschöpfung durch die Nutzung von CO_2 als Ressource beispielsweise unter Verwendung von Speicherstrategien der erneuerbaren Energien, wird das Ziel verfolgt, in der Emscher-Lippe-Region neue Wirtschaftszweige auf- und bestehende auszubauen. Durch synergetische Effekte zwischen Unternehmen erfolgt eine Stärkung des Standortes. In der Folge könnten nachhaltig neue Arbeits- sowie Ausbildungsplätze in allen Qualifikationsstufen geschaffen werden.

Die zu betrachteten Konzepte zur CCU beschränken sich nicht ausschließlich auf technische Lösungen zur chemischen Transformation von CO_2, sondern beinhalten auch "biologische Methoden" zur Nutzung von Kohlendioxid als Nährstoff, bspw. für Mikroorganismen. Zu den "Biologischen Methoden" gehört neben Pflanzenwachstum und Algennutzungskonzepten auch eine Fixierung des Kohlenstoffes in den Boden als Humus bzw. Substrat.

Die Ergebnisse dieser Studie werden als zentrales Instrument zur Stärkung der Region verstanden. Darauf basierend soll es möglich werden, die Zirkuläre Wertschöpfung in der Region Emscher-Lippe umzusetzen und diese somit zu einer Modellregion mit einer Vorreiterrolle zu transformieren.

2.4 CO_2 als Nährstoff für die Zirkuläre Wertschöpfung

Kohlendioxid (CO_2) hat unter allen klimawirksamen Gasen den größten Anteil am anthropogen verursachten Treibhauseffekt. Aufgrund der ubiquitären Verteilung der Emissionsquellen hat es aber andererseits das Potential, als Kohlenstoffquelle für Energieträger oder Chemierohstoffe genutzt zu werden. Durch Reduktion kann das stabile und reaktionsträge Molekül wieder in andere Verbindungsformen überführt werden, unter Aufbringung hoher Aktivierungsenergie. Hierfür stehen diverse Technologien und Katalysatoren zur Verfügung. Wird als Umwandlungsenergie regenerative Energie genutzt, entstehen eine Vielzahl interessanter und umweltfreundlicher Möglichkeiten zur Speicherung von Energie (bspw. als Methan oder flüssige Energieträger) oder zur Produktion von Chemikalien und Kunststoffen.

In der vorliegenden Studie werden die Möglichkeiten einer Nutzung von CO_2 als Rohstoff in der Emscher-Lippe-Region evaluiert. Ziel ist eine Nutzbarmachung der lokal anfallenden CO_2-Ströme aus der Industrie, welche zurzeit als Treibhausgas emittiert werden. Idealerweise sollte auf lange Sicht gesehen das CO_2 komplett in Kreisläufen geführt werden und somit keine Nettoemission in die Atmosphäre mehr entstehen. Dies ist ein wichtiger Baustein der Zirkulären Wertschöpfung und trägt zum Erreichen der regionalen, nationalen und internationalen Klimaschutzziele bei.

Durch verschiedene Konzepte zur Nutzung von CO_2 und der Umsetzung dazu nötiger, neuer CCU-Technologien sollen in Zukunft diese umweltbelastenden Stoffströme in Rohstoffe für die chemische Industrie oder in flüssige oder gasförmige Energieträger umgewandelt werden. Durch die Verwendung von regenerativer Energie für die Umwandlungsprozesse können klimaneutrale Energieträger erzeugt werden. Biotechnologische Verfahren bieten eine weitere effektive Nutzungsmöglichkeit. Folgende Abbildung zeigt ein vereinfachtes Konzeptbild, wie Kohlendioxid in technischen und biologischen Kreisläufen geführt werden kann.

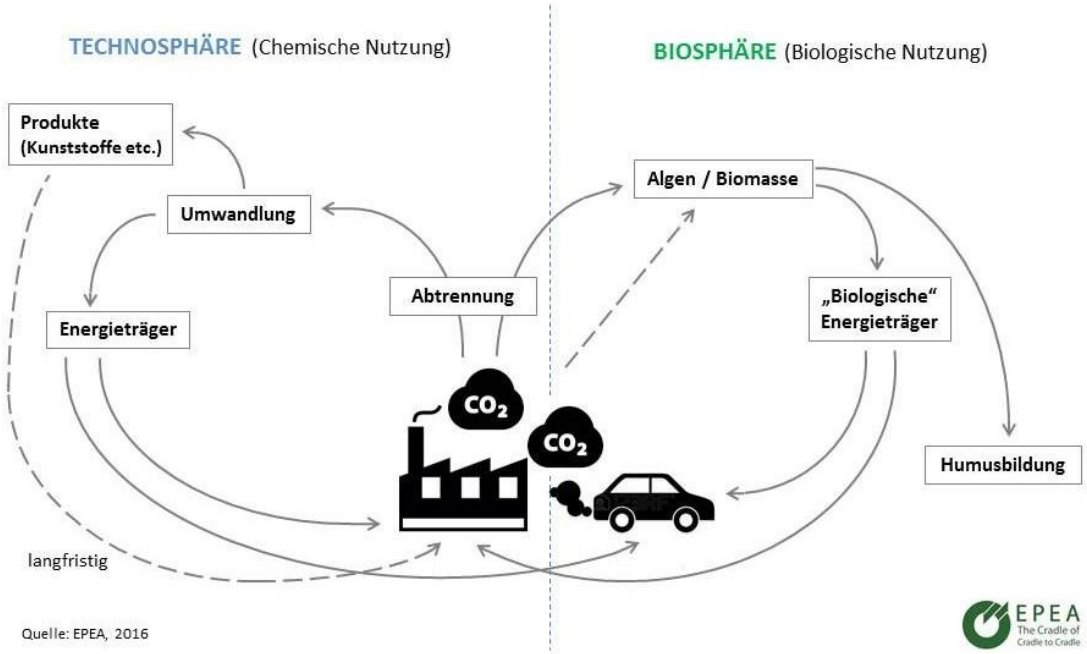


Abbildung 2: CO_2 in biologischen und technischen Kreisläufen.

Die industrielle Nutzung von CO_2 zur Erzeugung von flüssigen und gasförmigen Energieträgern sowie Chemierohstoffen ist ein wichtiges und aktuelles Thema in Politik, Industrie und Forschung. Viele neue Technologien befinden sind in der Entwicklung, Erprobung und Marktumsetzung. In diesem Sektor wird eine weitere dynamische Marktentwicklung erwartet, denn die Nutzung von CO_2 mit erneuerbaren Energien birgt große Potentiale.

3 Metastudie

Das Cradle to Cradle® Designkonzeptes postuliert, dass es auch bei unserem menschlichen Wirtschaften wie in der Natur keinen Abfall gibt, sondern alle Stoffe in Nährstoffkreisläufen zirkulieren. So ist auch das Treibhausgas CO_2 zu begreifen, welches in der Natur durch die Photosynthese stetig im biologischen Kreislauf gehalten wird.

Die seit der industriellen Revolution gesteigerten CO_2-Emissionen aus fossilen Quellen führen jedoch dazu, dass ein Überschuss an CO_2 in der Atmosphäre entstanden ist, der nun maßgeblich für den anthropogenen Klimawandel verantwortlich ist. Um dieser Entwicklung entgegenzusteuern und die weltweiten CO_2-Emissionen zu verringern, forschen Wissenschaftler seit vielen Jahren an den „Carbon Capture and Utilisation“ (CCU)-Technologien. Diese Technologien zur CO_2-Wiederverwertung bieten nun die Chance, den natürlichen Kreislauf zu imitieren. Die Entwicklung dieser Methoden erzielt große Fortschritte und soll zukünftig ermöglichen, CO_2 als industriellen Rohstoff wieder nutzbar zu machen und somit einen technischen Kohlenstoffkreislauf entstehen zu lassen. Dabei muss aber das stabile und energiearme Molekül CO_2 wieder in einen höherwertigen Kohlenstoff überführt werden, was eine Aktivierung vorrausetzt. Dies wird möglich durch die Entwicklung neuer chemischer Prozesse, zum Beispiel in der Katalyseforschung. Die Herausforderung ist hierbei, energieeffiziente Prozesse zu finden. [(3)]

Die Nutzung dieser Technologien lässt sich jedoch nur auf eine begrenzte Menge an CO_2 anwenden. Es wird geschätzt, dass jedes Jahr etwa 180 Millionen Tonnen CO_2 durch eine industrielle Nutzung und rund 1,8 Milliarden Tonnen CO_2 in Form von Kraftstoffen genutzt werden könnten. Betrachtet man die Gesamtmenge der globalen, vom Menschen produzierten CO_2-Emissionen, beträgt dieser nutzbare Anteil nur etwa fünf Prozent. [(2)] Auch die Bindung des CO_2 ist je nach Technologie zum Teil nur von begrenzter Dauer: Da das CO_2 z.B. als Rohstoff für Produkte nur für die Produktlebensdauer gespeichert ist, wird es langfristig in die Atmosphäre emittiert werden, insofern es nicht wieder aus den Abgasen gewonnen wird. Einer der größten Vorteile der CCU-Technologien ist daher nicht zwangsläufig die Speicherung von CO_2, sondern vielmehr der reduzierte Verbrauch fossiler Ressourcen, die ansonsten für die industrielle Produktion verwendet würden. In Verbindung mit der Nutzung erneuerbarer Energien stellen sie somit eine wichtige Alternative dar, um fossile Rohstoffe zu substituieren und CO_2 langfristig in Kreisläufen zu halten. [(2)]

CO_2 sollte daher nicht länger nur als ein in der Industrie anfallendes schädliches Abgas, sondern vielmehr als potentieller Rohstoff angesehen werden. Bisher wurde die Reduktion bzw. die Nutzung von CO_2 als Wirtschaftshemmnis betrachtet, welches zur Minderung des Klimawandels zwar bedeutend ist, aber ökonomisch keine Vorteile bot. Durch die Nutzung von CO_2 als Rohstoff könnten die ökologischen Ziele hinsichtlich einer Reduktion der Treibhausgase ebenso erreicht werden wie wirtschaftliche Mehrwerte für die Industrie. Dass CO_2 auch bereits profitabel genutzt werden kann, zeigen verschiedene Beispiele, insbesondere im Chemiesektor. So wird CO_2 u.a. zur Herstellung von Produkten, zur Nahrungsmittelproduktion oder auch der Energieproduktion und –speicherung kosteneffektiv abgetrennt und wiederverwertet. Auch der Anbau von Algen, die sowohl zur Lebensmittelproduktion als auch für Biokraftstoffe genutzt werden können, erzielt große Fortschritte. [(4)]

Um die Entwicklung der CCU-Technologien weiter voranzutreiben, benötigt es eine enge Zusammenarbeit auf verschiedenen Ebenen. Akteure aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft fördern gemeinsam die Forschungsarbeit, um weitere Erkenntnisse hinsichtlich wirtschaftlicher und politischer Rahmenbedingungen sowie Lebenszyklusanalysen zu erlangen. [5]

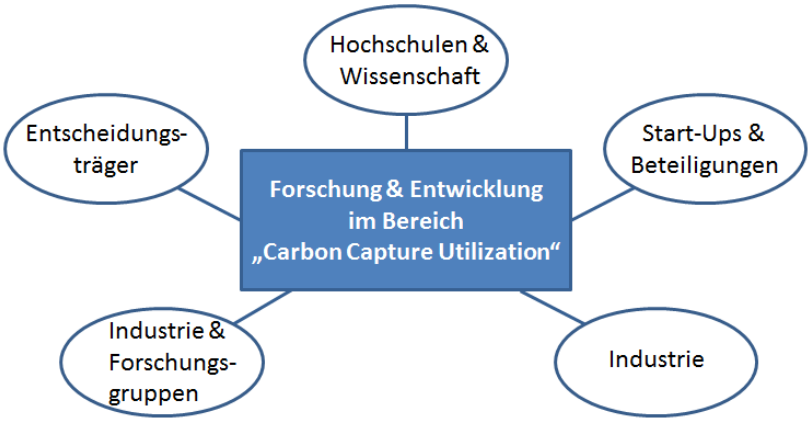


Abbildung 3: Akteure in der Forschung & Entwicklung von CCU-Technologien.

Für die Entwicklung neuer Technologien, insbesondere in frühen Entwicklungsphasen, spielen Hochschulen und Forschungsinstitute eine bedeutende Rolle. Die technische Umsetzung im kleinen Maßstab erfolgt häufig in Start-Ups und Beteiligungen, die Demonstration der Funktionalität im großen Maßstab meist durch große Industrieunternehmen in Kooperation mit Forschungsgruppen. Diese Zusammenarbeit zwischen Unternehmen und Forschungsgruppen ermöglicht zudem wichtige Lobbyarbeit, um Entscheidungsträger auf nationaler und internationaler Ebene zu überzeugen, neue Technologien finanziell zu fördern.

Im Folgenden wird nun ein kurzer Überblick darüber gegeben, welche Akteure aktuell an der Forschung und Entwicklung von CCU-Technologien beteiligt sind.

I) Förderung in Deutschland

Im Rahmen des Förderschwerpunktes „Technologien für Nachhaltigkeit und Klimaschutz – Chemische Prozesse und stoffliche Nutzung von CO_2“ fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) verschiedene Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bereich der CCU-Technologien. Zwischen 2010 und 2016 wurden 33 Projekte, die als Verbundprojekte zwischen Wirtschaft und Wissenschaft fungieren, mit insgesamt rund 100 Mio. € vom Staat und ca. 50 Mio. € aus der Industrie unterstützt. Zu den geförderten Bereichen zählen neben der Nutzung von CO_2 als Baustein für die Herstellung von Basischemikalien auch die stoffliche CO_2-Nutzung für die chemische Energiespeicherung sowie die CO_2-Abtrennung. [6] Das übergeordnete Ziel ist dabei sowohl die Entwicklung der Energiewende voranzutreiben, als auch die Vorgaben der Bundesregierung zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen zu erfüllen. [7]

Aufgrund der erfolgreichen Umsetzung der oben genannten Projekte, fördert das BMBF mit einer anschließenden Richtlinie „CO_2Plus – Stoffliche Nutzung von CO_2 zur Verbreiterung der Rohstoffbasis“ zwölf weitere Projekte mit insgesamt 15 Mio. €. Als Teil der Leitinitiative „Green Economy“ steht insbesondere die chemische Industrie im Mittelpunkt der Förderung, die als eine der größten Indust-

riezweige in Deutschland maßgeblich das nationale Wirtschaftswachstum beeinflusst. Durch die stoffliche Nutzung des CO_2 soll die Rohstoffbasis gesichert werden, um die Vorreiterrolle der deutschen Chemiebranche weiter zu stärken. Zusätzlich könnten so die CO_2-Emissionen der chemischen Industrie, die knapp 19 Millionen Tonnen Kohlenstoff für die stoffliche Nutzung verbraucht und insgesamt der drittgrößte industrielle Emittent von Treibhausgasen ist, deutlich reduziert werden. Bei „CO_2 Plus“ werden u.a. die stoffliche Nutzung von CO_2 in der Produktion und Entwicklung von Basischemikalien, die Verwendung erneuerbarer Energien bei der Nutzung von CO_2, die Methoden zur CO_2-Abtrennung sowie eine Stoffstromanalyse zur Betrachtung der relevanten CO_2-Stoffströme in Deutschland gefördert. (8)

Ein Beispiel aus der Chemieindustrie ist das Carbon2Chem® Projekt von Thyssenkrupp, das in Kooperation mit dem Fraunhofer- und dem Max-Planck-Institut durchgeführt wird. Damit soll CO_2, das bei der Stahlerzeugung anfällt, unter Verwendung überschüssiger erneuerbarer Energien Erdöl als Rohstoff ersetzen. Das vom BMBF mit mehr als 60 Millionen Euro geförderte Projekt soll in etwa 15 Jahren industriell anwendbar sein. (9)

II) Förderung auf internationaler Ebene

Auch international erhält das Thema der CO_2-Abtrennung und -Nutzung eine zunehmende Bedeutung. Insbesondere in Europa, oftmals gefördert durch die Europäische Union, gibt es bereits einige Einrichtungen und Initiativen, die eine Kohlenstoffdioxid-Nutzung erforschen und fördern.

Um die Klimaziele der Europäischen Union zu erreichen, nämlich die Reduktion der Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Basisjahr 1990 um 20% bis 2020 und um 40% bis 2030, wurde 2015 ein langfristiger Strategieplan entwickelt. Der neue „European Strategic Energy Technology Plan“ (SET-Plan) zielt u.a. darauf ab, die Forschung im Bereich der CCU-Technologien vermehrt zu fördern. (10) Eine dieser von der EU geförderten Initiativen ist „SCOT“, Smart CO_2 Transformation, welches in Europa als Forschungs- und Innovationsplattform die Nutzung von CO_2 weiterentwickeln soll. Das internationale Konzept wird durch Akteure aus Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Belgien und den Niederlanden unterstützt. Ziel von „SCOT“ ist die Implementierung einer europäischen Strategieagenda, die bereits entwickelte Transformationstechnologien optimiert und neuen Methoden zum Durchbruch verhelfen soll. Hierfür wird ein Joint Action Plan entworfen, der eine politische Umsetzung vorbereitet und langfristig verschiedene Akteure aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft zusammenführt. (11)

Ein von der britischen Regierung finanziertes Netzwerk ist das „CO2Chem“, welches insbesondere neue Lösungen im Bereich der chemischen Synthese fördert, bei der CO_2 als Rohstoff genutzt wird. Neben britischen Akteuren sind ebenso internationale Organisationen aktiv und forschen, im Gegensatz zum SCOT-Projekt, auch im Bereich der Carbon Capture & Storage Technologien. (12) Ein sehr ähnliches Konzept verfolgt das US-amerikanische „Research Coordination Network on Carbon Capture Utilization and Storage“ (RCN-CCUS), welches ebenfalls die interdisziplinäre Forschung im Bereich der CCU-Technologien fördert und koordiniert. (13)

III) Unternehmensaktivitäten

Neben den Aktivitäten auf politischer Ebene, sowohl national als auch international, investieren zusätzlich auch viele Unternehmen in Forschungsprojekte zur Schließung des Kohlenstoffkreislaufes und der damit verbundenen stofflichen Nutzung von CO_2. Insbesondere Unternehmen aus dem Energie- und Chemiesektor, die ständig ändernden Rohstoffpreisen ausgesetzt sind und abnehmenden Menge an fossilen Ressourcen gegenüberstehen, sind im Bereich der CCU-Technologien aktiv. Indem sie ihre CO_2-Emissionen aus den internen Industrieanlagen recyceln oder das CO_2 von Kooperationspartnern wiederverwenden, können diese Unternehmen mit energieintensiven Produktionsprozessen ihren ökologischen Fußabdruck verringern und ihre Rohstoffabhängigkeit reduzieren. Die zum Teil hohen Produktionskosten für CCU-Technologien sowie die niedrigen Preise pro emittierte Tonne CO_2 im Emissionshandel haben eine flächendeckende Nutzung zwar bisher verhindert. Mittelfristig kann diese Technologie allerdings die Industrien stärken und ihnen zu wirtschaftlichem Wachstum verhelfen. [(5)]

Viele der vom BMBF geförderten Projekte werden in Zusammenarbeit mit Forschungsinstituten und großen Unternehmen durchgeführt und zum Großteil auch finanziert. Eine im Juni 2016 von Covestro eröffnete Anlage in Dormagen, in der mit Kohlenstoff aus CO_2 Kunststoff hergestellt wird, stellt ein anschauliches Beispiel dar, welches in diesem Zusammenhang oft genannt wird. Das verwendete CO_2 wird von einem benachbarten Chemieunternehmen emittiert und von Covestro wiederverwertet. Insgesamt hat das Unternehmen rund 15 Mio. € in die neue Anlage investiert. [(14)] Im Bereich der Kunststoff-Herstellung laufen weltweit viele solcher Projekte und es konnten bereits einige Erfolge erzielt werden. Insbesondere die großen Konzerne wie Bayer, BASF, Evonik, Thyssenkrupp RWE oder Siemens sind Projektverantwortliche im Bereich der CCU-Technologien und der Entwicklung von sogenannten Power to X Methoden, mit denen Energie in Form von Gas, Wasser oder Chemikalien gespeichert wird. [(15)]

IV) Wasserstoff und Power to X-Methoden

Um die Entwicklung und Umsetzung der sogenannten Power to X Methoden voranzutreiben und der Öffentlichkeit zugänglich zu machen, bringt die Deutsche Energie Agentur (DENA) Experten aus Wissenschaft, Verbänden und der Wirtschaft auf der Strategieplattform „Power to Gas“ zusammen. Ziel der Plattform ist die Erstellung eines Potentialatlasses, mit dessen Hilfe geeignete Standorte für Power to Gas Anlagen identifiziert werden können, in denen z.B. erneuerbare Energien als Stromquelle sowie Industrieunternehmen als Abnehmer der Gase vorhanden sind. Eine anschließende Markteinführung der ersten rentablen Geschäftsmodelle ist für das Jahr 2022 angestrebt. [(16)]

Bei der Entwicklung von Power to Gas-Anlagen spielt der Rohstoff Wasserstoff eine wichtige Rolle. Dieser findet vermehrt Einsatz im Mobilitätssektor, da er als Kraftstoff in Brennstoffzellen keine Treibhausgasemissionen erzeugt und somit eine umweltfreundliche Alternative zu den fossilen Brennstoffen darstellt. In flüssiger und gasförmiger Form kann Wasserstoff zudem auch zur Energiespeicherung verwendet werden. Insbesondere regenerativ erzeugter Wasserstoff aus der Elektrolyse von Wasser kann unter Nutzung von CO_2 in Methan umgewandelt werden und somit als Kraftstoff für Fahrzeuge, zur weiteren chemischen Nutzung oder als Substitut für fossile Gase verwendet werden. Das synthetische Gas, das bei der Methanisierung entsteht, ist dabei beinahe identisch mit fossilem Erdgas. [(16)]

Dass dies auch in der Praxis rentabel umgesetzt werden kann, zeigt ein Projekt von Viessmann, an deren Hauptsitz die weltweit erste Power-to-Gas-Anlage eingeweiht wurde, die ein biologisches Verfahren zur Methanisierung nutzt. Bei dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Forschungsprojekts „BioPower2Gas“ wird aus überschüssiger regenerativer Energie, in diesem Fall Wind- und Solarstrom, unter Verwendung von Wasser mithilfe eines Elektrolyseurs Wasserstoff hergestellt. Zusammen mit CO_2 aus einer benachbarten Biogasanlage wird der Wasserstoff anschließend in Methangas umgewandelt. [17] Die Kombination von Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid spielt aufgrund der praktikablen Umsetzung daher auch im weiteren Verlauf dieser Studie eine wichtige Rolle.

Abbildung 4: BioPower2Gas-Anlage.

3.1 CO_2 Abtrennung und Reinigung

Um Kohlendioxid mit einem positiven Klimaeffekt wiederzuverwenden, ist es zunächst an den maßgeblichen Emissionsquellen zu fassen und für die Wiederverwendung aufzubereiten. Solange im Wirtschaftssystem fossile Brenn- und Rohstoffe verwendet werden, sind dort die größten Potentiale zur Fassung von CO_2 zu erwarten. Aber auch in einem Wirtschaftssystem ohne fossile Rohstoffe kann CO_2 eine wichtige Rolle als Kohlenstoffquelle in der Kreislaufwirtschaft einnehmen: In der Energiewirtschaft für synthetische Gase und flüssige Energieträger, in der Kunststoffproduktion, in der Nahrungsmittelproduktion und ggf. weiteren Branchen, die heute auf fossilem Kohlenstoff basieren. Die vorliegende Metastudie legt einen Fokus auf die CO_2-Abtrennung aus Verbrennungsprozessen fossiler Energieträger, da dort das größte Potential in der Emscher-Lippe-Region zu erwarten ist und auch der positive Klimaeffekt besonders zum Tragen kommt.

3.1.1 Kohlendioxid: Quellen und mögliche Verunreinigungen

Der globale, natürliche Kohlenstoffkreislauf ist nahezu geschlossen. Die anthropogene Freisetzung fossiler Kohlenstoffquellen führt jedoch zu einem Ungleichgewicht, welches durch die Wiederverwendung von CO_2 aus technischen Prozessen gemindert werden kann. Daher sind im Kontext der Metastudie die anthropogenen Quellen in der Technosphäre von besonderer Relevanz.

Grundsätzlich lassen sich die anthropogenen CO_2-Quellen in die energiebedingten und nicht-energiebedingten aufteilen, wobei die Emissionen aus der Umwandlung fossiler Energieträger zu Nutzenergie 92% der Gesamtemissionen ausmachen. Die nicht-energiebedingten Emissionen fallen durch chemische Umwandlungsprozesse insbesondere in der mineralischen, chemischen, und metallherstellenden Industrie an. [18]

Für die Emscher-Lippe-Region sind aufgrund der Wirtschaftsstruktur insbesondere die CO_2-Quellen aus Kohle- und Erdgaskraftwerken sowie der Chemieindustrie von Relevanz.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über grundsätzliche Kohlendioxidquellen, Verunreinigungen und Reinigungsverfahren.

Tabelle 1: Kohlendioxid – Quellen und mögliche Verunreinigungen. [19]

Quelle	mögliche Kontamination	Reinigungsverfahren
Nebenprodukt der Synthese von Wasserstoff und Ammoniak *	sehr gering	keine
Rauchgas	Schwefelwasserstoff oder Schwefeldioxid	alkalische Wäsche; Aktivkohlefilterung
Fermentationsprozesse	Schwefelwasserstoff, Schwefeldioxid, Aldehyde, Alkohole, Säuren	oxidative Wäsche mit Kaliumpermanganat; Aktivkohlefilterung
Kalzinierung von Karbonaten	sehr gering	keine
Natürliche Gasquellen	Methan, Schwefelwasserstoff	Aktivkohlefilterung; oxidative Wäsche; Methan wird in der Regel nicht entfernt

Häufige inerte Verunreinigungen sind Luft (Stickstoff, Sauerstoff und Argon) sowie Methan, Wasserstoff und Kohlenmonoxid

* zur Zeit wichtigste Quelle für industriell verwendetes CO_2

Die größte Emissionsquelle von CO_2 in der chemischen Industrie ist die Herstellung von Ammoniak, welches einen Grundstoff vieler Chemieprodukte darstellt. Das CO_2 fällt dabei als Nebenprodukt bei der Gewinnung von Wasserstoff aus (fossilen) Kohlenwasserstoffen an, wird aber in großem Umfang ohnehin bereits für die Weiterverwendung erfasst. [20]

Eine wesentliche CO_2-Quelle ist das Rauchgas aus der thermischen Umwandlung von Energieträgern. Dabei spielen insbesondere Stein- und Braunkohle- sowie Erdgaskraftwerke die entscheidende Rolle. Die Konzentration liegt bei etwa 10 – 18 Vol.% des Rauchgases. [19] Die Techniken für die Gewinnung sind verfügbar, werden bislang aber nur in Pilot- und Demonstrationsanlagen eingesetzt. Da die Abscheidung von CO_2 aus Kohle- und Gaskraftwerken eine wirksame Brückentechnologie zur Minderung der Treibhausgasanreicherung in der Atmosphäre darstellt, wird auf die gängigen Techniken ausführlicher in Abschnitt 3.1.2 eingegangen.

Fermentationsprozesse fallen unter die biologischen Prozesse zur Umwandlung von Biomasse zu Kohlenwasserstoffen und CO_2. Eine Abtrennung des CO_2 ist hier bspw. bei Biogasanlagen gängige Praxis, wobei der Prozess dabei primär der „Reinigung“ des Methans dient und eine CO_2-Weiterverwendung eher selten ist. Da es sich i. d. R. nicht um fossile CO_2-Quellen handelt, ist der Klimaschutzeffekt und auch das quantitative Potential eher gering. Dennoch kann dies eine sinnvolle Quelle zur CO_2-Gewinnung und -Nutzung sein, wenn bspw. eine Biogasaufbereitung auf Erdgasqualität ohnehin vorhanden oder geplant ist.

Bei der Kalzinierung von Carbonaten, z.B. dem Kalkbrennen von Calciumcarbonat zu Calciumoxid, fällt CO_2 als Nebenprodukt an. Trotz der geringen Verunreinigung erfolgt bisher eine Fassung des CO_2 aus wirtschaftlichen Gründen in der Regel nicht. Natürliche Gasquellen für die CO_2-Gewinnung spielen in der vorliegenden Studie keine Rolle, da sie i. d. R. in Gebieten mit Öl- oder Gaslagerstätten anzutreffen sind. [19]

3.1.2 Verfahren zur Abtrennung von CO_2 aus Gasgemischen

Die gängigen Verfahren zur CO_2-Abtrennung aus Gasgemischen von Verbrennungsprozessen lassen sich nach der möglichen Integration in verschiedenen Kraftwerkstypen unterscheiden. [22] In der folgenden Abbildung aus (Fischedick et al.) sind die grundsätzlichen Unterschiede dargestellt.

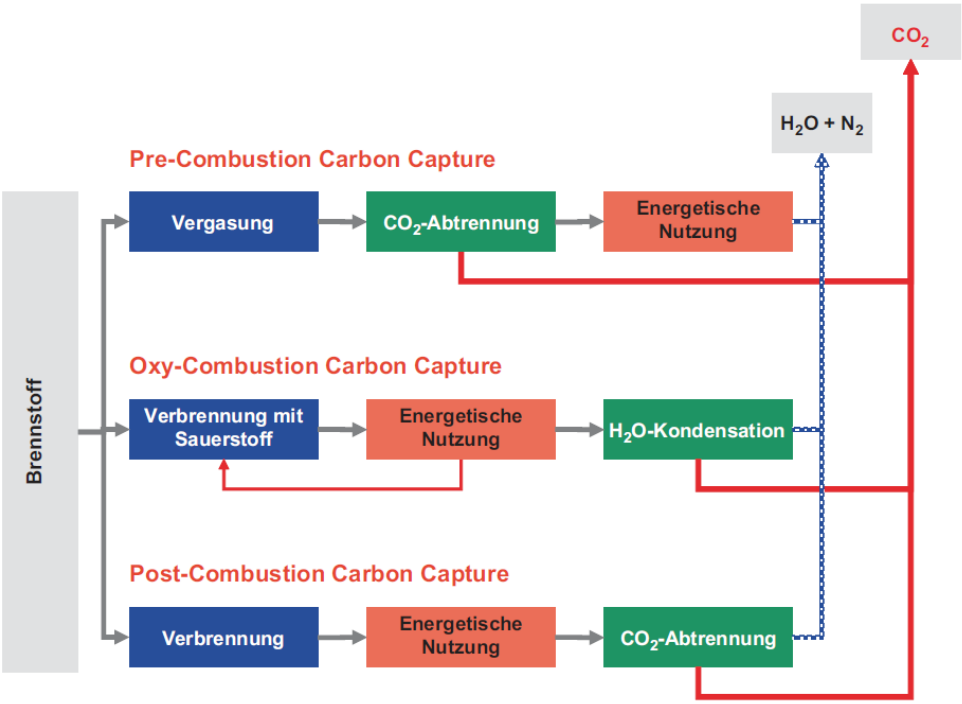


Abbildung 5: Verfahren zur CO_2-Abtrennung nach Kraftwerkstyp.

Das Pre-Combustion-Verfahren lässt sich auf Kraftwerke anwenden, bei denen zunächst eine Vergasung des Primärenergieträgers (z. B. Kohle aber auch Biomasse oder Abfall) zu einem Synthesegas erfolgt und erst anschließend die eigentliche Verbrennung mit der energetischen Nutzung stattfindet. Analog erfolgt auch die CO_2-Abtrennung aus dem Synthesegas bereits vor der Verbrennung im Kessel. Dieser Kraftwerkstyp (Integrated gasification combined cycle - IGCC) ist im Bestand jedoch weniger verbreitet und auch künftig sind Neuanlagen in Deutschland aufgrund der relativ hohen Kosten und des zu erwartenden „Kohleausstiegs“ fraglich. Das Verfahren zur CO_2-Abscheidung aus Synthesegasen ist jedoch grundsätzlich erprobt und es können große Reinheitsgrade erreicht werden. [22]

Die RWE Power AG plante ein IGCC-Kraftwerk mit 450 MW zur Verstromung von Braunkohle in Hürth bei Köln, bei dem CO_2 im Pre-Combustion-Verfahren abgetrennt werden sollte. Die Pläne wurden aber 2011 aufgrund von Widerständen aus der Bevölkerung und geringen wirtschaftlichen Erfolgsaussichten eingestellt.

Das Oxy-Combustion-Verfahren wird analog bei kohlebefeuerten Oxyfuel-Kraftwerken eingesetzt, welche sich durch die Verbrennung mit reinem Sauerstoff auszeichnen. Auch dieser Kraftwerkstyp ist eher selten anzutreffen. Das CO_2 kondensiert nach der Verbrennung gemeinsam mit dem Wasserdampf und lässt sich daher relativ leicht abtrennen. [20]

Das Post-Combustion-Verfahren lässt sich bei den gängigen Kohlekraftwerken anwenden. Das CO_2 wird nach der Verbrennung aus dem Rauchgas abgetrennt. Damit lässt sich die CO_2-Abscheidung als zusätzlicher Prozessschritt der Abgasreinigung verstehen. Sie erfolgt durch eine Gaswäsche mittels Lösungsmitteln, Feststoffabsorption oder Membrantechniken.

Die RWE Power AG hat am Braunkohle-Kraftwerk Niederaußem eine Pilotanlage zur CO_2-Abscheidung im Post-Combustion-Verfahren installiert. Sie funktioniert über eine Aminwäsche und hat zum Ziel, den Energieaufwand zu reduzieren und Betriebserfahrungen zu sammeln.

Eine Aminwäsche im Post-Combustion-Verfahren soll künftig auch beim Power-to-Liquid-Projekt der Steag AG am Steinkohle-Kraftwerk in Lünen eingesetzt werden und 2017 in Betrieb gehen. [21]

Eine Zusammenfassung der grundsätzlichen Verfahrenstechniken zur CO_2-Abtrennung aus Gasgemischen ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 2: Verfahren zur Abtrennung von CO_2 aus Gasgemischen. [19]

Verfahren	Arbeitsmedium	Vorteile	Nachteile
chemische Absorption in einer Flüssigkeit	wässrige Lösungen von Alkanolaminen, Aminosäuresalzen, Alkalicarbonaten oder Ammoniak; ionische Flüssigkeiten	hohe Selektivität; TRL 9	hoher Energiebedarf; begrenzte chemische Stabilität des Mediums
physikalische Absorption in einer Flüssigkeit	Wasser; Methanol; Glykolether; Amine etc.	kompakte Anlagen; niedriger Energiebedarf; gute Stabilität	abhängig vom gewählten Lösungsmittel
Phasenseparation (Tieftemperaturrektifikation = "Destillation")	keines	hohe Selektivität	hoher Energiebedarf
Adsorption an Feststoffen	Zeolithe; Aktivkohle; Metalloxide; immobilisierte Amine	abhängig vom Arbeitsmedium	abhängig vom Arbeitsmedium
Reaktion mit Feststoffen	Calciumcarbonat	schneller Prozess	permanenter Verbrauch an Arbeitsmedium
Trennmembranverfahren	Polymer-, Metall- oder Keramikmembran	abhängig vom Arbeitsmedium	begrenzte Membranstabilität bzw. hohe Kosten

3.1.3 Ökonomische Aspekte der CO_2-Abtrennung

Die CO_2-Abtrennung (aus Kraftwerken) ist zunächst mit erheblichen zusätzlichen Investitionskosten und Energieaufwand verbunden, was ungefähr einem Verlust von 10% des Wirkungsgrades entspricht. Diese können dadurch kompensiert werden, dass die CO_2-Vermeidung an sich einen ausreichend großen Marktpreis erreicht (z. B. über den Handel mit CO_2-Zertifikaten). Dazu müssten die CO_2-Mengen jedoch nachweisbar und langfristig gebunden oder stabilen Kreisläufen zugeführt werden. In untenstehender Tabelle sind die CO_2-Vermeidungskosten angegeben, d.h. die Kosten sind auf die vermeidbare CO_2-Masse normiert. Die Kosten liegen demnach mit über 40 €/t deutlich über dem derzeitigen Handelspreis für CO_2-Zertifikate (etwa 5€/t CO_2) [22]. Das abgeschiedene CO_2 kann alternativ als Rohstoff für andere Prozesse und Verfahren verkauft bzw. verwendet werden. Für eine betriebswirtschaftliche Investition müssen die erzielbaren Erlöse oder Einsparungen ausreichen, um die Kosten der CO_2-Abscheidung (und ggf. der Folgeprozesse) zu refinanzieren. In nachstehender Tabelle aus (Fischedick et al.) sind ökonomische Kennzahlen für die verschiedenen Abscheideverfahren dargestellt.

Tabelle 3: Kosten und Wirkungsgrade der CO_2-Abscheidung bei Kohlekraftwerken. [18]

Tab. 11.1 Im Mittel erwartete Kosten und Netto-Wirkungsgrade kommerzieller, fossil gefeuerter Kraftwerke mit CO_2-Abscheidung der OECD Mitgliedsstaaten ([3] und eigene Berechnungen)

Kraftwerkstyp	Kohlekraftwerk			GuD-Kraftwerk
CO_2-Abscheideverfahren	Post-Combustion	Pre-Combustion	Oxy-Combustion	Post-Combustion
Wirkungsgradminderung durch CO_2-Abscheidung (%-Punkte; H_u)	10,5	7,5	9,6	8,3
Wirkungsgrad einschließlich CO_2-Abscheidung (%; H_u)	30,9	33,1	31,9	48,4
Investitionsaufwand für CO_2-Abscheidung ($Euro_{2010}/kW_{el}$)	1318	903 (1253)	1357	603
Investitionsaufwand einschließlich CO_2-Abscheidung ($Euro_{2010}/kW_{el}$)	3047	2971	3167	1372
CO_2-Vermeidungskosten ($Euro_{2010}/t_{CO2}$)	46	35 (44)	42	64

Referenzkraftwerk gleichen Typs (für Pre-Combustion: in Klammern Referenzkraftwerk mit Kohlenstaubfeuerung). Einschließlich Verdichtung von CO_2 (ohne Transport und Speicherung)
GuD Gas- und Dampfkraftwerk, *Hu* unterer Heizwert

Der Investitionsaufwand ist als spezifische Größe bezogen auf ein kW elektrischer Kraftwerksleistung dargestellt. Die Kosten bewegen sich für das Post-Combustion-Verfahren bei rund 1.300 €/kW

elektrischer Leistung. Würde man bspw. einen Kraftwerksblock mit 640 MW_{el} mit einer CO_2-Abscheidung ausrüsten, wäre dies mit Investitionen von rund 830 Mio. € verbunden.

Ein kritischer Punkt bei der CO_2-Abscheidung aus Kraftwerken ist der zusätzliche Energieaufwand, welcher de facto zu einer Wirkungsgradminderung am Kraftwerk führt. Dies bedeutet, dass die Nachrüstung eines Kraftwerks mit einer CO_2-Abscheidung entweder

1. einen geringeren Stromertrag oder
2. einen erhöhten Brennstoffbedarf

zur Folge hat, um die Wirkungsgradminderung zu kompensieren. Im Sinne einer zirkulären Wertschöpfung oder nach dem Prinzip einer Kreislaufwirtschaft kann die Weiternutzung fossiler Energieträger jedoch nur eine Übergangslösung darstellen. Daher wäre ein erhöhter Verbrauch fossiler Brennstoffe nicht im Sinne der vorliegenden Potentialstudie. Es gilt demnach die Prämisse, dass zusätzlicher Energiebedarf, der durch die Abscheidung (und Nutzung) von CO_2 anfällt, aus erneuerbaren Quellen zu substituieren ist. Um die Dimensionen zu veranschaulichen wurde eine Beispielrechnung zur Ausrüstung eines 640 MW Kraftwerksblocks auf Steinkohlebasis[2] durchgeführt. Die Ergebnisse zeigt die folgende Tabelle:

Tabelle 4: Strombedarf durch CO_2-Abscheidung.

Angenomme Kraftwerksleistung	600	MW
Wirkungsgradminderung durch CO2-Abscheidung	10%	
Zusätzlicher Strombedarf (bei 4.000 Vbh/a)	240.000	MWh/a
Kompensation durch Windkraft (2.000 Vbh/a)	120	MW
Kompensation durch Windkraft (3,2 MW/Stk)	37,5	Stück
Kompensation durch PV (1.000 Vbh/a)	240	MWp
Kompensation durch PV (7 m²/kWp)	168	ha

Aus der Berechnung wird deutlich, dass die Nachrüstung fossiler Kraftwerke mit einer CO_2-Abscheidtechnik einen deutlichen Anstieg des Strombedarfs zur Folge hätte und nur mit einem forcierten Ausbau erneuerbarer Energien einhergehen sollte. Das würde bedeuten, dass alleine für die CO_2-Abtrennung bei einem 640 MW Kraftwerk, zusätzlich 38 Windräder oder eine Photovoltaikanlage mit 168 ha dafür gebaut werden müssten.

[2] Dies entspricht einem Block des Kraftwerks Scholven in Gelsenkirchen.

3.2 Chemische Verfahren

Der Nutzung von CO_2 in der chemischen Industrie wird schon länger als nur im Zuge der Rohstoff- und Energiewende Beachtung geschenkt. Bereits seit einiger Zeit gibt es industriell erprobte und etablierte Verfahren, die CO_2 als Rohstoff nutzen. Kohlendioxid ist ein energiearmes und dadurch reaktionsträges Molekül. Für die Reaktivierung des Kohlendioxids müssen große Mengen Energie eingesetzt werden, die in Form von Wärme, Licht oder Elektrizität bereitgestellt werden kann. Eine weitere Möglichkeit der Umwandlung besteht darin, Kohlendioxid mit energiereichen, reaktiven Verbindungen, wie zum Beispiel Wasserstoff, umzusetzen. Dieser Strategie folgen die meisten Verfahren. Dadurch können Moleküle synthetisiert werden, die einen höheren Energieinhalt aufweisen als CO_2, wie beispielsweise Polymere.

Die nun vorgestellten Verfahren bieten Möglichkeiten, bisher ungenutzte Kapazitäten erneuerbarer Energien zu nutzen. Zum einen gilt es, alle benötigten Energien für ein Verfahren auf Basis erneuerbarer Quellen bereitzustellen. Zum anderen muss der benötigte Wasserstoff ebenfalls nur durch den Einsatz erneuerbarer Energien produziert werden. Nur so kann CO_2 eingespart und fixiert werden, um eine mögliche Verringerung des Kohlendioxidgehaltes der Atmosphäre zu erreichen. Zusätzlich muss erwähnt werden, dass auf lange Sicht (> 50 Jahre) auch die Erdatmosphäre als CO_2-Quelle in Betracht gezogen werden muss, wenn Vorhaben wie das Energiekonzept 2050 der Bundesregierung umgesetzt werden. [23]

3.2.1 Methanisierung

Unter Methanisierung oder dem Sabatier-Prozess versteht man die Umsetzung von CO_2 zu Methan. Die bereits 1902 beschriebene Reaktion erlangt in Zeiten der Energiewende als Power to Gas-Strategie große Aufmerksamkeit. In diesem Zusammenhang dient Methan als Energiespeicher für Überschussenergie aus Wind- und Solaranlagen. Ein Vorteil der Methansynthese ist die mögliche Einspeisung in das vorhandene Erdgasnetz. Als Chemierohstoff ist Methan mit Erdgas gleichzusetzten, da Methan der Hauptbestandteil von Erdgas ist. Somit stehen grundsätzlich die gleichen Wertschöpfungsketten wie bei der Erdgasverarbeitung zur Verfügung. Die Bildung von Methan ist in Abbildung 6 dargestellt.

$$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O$$

Abbildung 6: Reaktionsgleichung der Methanisierung.

Durch die aufgeführten Gründe kann das Mengenpotential für die Umwandlung von Kohlenstoffdioxid zu Methan als hoch eingestuft werden. Verfahrenstechnisch ist die Methanisierung bereits industriell erprobt. Die Hydrierung findet bei Drücken zwischen 1 und 10 bar und bei Temperaturen von 300 – 400 °C statt. Bedingung ist, dass ausreichend Wasserstoff aus erneuerbaren Energien zur Verfügung steht. [24] Auch hier stellt der momentan hohe Preis von regenerativ erzeugtem Wasserstoff von 4 €/kg ein Hindernis zur erfolgreichen Umsetzung des Verfahrens dar.

3.2.2 Herstellung von Kraftstoffen und Basischemikalien

Unter „Herstellung von Kraftstoffen und Basischemikalien“ werden Verfahren vorgestellt, mit deren

Hilfe aus CO_2 und Wasserstoff Ausgangssubstanzen für die chemische Industrie sowie Kraftstoffe hergestellt werden.

Synthesegas, ein Gasgemisch aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff, dient in der chemischen Industrie als wichtige Plattform für eine Vielzahl chemischer Synthesen. Aufgrund der hohen Relevanz wird die Gewinnung von Synthesegas aus CO_2 beschrieben. Daran anknüpfen kann die Sunshine-to-Petrol-Technologie. Sie nutzt Synthesegas zur Herstellung synthetischer Kohlenwasserstoffe und stellt eine interessante Möglichkeit zur Nutzung von CO_2 mit hohem Mengenpotential dar. Zudem werden Syntheserouten für Methanol erläutert, welches als Kraftstoff aber auch als wichtige Basischemikalie der chemischen Industrie genutzt werden kann. Die entstehenden Wertschöpfungsketten können Abbildung 7 entnommen werden.

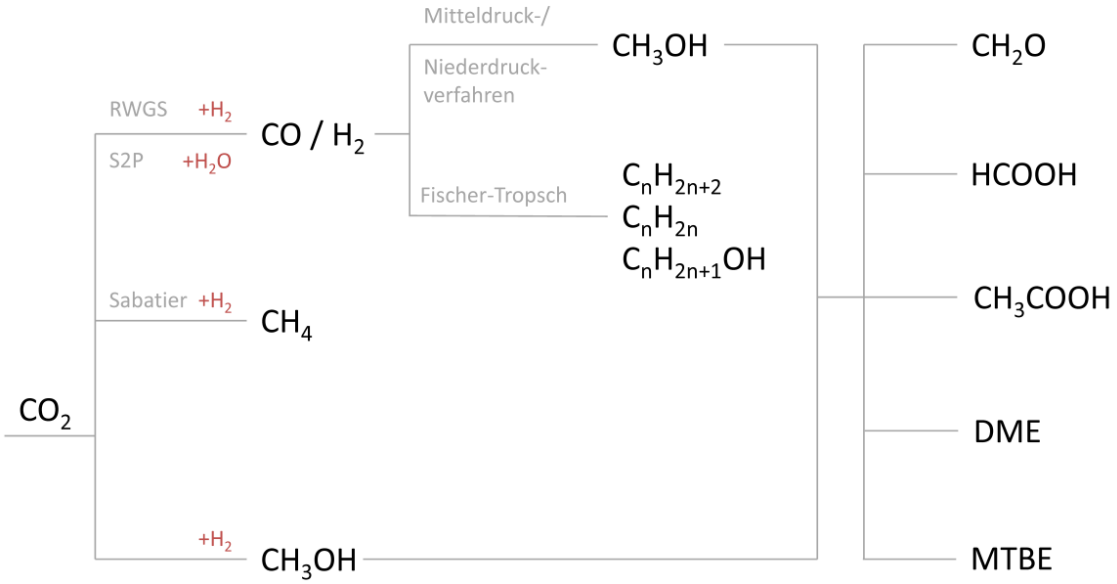


Abbildung 7: Kohlendioxid-Wertschöpfungskette im Bereich Kraftstoffe und Basischemikalien einschließlich der Methanisierung. Dargestellt ist die direkte Methanolsynthese aus CO2 (unten) sowie indirekte Verfahren über Synthesegas (oben). Zusätzlich sind mögliche Folgeprodukte von Methanol dargestellt. Die Fischer-Tropsch-Synthese dient zur Herstellung von Alkanen, Alkenen und Alkoholen und ist der Synthesegaserzeugung nachgeschaltet. RWGS: umgekehrte Wassergas-Shift-Reaktion; S2P: Sunshine-To-Petrol; DME: Dimethylether; MTBE: Methyl-tert-butylether.

3.2.2.1 Synthesegas

Ein wichtiger Ausgangspunkt für Synthesen in der chemischen Industrie ist Synthesegas. Der jährliche Produktionsbedarf wird auf 500 Mio. Nm3 geschätzt. [25] Das Mischungsverhältnis von Kohlenmonoxid und Wasserstoff (CO/H_2) unterscheidet sich, je nachdem welche Zielverbindung aus Synthesegas hergestellt werden soll. [26] Für die Produktion von Synthesegas stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, wobei der Großteil dieser energieintensiven Prozesse zurzeit noch auf fossilen Rohstoffen wie Kohle und Erdgas basiert. [27] Um die Herstellung von Synthesegas nachhaltig zu gestalten, muss die Sonne als primäre Energiequelle genutzt werden. Im Anschluss kann das Synthesegas in bereits etablierte Prozesse der chemischen Industrie fließen. Denkbare Verfahren für die Synthese von Kraftstoffen und Basischemikalien wären die Fischer-Tropsch-Synthese sowie die Produktion von Methanol. [18]

3.2.2.1.1 Synthesegas aus klassischen Verfahren

Eine bereits etablierte Verfahrensweise zur Herstellung von Synthesegas aus Kohlenstoffdioxid ist die umgekehrte Wassergas-Shift-Reaktion, welche große Mengen an erneuerbar erzeugtem Wasserstoff benötigt. Erstens zum Erzeugen von Kohlenmonoxid (CO) und anschließend zum Einstellen des erwünschten Verhältnisses von CO zu H_2. Die Reaktionsgleichung ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Reaktion verläuft leicht endotherm. Durch die relativ geringe Reaktionsenthalpie von 41,2 kJ/mol ist es denkbar, diese Reaktion mit exothermen Reaktionen zu koppeln.

$$CO_2 + H_2 \rightleftharpoons CO + H_2O$$

Abbildung 8: Reaktionsgleichung der umgekehrten Wassergas-Shift Reaktion zu Erzeugung von Synthesegas.

3.2.2.1.2 Alternative Verfahren zur Synthesegasherstellung

Verschiedene Unternehmen, Forschungsinstitute und Universitäten (Sandia, Paul-Scherer-Institut, ETH Zürich) beschäftigen sich mit der Produktion von Synthesegas aus CO_2 und Wasser unter Verwendung der Sonne als Energiequelle. Die Sonne stellt die benötigte Energie für den Hochtemperaturprozess zur Verfügung.

3.2.2.2 Sunshine-to-Petrol

Bei der Sunshine-to-Petrol (S2P)-Technologie wird die benötigte Energie für die Herstellung von Synthesegas in Form von gebündelter Sonnenenergie bereitgestellt. Dadurch entstehen nahezu keine zusätzlichen CO_2-Emissionen für die Energieversorgung. [25]

Im Rahmen des vom Schweizer Bundesamt für Energie geförderten Projektes SolarZinc P&D sollte die solarthermische Produktion von Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid (Synthesegas) optimiert und in den Pilotmaßstab übertragen werden. Die Laufzeit des Projektes betrug 3 Jahre (2012-2015).

Das zyklische Verfahren kann in zwei Schritte getrennt werden. Bei der ersten endothermen Reaktion wird Zinkoxid mit Hilfe thermischer Sonnenenergie zu Zink reduziert, wobei Sauerstoff entsteht. Nach der Abtrennung von Sauerstoff kann das gebildete Zink mit Wasser und CO_2 reagieren. Es werden CO und H_2 sowie das ursprünglich vorhandene Zinkoxid gebildet, welches erneut mit Hilfe fokussierter Sonnenstrahlung reduziert wird. Dadurch entsteht ein Zn/ZnO-Redoxzyklus. [28] Mit dem gebildeten Synthesegas werden im Anschluss flüssige Kohlenwasserstoffe mittels Fischer-Tropsch-Synthese gebildet. [29]

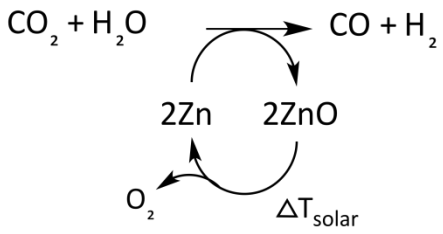


Abbildung 9: Reaktionsschema der Synthesegaserzeugung mittels eines Zink/Zinkoxid-Zyklus.

3.2.2.3 Fischer-Tropsch-Synthese

Mittels Fischer-Tropsch-Synthese werden aus Synthesegas Kohlenstoffverbindungen von einem bis mehr als 100 Kohlenstoffatomen gebildet. Typische Produkte sind demnach gasförmige Verbindungen oder Benzin, Kerosin und wachsartige Kohlenwasserstoffe. Die Selektivität für die jeweiligen Produkte kann über verschiedene Einflussgrößen wie Druck und Temperatur gesteuert werden. Im Allgemeinen sind die Selektivitäten der jeweiligen Spezies gering, sodass meist ein Produktgemisch entsteht, welches im Anschluss aufgereinigt wird.

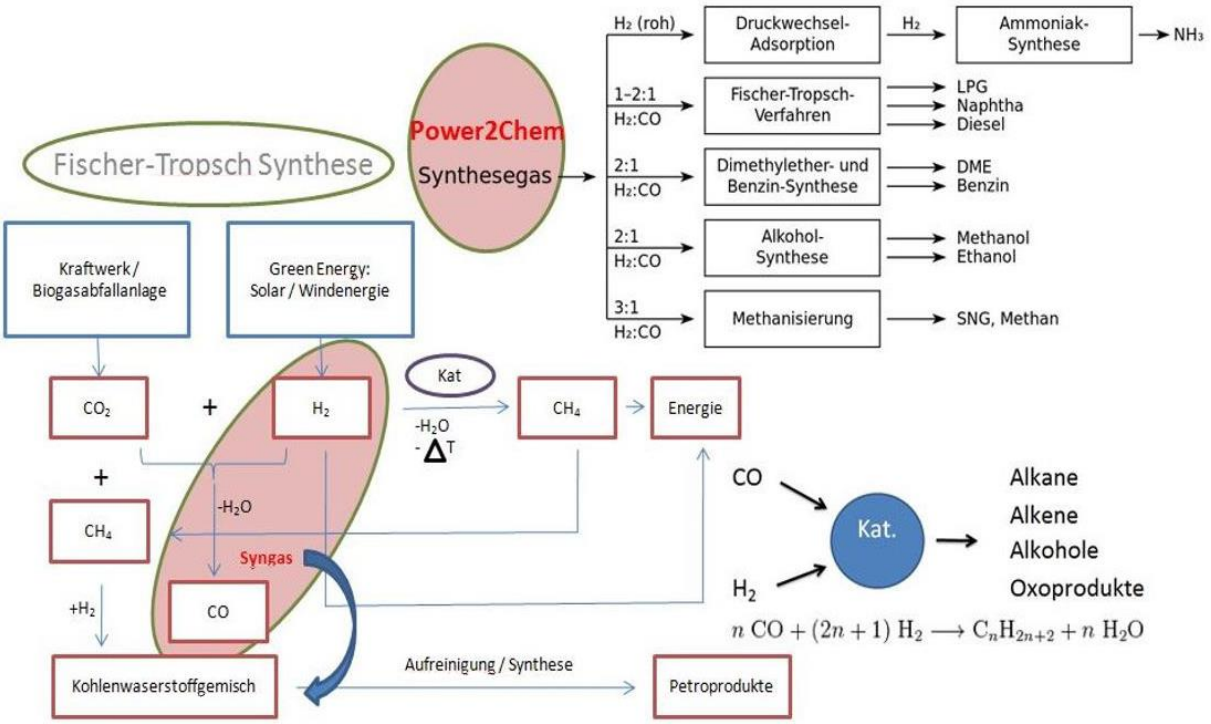


Abbildung 10: Synthese und Wertschöpfungsketten von Synthesegas und der Fischer-Tropsch-Synthese.

Das Dresdner Unternehmen sunfire betreibt seit Ende 2014 eine Power-to-Liquid Anlage, in der mittels Fischer-Tropsch-Synthese flüssige Kraftstoffe hergestellt werden. Der benötigte Wasserstoff wird durch Wasserelektrolyse mit Hilfe erneuerbarer Energien bereitgestellt. Aus Kohlendioxid und Wasserstoff entsteht zunächst Synthesgas, welches im Anschluss zu einem Kraftstoffgemisch reagiert. Das Gemisch kann durch Raffination in Kerosin, Diesel und Benzin getrennt werden. [30]

Kim et.al. führten 2013 ein Life Cycle Assessment der Sunshine-to-Petrol Technologie durch. Sie untersuchten dabei Einflussgrößen wie *global warming potential* und *resource depletaion potential*. Es konnte gezeigt werden, dass die S2P Technologie mit ihren Produkten in allen untersuchten Umwelteinflüssen wesentlich besser abschneidet als klassische kohlenwasserstoffhaltige Kraftstoffe. [29] Stechel und Miller haben die Realisierbarkeit einer solchen Technologie hinsichtlich des Scale-up, der Effizienz und der Wirtschaftlichkeit untersucht und als grundsätzlich realisierbar bewertet. Die Machbarkeit hängt dabei sehr stark von der Effizienz der eingesetzten Technologien ab. [26]

3.2.2.4 Synthese von Methanol

Im Jahr 2015 betrug die weltweite Methanolproduktion etwa 60 Mt. Der Großteil des Methanols wird derzeit mit fossilem Synthesegas über die Dampfreformierung von Methan hergestellt. [19] Im

Zuge der Energie- und Rohstoffwende wird Methanol auch als Kraftstoff bzw. Energiespeicher interessant, denn aufgrund der physikalischen Eigenschaften von Methanol können bereits vorhandene Infrastrukturen zur Speicherung, Logistik und Nutzung verwendet werden. Des Weiteren dient Methanol als wichtige Basischemikalie zur Herstellung von Formaldehyd, aromatischen Verbindungen, Methyl-tert-butylether (MTBE), Essigsäure und weiteren Zwischenprodukten der chemischen Industrie. Durch die mögliche Verwendung von Methanol als Speicher überschüssiger erneuerbarer Energie, sowie der Nutzung als Kraftstoffalternative wird der Bedarf an Methanol in Zukunft weiter wachsen. [31] Damit ist ein großes Potential für die Kohlendioxidfixierung verbunden. Es ist zu beachten, dass die Synthese von Kraftstoffen im Vergleich zur Produktion von Chemikalien zwar ein weitaus höheres Mengenpotential in der CO_2-Verwertung aufweist, aber die Dauer der Fixierung gering ist. Daher stellen Kraftstoffe im Gegensatz zu manchen Chemikalien keine CO_2-Senke dar und dienen somit nicht zur langfristigen Verringerung der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre. [24]

3.2.2.4.1 Direkte Synthese aus CO_2

Die Grundkenntnisse in der Produktion von Methanol direkt aus CO_2 sind bereits vorhanden. Die Reaktionsgleichung kann Abbildung 11 entnommen werden. Für eine erfolgreiche Kommerzialisierung sind dennoch Optimierungen am verwendeten Katalysatorsystem notwendig. Die größte Herausforderung stellt allerdings die effiziente und damit kostengünstigere Herstellung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien dar. Zudem müssen rentable Aufreinigungsverfahren zur Bereitstellung geeigneter CO_2-Ströme zur Verfügung stehen, da katalytische Verfahren hohe Anforderungen an die Reinheit der Edukte stellen. [32] [24] Rauchgase aus Kraftwerken können in geringen Mengen Katalysatorgifte wie Schwefel oder Schwermetalle enthalten, die entfernt werden müssen. Die dadurch notwendige Reinigung kann die CO_2-Bilanz des Gesamtsystems negativ beeinflussen.

$$CO_2 + 3H_2 \rightleftharpoons CH_3OH + H_2O$$

Abbildung 11: Reaktionsgleichung für die direkte Synthese von Methanol aus CO_2.

Schäfer et.al. berechneten für die direkte Synthese von Methanol aus CO_2 den spezifischen CO_2- Ausstoß auf 0,37 t CO_2-emittiert/t CO_2-gebunden, wenn die Energie für die Wasserelektrolyse aus erneuerbaren Energien stammt.

Mitsui Chemicals Inc. baute im Jahr 2009 die erste Anlage, die Methanol direkt aus CO_2 herstellt. Die Anlage im Pilotmaßstab erforderte Investitionen von etwa 14 Mio. € und besitzt eine Kapazität von 100 t/a. Die Reduktion von CO_2 wird an Kupferoxid/Zinkoxid/Aluminiumoxid-Katalysatoren durchgeführt, die eine Standzeit von bis zu 4500 h besitzen. Der benötigte Wasserstoff kommt bisher aus Überschussproduktionen anderer Prozesse. [33]

Eine weitere Anlage mit höherer Kapazität ist die 2012 fertiggestellte George Olah Renewable Methanol Plant auf Island. Jährlich werden dort etwa 5500 t Kohlenstoffdioxid zu mehr als 5 Mio. L Methanol umgesetzt. Die benötigte Prozessenergie, sowie die Energie zur Produktion von Wasserstoff, stammen aus einem Geothermiekraftwerk. Dieses liefert auch das benötigte CO_2, welches sonst in die Atmosphäre entlassen werden würde. [34]

Des Weiteren soll ab 2017 eine Methanolanlage in Lünen in Betrieb gehen und jährlich etwa

400.000 L Methanol herstellen. Dabei wird CO_2 aus dem Rauchgas des lokalen Steinkohlekraftwerks gewonnen. Die Bereitstellung des Wasserstoffs übernimmt ein Elektrolyseur, der mit Überschussenergie aus Wind- und Solarstrom betrieben werden soll. [35]

3.2.2.4.2 Methanol aus Synthesegas

Neben der direkten Variante gibt es bereits seit den sechziger Jahren verschiedene etablierte und industriell ausgereifte Verfahren zur Herstellung von Methanol aus Synthesegas. Von Relevanz sind heute das Mitteldruck-Verfahren und das Niederdruck-Verfahren. Das Mitteldruck-Verfahren arbeitet bei 100 – 300 bar und bei einer Temperatur von 220 – 300 °C. Die heterogen katalysierte Reaktion läuft an Kupfer-Zink-Aluminium- oder Kupfer-Zink-Chrom-Katalysatoren ab. In einem ähnlichen Temperaturbereich von 200-300 °C läuft auch das Niederdruckverfahren ab. Die bei 50 – 100 bar ablaufende Reaktion wird ebenfalls an Kupferkatalysatoren durchgeführt.

3.2.2.5 Ameisensäure

Der weltweite Jahresbedarf beträgt etwa 600.000 kt. Die Katalyse der CO_2-basierten Produktion von Ameisensäure verläuft homogen katalysiert und ist gut entwickelt. Allerdings weist die Isolation des Produktes und des Edelmetallkatalysators noch Hindernisse auf, wodurch sich bisher keine industrielle Anwendung ergeben hat. [36]

Ameisensäure findet Anwendung als Lösungsmittel, Entkalkungsmittel, Beizmittel und Reduktionsmittel bei Lötprozessen. Zudem kann Ameisensäure direkt als Brennstoff für eine Brennstoffzelle dienen, oder als vorgelagertes Wasserstoff-Shuttle zunächst CO_2 und H_2 freisetzten, wobei letztes als Brennstoff verwendet wird. [37]

3.2.3 Synthese hochwertiger organischer Produkte

3.2.3.1 Organische Carbonate

Organische Carbonate sind vielseitig einsetzbar und eine wichtige Substanzklasse der chemischen Industrie. Die Produktionsmengen bewegen sich zwischen 0,4 bis 1,0 Mt/a, wobei die Produktion von Dimethylcarbonat (DMC) alleine etwa 0,1 Mt beträgt. [18] [38] DMC als einfachstes organisches azyklisches Carbonat wird als Lösungsmittel (25 %), chemisches Reagenz, Elektrolyt in Lithium-Ionen-Akkus und Ausgangsverbindung für Polycarbonate (50 %) genutzt. [39] Langkettige Alkylcarbonate und cyclische Carbonate werden als Lösungsmittel und Reagenz für chemische Synthesen verwendet. Durch die positiven Eigenschaften von Carbonaten wie geringe Toxizität und biologische Abbaubarkeit, verbunden mit den vielseitigen Verwendungsmöglichkeiten und der Fixierung von CO_2, wird ein steigender Bedarf erwartet.

3.2.3.1.1 Syntheserouten DMC

Das momentan wichtigste Verfahren zur Herstellung von DMC ist der Eni-Prozess. Die oxidative Carbonylierung von Methanol mit Kohlenmonoxid und Sauerstoff läuft typischerweise bei 270 bar und 120 °C ab und stellt knapp 85 % des in Europa nachgefragten DMC bereit. Es befinden sich mehrere alternative Verfahren in der Entwicklung, wobei im Rahmen dieser Studie nur Syntheserouten beschrieben werden, die direkt oder indirekt an einer stofflichen Nutzung von CO_2 beteiligt sind.

Indirekte Syntheserouten

Eine indirekte Syntheseroute stellt die Alkoholyse von Harnstoff dar. Bei etwa 165 – 190 °C und

135 – 205 bar wird Harnstoff mit Methanol unter der Bildung von Ammoniak umgesetzt. Durch die Bildung von Ammoniak, ist es naheliegend eine Harnstoff-Alkoholyse in der Nähe einer Harnstoffproduktion zu betreiben, um gebildetes Ammoniak zu recyceln. [40] Die indirekte CO_2-Nutzung liegt in der vorangegangenen Produktion von Harnstoff, welcher bereits großtechnisch aus CO_2 und Ammoniak gewonnen wird. Der benötigte Alkohol, in diesem Fall Methanol, kann auch aus CO_2 gewonnen werden. Durch die ungünstige Lage des chemischen Gleichgewichtes leidet der Prozess unter schlechten Produktausbeuten. [25] [41] Außerdem werden durch die stattfindenden Nebenreaktionen unerwünschte Nebenprodukte gebildet, worunter die Selektivität und erneut die Ausbeute leidet. Es wurden einige Patente und Veröffentlichungen verfasst, die sich mit den genannten Herausforderungen befassen. [42] [43]

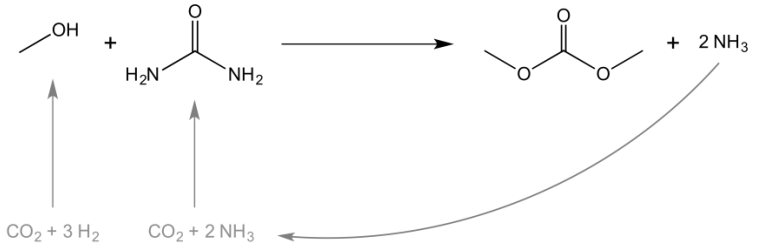


Abbildung 12: Reaktionsschema der Alkoholyse von Harnstoff. Entstehender Ammoniak kann erneut für die Harnstoffsynthese verwendet werden. In grau sind mögliche CO_2-basierte Synthesen der Edukte dargestellt.

Zu den indirekten Synthesen von DMC zählt auch die Umesterung von Ethylencarbonat. Die Bildung des cyclischen organischen Carbonates verläuft über eine Addition von CO_2 an Ethylenoxid. Diese Reaktion weist eine Atomeffizienz von 100 % auf. Im nächsten Schritt wird das gebildete cyclische Carbonat mit Methanol umgesetzt, um das gewünschte Dimethylcarbonat zu erhalten. Als Nebenprodukt fällt Ethylenglykol an. Das Reaktionsschema ist in Abbildung 13 dargestellt. Die eben genannte Reaktion kann auch über Propylenoxid und Propylencarbonat verlaufen, allerdings mit sehr schlechten Ausbeuten an DMC. [44] Aus diesem Grund wird diese Reaktion nicht betrachtet.

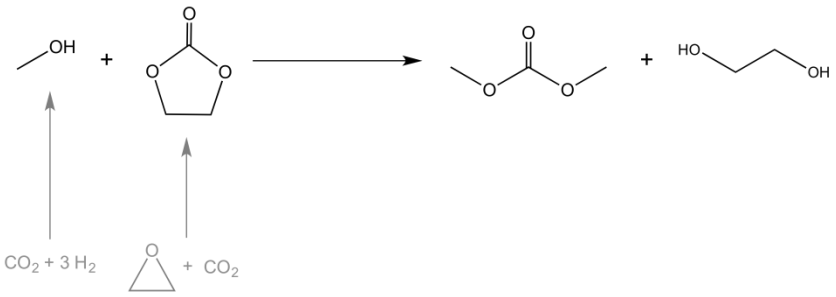


Abbildung 13: Reaktionsschema zur Produktion von DME durch die Umesterung von Ethylencarbonat mit Methanol. In grau sind mögliche CO_2-basierte Synthesen der Edukte dargestellt.

Direkte Syntheseroute

Als Verfahren für die direkte Synthese von DMC wird die Umsetzung von Methanol mit Kohlenstoffdioxid gewählt. Diese Route gilt ebenfalls als sehr vielversprechend, unterliegt jedoch sowohl thermodynamischen als auch kinetischen Limitierungen, die es für eine erfolgreiche Implementierung zu überwinden gilt. [41]

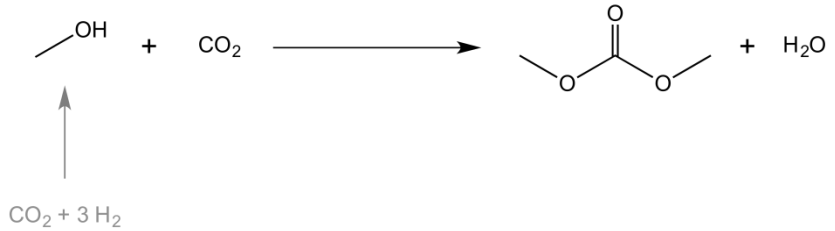


Abbildung 14: Direkte Synthese von Dimethylcarbonat aus Methanol. In grau sind mögliche CO_2-basierte Synthesen der Edukte dargestellt.

3.2.3.2 Synthese zyklischer Carbonate

Zyklische Carbonate werden großtechnisch und mit guten Ausbeuten über eine Addition von CO_2 an die entsprechenden Epoxide hergestellt. Bekannte Verbindungen sind Ethylen- und Propylencarbonat, welche Ausgangsverbindungen für die Produktion von Polycarbonaten sein können.

3.2.3.3 Polymere aus CO_2 – Synthese von Polycarbonaten und Polyurethanen

Die Herstellung von Polycarbonaten mit Kohlenstoffdioxid basiert auf dessen Copolymerisation mit Epoxiden als reaktiver Reaktionspartner unter Anwesenheit eines Katalysators. [45] Produkte sind beispielsweise Polypropylencarbonat (PPC), Polycyclohexancarbonat (PCHP) oder Polylimonencarbonat als biobasiertes Polycarbonat. Die beiden letzten besitzen ähnliche Eigenschaften wie Polystyrol, eines der meist produzierten Polymere und könnten daher an Bedeutung gewinnen. [18] Die Produktgruppe der Polycarbonate weist neben der Möglichkeit CO_2 zu binden auch hervorragende Eigenschaften auf, was Festigkeit, Strapazierfähigkeit, Transparenz, Hitzebeständigkeit und Elektroisolierung angeht.

3.2.3.3.1 Polypropylencarbonat

Besonderer Fokus, sowohl in industrieller als auch in akademischer Forschung, liegt auf Polypropylencarbonat als günstigem, umweltfreundlichem und biologisch abbaubarem Kunststoff. [45] [25] Polypropylencarbonat wird durch die Polymerisation von Propylenoxid und CO_2 hergestellt. Die Reaktionsgleichung ist in Abbildung 15 dargestellt.

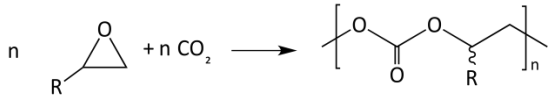


Abbildung 15: Allgemeines Reaktionsschema für Polycarbonate. Ein Epoxid (R=H, Ethylenoxid; R=CH3, Propylenoxid) wird mit CO_2 zu einem Polycarbonat umgesetzt. Als Nebenprodukt entstehen cyclische Carbonate.

Die Dauer der Fixierung von CO_2 in Polycarbonaten hängt von dem produzierten Produkt ab und bewegt sich zwischen Jahren und Jahrzehnten. [25] Trotz der großen Fortschritte im Bereich der CO_2-basierten Polymere zeigen die durchführbaren Reaktionen eine unzureichende Effizienz. Die bisher erzielten Eigenschaften [45] von PPC machen eine breite Anwendung schwer.

3.2.3.3.2 Polyethercarbonatpolyole

Polyethercarbonat-polyole können bei der Synthese von Polyurethanen verwendet werden, einem Kunststoff, dessen weltweiter Bedarf etwa 10 Mt/a beträgt. [45] Die Produktion von Polyethercarbonat-polyolen verläuft ähnlich wie die der Polycarbonate, nur unter Einsatz anderer Katalysatoren.

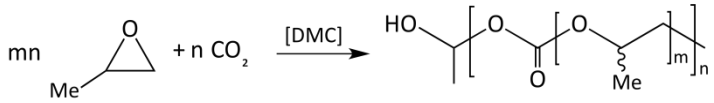


Abbildung 16: Synthese von Polyethercarbonat-polyolen aus Propylenoxid und CO_2 unter Anwesenheit von Dimethylcarbonat.

Für 2016 plant Covestro eine Anlage zur Herstellung von Polyolen auf CO_2-Basis in Betrieb zu nehmen. Die Kapazität beträgt 5000 t/a, wobei etwa 1000 t/a Kohlendioxid gebunden werden. Es wurden Investitionen von etwa 15 Mio. € getätigt. [14]

3.2.3.4 Harnstoffsynthese

Für die Synthese von Harnstoff stehen verschiedene großtechnische Verfahrensweisen zur Verfügung. Die weltweite Harnstoffproduktion basierend auf CO_2 und Ammoniak beträgt 150 Mt (in 2010) und stellt damit die momentan größte stoffliche Nutzung von Kohlendioxid dar. [25] Die Herstellung von Harnstoff läuft in einem integrierten Prozess zusammen mit der Ammoniaksynthese ab, für die Stickstoff mit Wasserstoff umgesetzt wird. Das bei der Wasserstoffproduktion (Dampfreformierung, Wassergas-Shift-Reaktion) anfallende Kohlendioxid wird zur Harnstoffsynthese genutzt. Dadurch ergibt sich keine Möglichkeit, zusätzlich CO_2 aus anderen Quellen zu nutzen. Die Hauptanwendung von Harnstoff liegt im Agrarbereich als Stickstoffdünger. [46]

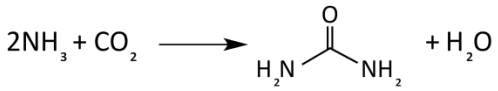


Abbildung 17: Reaktionsgleichung für die Harnstoffsynthese aus CO_2 und Ammoniak.

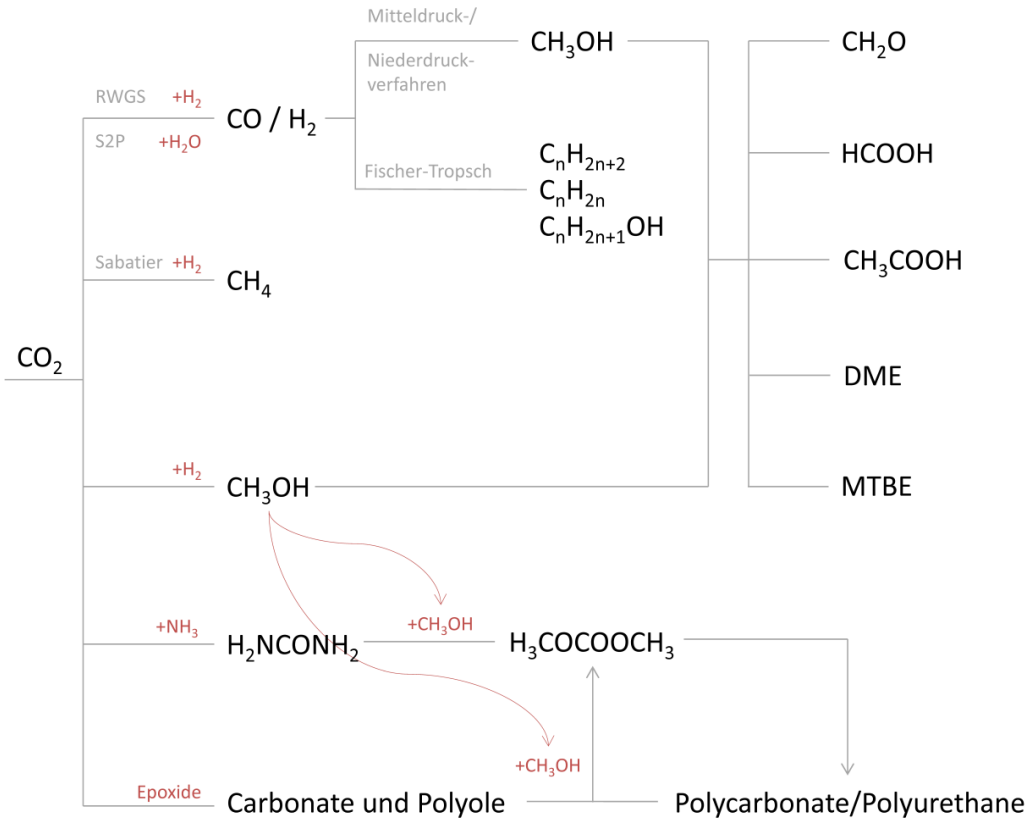


Abbildung 18: Darstellung der Wertschöpfungskette von Kohlendioxid.

3.2.4 Karbonatisierung

Eine Karbonatisierung beschreibt die Reaktion von CO_2 mit Metallverbindungen, vorwiegend den Silicaten der Erdalkalimetalle Calcium und Magnesium. Die Umsetzung von Kohlendioxid zu Karbonaten benötigt mineralische Rohstoffe, die entweder der Natur in Form von Gesteinen entnommen werden können oder aus Rückständen industrieller Prozesse stammen. Natürliche Rohstoffe sind Gesteine, die Calcium oder Magnesium enthalten, wie Peridotit, Serpentinit, Olivin oder Wollastonit. Als industrielle Reststoffe können calcium- oder magnesiumreiche Aschen und Schlacken verwendet werden, die im Bergbau, bei der Eisen-, Stahl-, und Zementherstellung sowie der Energieerzeugung und Müllverbrennung anfallen. [(47)] Die Fixierung von CO_2 mit Hilfe natürlicher Ressourcen benötigt pro Tonne CO_2 etwa 2 – 3 t Gestein. Dies würde zu einer immensen Bewegung von Gesteinsmassen führen. Dies würde zu einer zusätzlichen Umweltbelastung durch Abbau und Transport führen und wird deshalb nicht weiter behandelt. [(47) (24)] Es muss jedoch erwähnt werden, dass die Kapazität der natürlichen Ressourcen enorm ist und dadurch gewaltige Mengen an Kohlendioxid gebunden werden könnten. Reizvoll ist die Karbonatisierung auch aufgrund der sicheren und langfristigen Fixierung von Kohlendioxid. [(48)]

Im Gegensatz zu den natürlichen Ressourcen bietet die Produktion von anorganischen Karbonaten aus industriellen Reststoffen eine erwähnenswerte Alternative. Die Produktion kann in zwei Verfahrenswege unterteilt werden, ein einstufiges, indirektes und ein zweistufiges Verfahren. Beide Prozesse basieren auf einer wässrigen Extraktion von Calcium bzw. Magnesium aus den eingesetzten Roh-

stoffen. Für die Karbonatbildung wird die Extraktionslösung anschließend mit CO_2 versetzt. Die entstehenden Karbonate finden je nach Qualität in unterschiedlichen Bereichen Anwendung. Sie können im großen Maßstab als Zementadditiv im Baugewerbe, zur Landgewinnung oder in der Agrarwirtschaft als Bodenverbesserer eingesetzt werden. Anwendungen im kleinen Maßstab sind chemische Prozesse und Verfahren zur Sanierung verunreinigter Böden oder Behandlung von Sondermüll. [(49)] Bisher leidet die Mineralisierung von Kohlendioxid unter geringen Reaktionsgeschwindigkeiten und schlechter Energiewirtschaft, sodass keine wirtschaftliche Lösung im großtechnischen Maßstab verfügbar ist. [(48)] Die verschiedenen Verfahren werden seit 20 Jahren intensiv beforscht, um die Karbonatisierung im industriellen Maßstab zu realisieren. [(50)]

3.2.5 Direktnutzung

Unter dem Punkt Direktnutzung von CO_2 sind Anwendungen zusammengefasst, die keine chemische Umwandlung von Kohlendioxid beinhalten. Damit können diese Verfahren nicht zur Sequestrierung beitragen.

In der chemischen Industrie wird CO_2 nicht nur als Rohstoff für Synthesen verwendet, sondern auch als Lösungsmittel für Extraktionsvorgange, Kältemittel und als Prozesshilfsstoff. Kohlendioxid findet auch in der Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie Anwendung. Die direkte Nutzung von CO_2 stellt keine CO_2-Senke, sondern vielmehr eine Kaskadennutzung dar. Um eine mögliche Reduktion der Kohlendioxid-Emissionen zu gewährleisten, muss sichergestellt werden, dass kein Kohlendioxid allein für die beschriebenen Anwendungen produziert wird und bereits vorhandene Kohlendioxidquellen genutzt werden.

Kohlendioxid aus der Ammoniaksynthese und der Wasserstoffproduktion weisen meistens eine hohe Reinheit auf, was sie zu einer geeigneten Quelle für die direkte Nutzung macht. [(19)] Beim Einsatz in der Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie müssen alle gesundheitsschädlichen Inhaltsstoffe sowie Geruchs- und Geschmacksstoffe entfernt werden. Meistens sind dies Schwefelverbindungen, Öle und Kohlenhydrate.

3.2.5.1 Lösungsmittel für Extraktionsprozesse

Die Eigenschaften von überkritischem CO_2 machen es zu einem geeigneten Lösungsmittel in der chemischen Industrie aber auch in der Nahrungsmittelindustrie, da Kohlendioxid ein gesundheitlich unbedenkliches Extraktionsmittel ist. Es wird dort für die Produktion von entkoffeiniertem Kaffee und Tee verwendet. Bei diesem Vorgang herrschen Drücke im Bereich von 120 bis 180 bar und Temperaturen von 40 bis 80 °C. Das dabei überkritisch vorliegende CO_2 dient als Lösungsmittel für Koffein. Im kleineren Maßstab werden so auch Kräuter und Arzneimittel extrahiert. [(18)]

3.2.5.2 CO_2 als Kältemittel

Die meist verwendeten Kältemittel weisen ein weitaus höheres Treibhauspotential als CO_2 auf. Einen Vorteil kann CO_2 als Kältemittel dann haben, wenn Kältemittel mit höherem Treibhauspotential substituiert werden. Viele deutsche Automobilhersteller sind bereits an der Entwicklung CO_2-betriebener Kälteanlagen beteiligt, wobei die grundlegenden Kenntnisse für eine Anwendung bereits vorhanden sind. [(19)]

3.2.5.3 Trockeneis

Der Bedarf an festem CO_2 ist gegenüber dem Bedarf an gasförmigen und flüssigen Kohlendioxid vernachlässigbar. Lediglich für Anwendungen, bei denen Gewicht eine Rolle spielt, ist es von Bedeutung. Beispiele sind der Transport von Nahrungsmitteln. [19]

3.2.6 Photo- und elektrochemische Reduktion von CO_2

Die photochemische Nutzung von CO_2 nimmt die Photosynthese grüner Pflanzen zum Vorbild. Die momentane Forschung beschäftigt sich mit der Entwicklung von Elektronendonatoren, die nach Anregung durch Licht CO_2 reduzieren. Die photochemische Nutzung befindet sich noch in der Grundlagenforschung und leidet an geringen Ausbeuten und Selektivitäten.

Die elektrochemische Nutzung basiert auf der Bereitstellung von Elektronen, die CO_2 in eine reduzierte Form überführen sollen. Anders als bei photochemischen Prozessen, werden die Elektronen nicht über die Anregung von Licht sondern durch Anlegen einer Spannung bereitgestellt. Auch die elektrochemische Reduktion von Kohlendioxid steht vor bisher ungelösten Herausforderungen im Bereich der Ausbeuten und Selektivitäten sowie der Katalysatorwahl. [18]

Im BMBF geförderten Projekt ECCO2 werden genau diese Herausforderungen adressiert. [51]

Abbildung 19: Künstliche Bäume nach Influx Studio [52]

3.3 Biologische Verfahren

Wie oben angeführt gibt es grundsätzlich drei Nutzungsmöglichkeiten für CO_2:

- Physikalische Nutzung
- chemische Nutzung und
- biologische / biotechnologische Nutzung

Bei einer biologischen / biotechnologischen Nutzung des Kohlendioxids können zum einen durch den Einsatz von Mikroorganismen, Enzymen oder Algen „Produkte“ wie Wasserstoff, Methan oder Algenmasse erzeugt werden. Zum anderen können aber auch Holz bzw. Wurzelwerk oder Humus „hergestellt“ und damit CO_2 längerfristig aus der Atmosphäre sequestriert werden.

Werden die feste Biomasse, die Algen oder der Wasserstoff bzw. das Methan energetisch genutzt, dann erfolgt dies dementsprechend CO_2-neutral, das CO_2 wird aber dennoch wieder der Atmosphäre zugeführt.

Die physikalischen und chemischen Verfahren benötigen ein sehr reines CO_2, verbunden mit einem entsprechenden Aufwand für die Abtrennung. Bei den biologischen / biotechnologischen Verfahren ist dagegen ein direkter Einsatz des Rauchgases als CO_2-Quelle möglich. Hier dient das Abgas direkt als wachstumsbeschleunigendes Medium für die Algen, Mikroorganismen und Pflanzen. Daher ist es sinnvoll, eine biologische Nutzung in der Nähe des Kraftwerks-/Industrie-Standorts anzusiedeln. Dies ist einer der Gründe, welche die biologischen/biotechnologischen Verfahren für die CO_2-Nutzung interessant machen. [18]

Laut Parsons Brinckerhoff besitzt die Brennstoffproduktion aus Mikroorganismen ein Potential von > 300 Mt/a weltweit zur kurzfristigen Einbindung von CO_2. [52]

Eine für den Klimaschutz höhere Wirkung kann durch die Kopplung von Biomasseeinsatz und CCU-Technologie erreicht werden. In diesem Fall werden „negative Emissionen“ erreicht, da CO_2 hierbei dauerhaft der Atmosphäre entzogen wird. Allerdings sind die Umsetzungsmöglichkeiten aufgrund der limitierten Biomassepotentiale und Faktoren wie Boden, Wasser sowie Klima begrenzt (siehe Tabelle 5) [18]

Tabelle 5: CO_2-Einbindung in Biomasse [53]

Region	Biomasse (Bäume) t CO_2 / ha /a	Wurzelwerk / Humus (dauerhafte Bindung) t CO_2 / ha
Kurzumtriebsplantagen gemäßigte Breiten	37	1.000
Tropischer Trockenwald	55	90
Bambuswald	47	100
Wüstenaufforstung	9	90

3.3.1 Direktnutzung in der Landwirtschaft

Kohlendioxid wird seit geraumer Zeit als wachstumsförderndes Mittel beim Grünpflanzenanbau in Gewächshäusern eingesetzt.

Die Anreicherung von Gewächshausluft mit Kohlendioxid ist für einige Anbaukulturen verbreitet und technologisch ausgereift. [25] Das benötigte CO_2 kann zum Beispiel aus der Verbrennung von Erdgas in Gasöfen, die zur Beheizung der Gewächshäuser dienen, bereitgestellt werden. [25] [54] Der Abgasstrom wird ohne Aufreinigung direkt in das Gewächshaus geleitet. Der durchschnittliche CO_2-Gehalt im Abgas liegt bei 9 %. [55] Dabei wird in den Gewächshäusern eine CO_2-Konzentration von etwa 600 ppm eingestellt, wodurch ein um etwa 30 % gesteigertes Pflanzenwachstum erreicht werden kann. [25] Um die nötige Kohlenstoffkonzentration aufrechtzuerhalten und das Pflanzenwachstum zu fördern, wird auch im Sommer Erdgas verbrannt und die Abwärme ungenutzt in die Umwelt entlassen, was zu unnötigen Ressourcenverbrauch und CO_2-Emissionen führt. Um dies zu verhindern, sollte das Kohlendioxid aus anderen Quellen für die Gewächshausdüngung eingesetzt werden.

Ein 2005 realisiertes Projekt für die Nutzung von CO_2 in Gewächshäusern ist OCAP (Organic Carbon dioxide for Assimilation of Plants). [56] Anfallende CO_2-Emmissionen aus Raffinerien in Rotterdam werden durch eine Pipeline in Gewächshäuser der umliegenden Region geleitet. Aktuell wird eine Anbaufläche von 1900 ha mit etwa 400 kt CO_2/a versorgt. Dadurch wird eine Verbrennung im Sommer unnötig, und es können geschätzt 200 kt CO_2/a eingespart werden. Im Winter hingegen laufen die Gasöfen, um die benötigte Wärme zu generieren, wodurch die Abnahme von Kohlenstoffdioxid saisonalen Schwankungen unterliegt. Dennoch ist die OCAP-Versorgung mit CO_2 seitens des Angebots limitiert. [57]

3.3.2 Biologische Nutzung mittels Algenkulturen

Bisher dient die Kultivierung von Algen vor allem der Bereitstellung von Rohstoffen für die chemische und pharmazeutische Industrie sowie zur Produktion von Lebensmittelzusätzen bzw. als Nahrungsmittel. Sowohl Makro- als auch Mikroalgen können eingesetzt werden, die in offenen oder geschlossenen Systemen abseits von landwirtschaftlichen Flächen durch Fotosynthese erzeugt werden. Die Produktion von Algen als Feedstock für energetische Anwendungen (z.B. zur Produktion von Biokraftstoffen) befindet sich noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. [58] Offene Fragen drehen sich vor allem darum, ob und unter welchen Rahmenbedingungen die anvisierten hohen Erträge zu erreichen sind.
Vorteil ist, dass eine ausgewiesen hohe Menge an Biomasse ohne Nutzungskonkurrenz und praktisch ohne Inanspruchnahme von landwirtschaftlichen Flächen durch Algenproduktion erreicht werden kann. [59] Bekanntester Prozess ist hierbei die Kultivierung von Mikroalgen, die eine sehr hohe Wachstumsrate und damit CO_2-Einbindungsrate aufweisen.

Vorteile der Verfahren von Algenkulturen zur Nutzung von CO_2 sind: [24]

- Höhere Wachstumsraten als Landpflanzen, Algen wachsen 10-30 mal schneller
- Entschärfte Konkurrenz zu Anbauflächen für Nahrungsmittel
- Aus Algenbiomasse können hochwertige Produkte erhalten werden (Farbstoffe, Lipide)
- Algen können in Abwässern (Nährstoffquelle) kultiviert werden und zur Reinigung dieser beitragen

- Geringere Empfindlichkeit gegenüber Rauchgaskomponenten wie Stick- oder Schwefeloxide (bis zu 150 ppm) oder Schwermetalle

Deutlich Nachteile erwachsen den Verfahren aus der Notwendigkeit die Algensuspension (mit ca. 2 % Algenmasse) immer gleichmäßig umzuwälzen, damit die Lichtzufuhr und Nährstoffverteilung gewährleistet ist. Dieses stellt ein wesentlicher Energiefaktor dar, da bei diesen Verfahren immer wieder 98% Prozesswasser bewegt werden muss, was in Summe deutliche Kosten verursacht. Auch ist insgesamt die Ausbeute der Algenbiomasse bezogen auf die Gesamtmenge gering. Daher ist zum heutigen Stand die Kosten-Nutzen-Analyse für geschlossene Algensysteme noch negative. Sonderfälle stellen Grundstoffe für Feinchemikalien und Pharmazie dar.

Mikroalgen als Beispiel für die CO_2-Nutzung [60] [61]

Der Fokus liegt hier auf autotrophen Mikroorganismen, die CO_2 fixieren und mit Hilfe von Energie in Form von Sonnenlicht sowie zusätzlichen Nährstoffen (Stickstoff, Phosphor, Schwefel etc.) Wertstoffe oder Energieträger produzieren. Die Umsetzung von CO_2 mittels Mikroalgen kann zur Produktion von Biokraftstoffen, Biogas, Nahrungsmittel oder Nahrungsergänzungsmittel, Tierfutter oder Kosmetika genutzt werden.

Mikroalgen bieten grundsätzlich das Potential, auf der gleichen Grundfläche bzw. bei gleicher Sonneneinstrahlung 5 bis 10-mal so schnell Biomasse zu bilden und CO_2 einzubinden als andere schnellwachsende Landpflanzen. Allerdings gibt es aufgrund der Abhängigkeit vom Sonnenlicht deutliche jahreszeitliche Schwankungen im Wachstum, was einen kontinuierlichen ganzjährigen Betrieb behindert. Die CO_2-Einbindung bezogen auf die Anlagengröße ist sehr gering, wie auch der Algenanteil in der Suspension mit ca. 2 %.

Die Verwendung von Mikroalgen zur Produktion von Kosmetika oder als Nahrungsmittelergänzung entspricht nicht den Zielsetzungen der CO_2-Nutzung. Zum einen steht bei diesen Produkten nicht die CO_2-Minderung im Fokus, zum anderen sind die hier ggf. einsetzbaren CO_2-Mengen in Relation zu den CO_2-Mengen der Energiewirtschaft vernachlässigbar gering.

Für das Verfahren der Mikroalgen als CO_2-Nutzungsoption werden daher neue Ansätze und Technologien an verschiedenen Stellen entwickelt, welche den Rahmenbedingungen der CO_2-Nutzung in der Energiewirtschaft entsprechen.

Beispielsweise muss die Algenanlage direkt am Kraftwerk angeordnet werden, damit Kraftwerksrauchgase eingesetzt werden können. In geeigneten Reaktoren wird dann die Algensuspension mit Rauchgas beaufschlagt, um eine optimale Biomassebildung zu erreichen. Die neu gebildete Algenbiomasse muss schließlich aus der Suspension abgetrennt (geerntet) werden. Von entscheidender Bedeutung ist dann die Frage, in welcher Weise die Algen anschließend genutzt werden sollen. Günstig sind Prozesse, bei dem der noch hohe Wassergehalt der geernteten Algen nicht stört. In den meisten Fällen ist jedoch eine energieintensive Trocknung der Algen vorzunehmen. Wird die Trocknung in die Betrachtung der Prozesskette eingebunden, ergibt sich durch die benötigte Energie meistens eine ungünstige CO_2-Bilanz.

Nachfolgend sind unterschiedliche Verfahren, die zur Produktion von Biokraftstoffen genutzt werden können, aufgeführt. Es wird zwischen vier verschiedenen Algenkraftstoffen unterschieden:

Biodiesel: Nach Abscheidung und Aufkonzentration der Algenmasse kann durch Umesterung Öl gewonnen werden, mit Eigenschaften vergleichbar dem Dieselkraftstoff. Bei der Synthese zu Biodiesel werden die im Zellinnern der Mikroalgen enthaltenen Lipide extrahiert und raffiniert.

Bioethanol: Die Kohlenhydrate, die einen großen Anteil der Algenmasse ausmachen, können durch alkoholische Gärung zu Ethanol umgesetzt werden.

Biogas: Durch Vergärung der Algenmasse zu Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2) kann energiereiches Biogas produziert werden.

Biowasserstoff: Einige Algenarten bilden unter bestimmten Bedingungen Wasserstoff (H_2).

Nach Pulz [(62)] entstehen aus ca. 2 Tonnen CO_2 etwa 1 Tonne Algenbiomasse, woraus 0,2 bis 0,5 Tonnen Biodiesel gewonnen werden können. Zusätzlich werden, sozusagen als Nebenprodukt, noch 1,6 Tonnen Sauerstoff produziert.

Die Erzeugung von Mikroalgenöl ist derzeit allerdings noch in der Entwicklungsphase und aufgrund der hohen Kosten für die Extraktion nicht in industriellem Großmaßstab wirtschaftlich umsetzbar.

Zurzeit kann Algendiesel aber schon zu einem Preis von 30 bis 40 Cent je Liter hergestellt werden. Zum Vergleich: die Herstellung von einem Liter Diesel aus fossilem Erdöl kostet etwa 20 Cent. [(63)]

Prinzipiell ist ein Einsatz des Öles neben der Nutzung als Biodiesel auch in Form von Kerosin in der Luftfahrt möglich. Erste Flüge mit reinem Algentreibstoff sind bereits erfolgreich durchgeführt worden. [(64)]

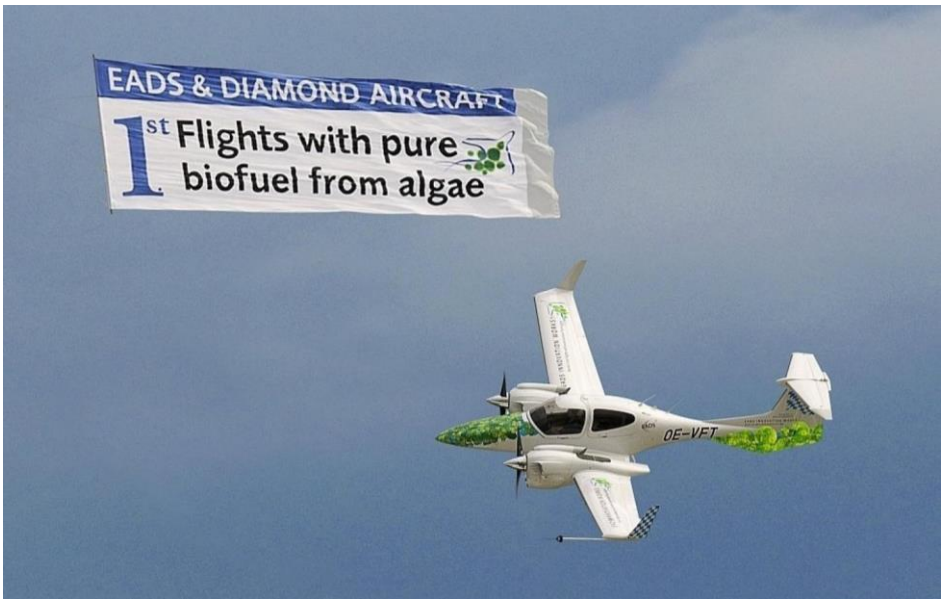


Abbildung 20: EADS erster Flug mit einem Algentreibstoff betriebenem Flugzeug. [(64)]

Kultivierung von Mikroalgen

Die Kultivierung kann in zwei verschiedenen Systemen realisiert werden. Zur Verfügung stehen offene Systeme wie open-raceway ponds und geschlossene Fotobioreaktoren.

Offene Systeme sind oft natürliche oder künstlich angelegte Seen, in denen in wenigen 10 cm Wassertiefe Algen kultiviert werden. Ein Beispiel für die kommerzielle Nutzung dieser Seen ist die Kulti-

vierung von *Dunaliella salina* und die anschließende s-Carotin-Isolierung von BASF Health and Nutrition in Australien. In so genannten „raceway ponds“ wird eine Algensuspension über Schaufelräder umgewälzt. Atmosphärisches CO_2 aber teilweise auch angereicherte CO_2-Gasströme dienen als Kohlenstoffquelle. Trotz dieser Maßnahmen ist die Raumzeitausbeute mit 3–15 g Biomasse/($m^2 \times d$) noch sehr niedrig. [65] [61] Kommerziell werden „raceway ponds“ z.B. von Cyanotech auf Hawaii eingesetzt, um *Spirulina* für den Nahrungsmittelmarkt zu produzieren. [20]
Insgesamt haben sich diese Verfahren trotz ihrer technologischen Einfachheit nicht durchgesetzt.

Geschlossene Kultivierungssysteme [65]

In verschiedenen Projekten werden oder wurden Anlagen mit Fotobioreaktoren errichtet, um die Technologie auf ihre grundsätzliche Eignung hin zu untersuchen und Optimierungen in der Technik zu erzielen. Im Vergleich zu den offenen Systemen sind Fotobioreaktoren (PBR) technisch sehr anspruchsvoll, kosten- und energieintensiv. Allerdings ermöglichen sie eine gezielte Prozessführung und eine deutlich höhere Flächennutzung. Aufgrund des erhöhten Energiebedarfs, speziell für die Durchmischung des Systems, muss auf eine positive Energiebilanz geachtet werden.

Beispiele

Weltweit gibt es für die industrielle Algenproduktion in geschlossenen Produktionsanlagen zwei Beispiele, deren Investitionen durch öffentliche Forderung unterstützt wurden: In der weltweit größten geschlossenen Anlage in Klötze, Deutschland wird *Chlorella vulgaris* in 500 km mineralischen Glasrohren mit einem photoaktiven Kultivierungsvolumen von 700.000 L von BPS (Roquette) produziert. [66]

Die spanische Aurantia-Gruppe hat 2011 eine Algen-Produktionsanlage mit einem Gesamtvolumen von 85.000 L in Andalusien in Betrieb genommen. In den 35 km Glasrohren auf 1000 m^2 Grundfläche werden energiereiche Öle für die Treibstoffproduktion unter Verwendung von Kohlendioxid aus einer benachbarten Zementfabrik hergestellt. [65]

Beispiele für geschlossene Anlagen im Pilot- und Demonstrationsmaßstab finden sich unter anderem auch in Deutschland und in den Niederlanden: SUBITEC [67], SSC [68] in Hamburg in Kooperation mit dem Hansewerk [69], Phytolutions [70] und RWE [71] in Bergheim-Niederaussem, AlgaePARC [72] in den Niederlanden. Dieser aber auch einige weltweite Projekte [62] [73] zielen darauf ab, Mikroalgen als CO_2-Senke und als Quelle für Energiequellen (Biokraftstoffe) zu nutzen. Sie werden von großen Energie- oder Ölfirmen wie RWE und ExxonMobile mit öffentlichen Fördermitteln unterstützt. [74]

Abbildung 21: Fotobioreaktoren der RWE-Algenprojekt in Bergheim-Niederaussem [71]

Zusammen mit dem Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE) der Technischen Universität Hamburg (TUHH), der Uni Erlangen und der Uni Busan (Korea) arbeitet die HanseWerk AG seit 2013 in einem Verbundprojekt namens ALBIRA (Grundlagen für mikroalgenbasierte Bioraffinerie-Konzepte) an der Entwicklung von Verfahren und Prozessen zur großtechnischen Produktion von Mikroalgen und deren Nutzung. [69]

Die Strategic Science Consult GmbH besitzt und betreibt seit März 2013 eine 200 qm große Bioreaktorfassade an einem Wohnhaus in Hamburg Wilhelmsburg (BIQ - Das Algenhaus). [75]

Abbildung 22: BIQ - Das Algenhaus. [75]

Auch BASF forscht im Wachstumscluster Weiße Biotechnologie an den innovativen Technologien der Biokatalyse und Fermentation. Mit Solix Biofuels [76] wird an Großtechnischen Lösungen für die Herstellung von Spezialchemikalien und Treibstoff mittels Algen gearbeitet. Weiter entwickelt BASF neue Technologien zur Nutzung von CO_2 zur Herstellung von Kunststoffen, Kunststoffvorprodukten oder wichtigen Zwischenprodukten. [77]

Abbildung 23: Kooperation von BASF mit Solix Biofuels. [76]

In einer Forschungskooperation von RWE und BRAIN (zwischen 2009 - 2013) wurde die Umwandlung von Kohlendioxid mit Mikroorganismen in Biomasse oder direkt zu Wertstoffen untersucht. Ziel war es, Mikroorganismen zu züchten und mit ihnen innovative CO_2-Umwandlungs- und Synthesewege zu erforschen, welche die CO_2-haltigen Rauchgase aus Braunkohlenkraftwerken effektiv umwandeln können. Am Ende bietet das Verfahren Produkte wie Biomasse, aus welcher industriell nutzbare Produkte wie neue Biomaterialien, Bio-Kunststoffe und chemische Zwischenprodukte entstehen. [78]

In dem Projekt „Aufwind“ mit der Laufzeit bis 31.08.2016, an dem sich auch Airbus beteiligt, dienen Algen als Rohstoff für Biotreibstoff. In dem Verbund-Projekt von Wissenschaft und Industrie (mit einer Förderung vom BMBF und BMEL) wird die Produktion und die Verwendung algenbasierter Kraftstoffe -Nachhaltiges Kerosin aus Algenöl -, für die Luftfahrt evaluiert. Dazu wurden Pilot- und Demonstrationsprojekte implementiert, in denen Optionen für die Biokerosinproduktion und -nutzung im Hinblick auf Kriterien wie Energiebilanz und –effizienz, Ökologischer Footprint, Sicherung und Ausbau von Arbeitsplätzen, Verfügbarkeit und Skalierbarkeit, Sicherung der Rohstoff(Treibstoff)versorgung oder der Kompatibilität von Biokerosin mit Flugzeugen und Infrastrukturen entwickelt, demonstriert und bewertet werden. Weiter wurden Möglichkeiten einer vollständigen energetischen und stofflichen Nutzung landwirtschaftlich erzeugter Algenbiomasse, energieeffiziente Herstellungsverfahren sowie die Schließung des Nährstoff- und Wasserkreislaufs demonstriert. Gefördert wird das Vorhaben durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Aber noch stehen die Forscher am Beginn, wirtschaftlich tragfähige Verfahren zu entwickeln. [79]

Forschungsprojekt in Bergheim-Niederaussem:

Laut RWE wird die Abtrennung von CO_2 aus Abgasen und Nutzung in Zukunft eine bedeutende Rolle zur Reduktion von CO_2-Emissionen spielen. [80]

In dem Forschungsprojekt in Bergheim-Niederaussem wurde von 2008 – 2011 eine klimawirksame Wiederverwertung und Fixierung von CO_2 durch Mikroalgen evaluiert. Dort entstand die weltweit fortschrittlichste Algenzuchtanlage zur CO_2-Konversion in Bioreaktoren. In der rund 600 Quadratmeter großen Versuchsanlage wurden Mikroalgen mit Rauchgasen beaufschlagt und daraus Biomasse

produziert sowie Verwertungsmöglichkeiten etwa als Biosprit erforscht. RWE in Kooperation mit Phytolutions konnte erfolgreich nachweisen, dass es möglich ist, mit diesem Verfahren CO_2 zu fixieren und effektiv Algenbiomasse als Rohstoff für weitere Anwendungen zu produzieren. Der nächste Schritt, eine großtechnische Anlage zu bauen, scheitert zurzeit an dem hohen Platzbedarf einer entsprechenden Fermentationsanlage zur nachfolgenden Produktion von Methangas. Für 1 Mt CO_2 würde eine Fläche von 100 Quadratkilometern benötigt. Nach der Einschätzung von Herrn Doll, RWE ist keine Technologie allein in der Lage, die anfallende Kohlendioxidmenge zu bewältigen. Daher müssen Teillösungen zu einem Ganzen zusammengefügt werden, wobei die Biotechnologie eine maßgebliche Rolle spielen aber über einen niedrigen zweistelligen Prozentsatz nicht hinauskommen wird. Für das gesamte mikrobiologische Projekt hat der Energieriese bereits zwei Millionen Euro investiert. [75]

3.3.3 Biotechnologische Nutzung mittels Mikroorganismen

Bakterien und Archaeen zur Umwandlung von CO_2

Neben Algen kommen bei der biologischen Umwandlung von CO_2 auch Mikroorganismen zum Einsatz. Im Gegensatz zu Mikroalgen handelt es sich hierbei jedoch um keine pflanzlichen Organismen, sondern um Bakterien und Archaeen. Dabei wird die Fähigkeit von Mikroorganismen genutzt, CO_2 aufzunehmen und zu geeigneten chemischen Substanzen zu reduzieren.

Die notwendige Energie muss hier durch einen stofflichen Energieträger wie z. B. Wasserstoff eingebracht werden, der oxidiert werden kann.

Industrielle Verfahren, die lebende Organismen (z.B. Pilze oder Bakterien) oder auch Teile dieser Organismen (z.B. Enzyme) nutzen, werden als Verfahren der „weißen Biotechnologie“ bezeichnet. Diese sind als industrielle Prozesse etabliert, wie beispielsweise die Herstellung des Medikamentes Penicillin aus Pilzen oder der Einsatz von speziellen Waschmittelenzymen. Die besondere Stärke der weißen Biotechnologie liegt in der Herstellung komplexerer Verbindungen. [60]

Mit Archeen (anaerobe Mikroorganismen) als Katalysatoren kann auch eine Methanisierung von CO_2 erreicht werden. Dabei wird H_2 direkt in den Bioreaktor geleitet, wodurch die Methanausbeute gesteigert wird und für Power-to-Gas Konzepte genutzt werden kann. Um die biologische Methanisierung nachhaltig zu betreiben, muss der benötigte Wasserstoff aus erneuerbaren Energien stammen. Man geht davon aus, dass der Eintrag von Wasserstoff in die flüssige Phase für die Limitierung der Reaktionsgeschwindigkeit verantwortlich ist und damit eine der großen Herausforderungen für den Prozess darstellt. Eignen kann sich die biologische Methanisierung bei kleinen Anlagen oder geringer Qualität des Eingangsgasstromes. [81]

Bis zur kommerziellen Einsatzreife der Umwandlung von Kohlendioxid mit Bakterien und Archaeen sind noch einige Entwicklungsschritte zu absolvieren. Die gesamte Kette vom Kraftwerks-CO_2 zu einem gewünschten Zielprodukt muss mit angemessener Prozessgeschwindigkeit realisiert werden können, Reaktorkonzepte für diesen Spezialfall eines biotechnologischen Prozesses müssen geprüft und gegebenenfalls angepasst werden, und die Skalierbarkeit des Verfahrens vom Labor- zum Pilotmaßstab und final zur kommerziellen Anlage muss unter Beweis gestellt werden. [20]

Fazit:

Die Nutzung und Umwandlung von CO_2 mit Hilfe von biologischen/biotechnologischen Verfahren stellt eine interessante Option zur CO_2-Fixierung und gleichzeitig einen Beitrag zur effektiven Ressourcennutzung dar. Um sie kommerziell verfügbar zu machen, sind noch erhebliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu leisten. Diese betreffen insbesondere die Effizienz der Verfahren; sowohl die spezifische Produktionsleistung als auch die Energiebilanz müssen noch optimiert werden.

4 Regionale Infrastruktur

Die Emscher-Lippe-Region umfasst zehn kreisangehörige Städte des Kreises Recklinghausen sowie die beiden kreisfreien Städte Bottrop und Gelsenkirchen (dargestellt in Abb. 24). Insgesamt leben rund eine Million Menschen in dieser Region, die zum Regierungsbezirk Münster gehört.

Abbildung 24: Die Emscher-Lippe-Region.

In den vergangenen Jahrzehnten hat sich die im nördlichen Ruhrgebiet ansässige traditionelle Bergbau- und Industrieregion zu einem Standort für innovative Zukunftstechnologien und moderne Dienstleistungen entwickelt. Dabei fand ein starker und schneller Wandel der Einwohnerzahlen, Wohnstrukturen sowie der Wirtschafts- und Arbeitsfaktoren statt. Im Rahmen der Umstrukturierung ist die Region einem großen Wettbewerb ausgesetzt, um die Ansiedlung innovativer, zukunftsfähiger Unternehmer, deren Mitarbeiter und Familien in der Region zu ermöglichen.

Die Wirtschaftsstruktur der Emscher-Lippe-Region, u.a. geprägt durch den Kohleabbau und deren Verbrennung, wandelt sich diesbezüglich hin zu einer Kompetenzregion für Zukunftsenergien und innovativer Energieverwendung. So sind in der Region u.a. Produzenten von Wärmepumpen, Blockheizkraftwerden (BHKWs) und Zulieferer für Windkraftanlagen beheimatet. Besonders stark geprägt wird die Emscher-Lippe-Region durch Unternehmen aus der Petro- und der Chemischen Industrie sowie deren Zulieferer, die in besonderem Maße auf eine leistungsstarke Chemielogistik und ein gut ausgebautes Verkehrsnetz angewiesen sind und in Deutschland eine Vorreiterrolle einnehmen. Das Ruhrgebiet und NRW bieten hierfür optimale Voraussetzungen. Über das dichte Netz an Autobahnen, Schienen- und Wasserwegen ist die Region in Deutschland und Westeuropa sehr gut zu erreichen. Teile der chemischen Industrie, wie die Basischemie oder die Petrochemie sind in der Produktion auf die stetige Versorgung mit Flüssigkeiten oder Gasen angewiesen. Pipelines übernehmen die Funktion des Stofftransports zwischen den einzelnen Standorten und sind darüber hinaus an wichtige deutsche und europäische Rohrleitungssysteme angebunden [(82).]

Diverse Institutionen treiben die technologische Entwicklung in der Region weiter voran. So wird bspw. im Rahmen der Innovation City Ruhr – Modellstadt Bottrop ein klimagerechter Stadtumbau bei gleichzeitiger Sicherung des Industriestandorts entwickelt. Konkret sollen dazu der Energieverbrauch

und die CO_2-Emissionen halbiert und die Lebensqualität gesteigert werden. Neben der Nutzung von Solar- und geothermischer Energie, Wärmepumpentechnologie und Grubengas, repräsentiert der Einsatz von Biomasse ein weiteres Anwendungs- und Förderfeld in der Emscher-Lippe-Region. In dieser Region wird das komplette Spektrum der Biomasseumwandlungstechnologien abgedeckt. Hier profitiert man von kurzen Wegen zwischen den Biomasseerzeugern im ländlichen Norden und den Biomasseverbrauchern in den urbanen Gebieten im Süden [82].

Die Emscher-Lippe-Region profitiert zudem von 100 Jahren Erfahrung im Umgang mit Wasserstoff, der bei der Nutzung von CO_2 sowie in der Energiewende eine Schlüsselrolle einnehmen kann. Durch die Verwendung von Wasserstofftechnologien wird es möglich, überschüssige Energie, wie etwa aus Windkraftanlagen bei starkem Wind, zu speichern und bei Bedarf zurück zu verstromen [82]. In Kapitel 4.3. wird die Infrastruktur für Wasserstoff detailliert untersucht.

In der weiteren Betrachtung der regionalen Infrastruktur in der Emscher-Lippe-Region sollen die relevantesten CO_2-Emittenten dargestellt und potentielle Abnehmer des CO_2 identifiziert werden. Um diese analysieren zu können, werden nun kurz die wichtigen infrastrukturellen Faktoren in der Region dargestellt. Hierzu gehören die ansässigen Chemie- und Industrieparks sowie die Kraftwerke in der Region, die aufgrund der geplanten Klimaziele zunehmend Vorgaben unterliegen und teilweise abgeschaltet werden.

4.1.1 Darstellung der wichtigsten Chemieparks in der Region

In der Emscher-Lippe-Region sind vier Chemie- und Industrieparks als besonders relevant zu benennen. Hierzu gehören der Chemiepark Marl, die Raffinerie Gelsenkirchen-Scholven, der Chemiestandort Castrop-Rauxel und der Industriepark Dorsten/Marl. Die dort ansässigen Unternehmen spielen insbesondere für die potentielle Nutzung des CO_2 in der Emscher-Lippe-Region eine entscheidende Rolle.

Chemiepark Marl

Der Chemiepark Marl ist der Kernakteur der Chemischen Industrie in der Emscher-Lippe-Region. Rund um die Uhr sind über 100 Produktionsanlagen in einem engen stofflichen und energetischen Verbund in Betrieb. Das Gelände des Chemieparks Marl erstreckt sich über eine Fläche von 6,5 Quadratkilometern – eine hochmoderne, chemietypische Infrastruktur. Im Chemiepark Marl sind rund 10.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter beschäftigt [83].

Abbildung 25: Chemiepark Marl [127]

Die Evonik Industries AG ist mit diversen Tochtergesellschaften und Beteiligungen im Chemiepark Marl vertreten, u.a. Evonik Creavis GmbH, Evonik Resource Efficiency GmbH, Evonik Degussa GmbH oder TÜV Nord InfraChem GmbH & Co. KG. Des Weiteren sind verschiedene nationale und internationale Unternehmen im Chemiepark ansässig, hierzu gehören z.B. Air Liquide Deutschland GmbH, Linde Gas Produktionsgesellschaft mbH & Co. KG, Sasol Germany GmbH und Vestolit GmbH.

Etwa 4,4 Millionen Tonnen Produkte werden jährlich im Chemiepark Marl im Stoffstromverbund hergestellt, hierzu gehören u.a. Benzol, Ethylen, Propylen, C4-Schnitt, Acetylen, Synthesegas, Phenol, Fettalkohol und Chlor. Die Versorgung mit Rohstoffen sowie die Distribution erfolgt mittels Fernleitungen, Schiff, Bahn und Lkw. Der Energiebedarf des Chemieparks Marl wird durch die Erzeugung von Strom und Dampf (Kraft-Wärme-Kopplung) in zwei eigenen Kohle- und einem Gaskraftwerk gedeckt. Die Gesamtleistung beträgt über 300 MW und mehr als 1000 t Dampf/Stunde [83].

Gelsenkirchen-Scholven

Abbildung 26: Chemiepark Gelsenkirchen-Scholven [128]

In Gelsenkirchen betreibt BP zwei Werke in den Stadtteilen Horst und Scholven als einen integrierten Raffineriestandort mit Petrochemieanlagen. Das Werksgelände umfasst in Horst ein Areal von etwa 160 Hektar, in Scholven von etwa 250 Hektar. Die BP Gelsenkirchen GmbH ist mit ca. 1.700 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie 170 Auszubildenden einer der größten Arbeitgeber der Stadt und der Region [84].

Die Produktionsanlagen gehören der Ruhr Oel GmbH, einem Gemeinschaftsunternehmen von BP (50%) und dem russischen Mineralölunternehmen Rosneft (50%). Aus rund 12 Mio. t Rohöl werden insgesamt mehr als 50 verschiedene Produkte hergestellt. Dies sind hauptsächlich etwa 9 Mio. t Benzin, Diesel, Düsentreibstoff und Heizöl sowie Bitumen und Petrolkoks und ca. 3 Mio. t petrochemische Produkte vor allem für die Kunststofferzeugung. Die Distribution der im Chemiepark hergestellten Produkte erfolgt zu 4% über die Schiene, zu 16% über die Straße, zu 22% per Schiff und zu 58% über Pipelines [84].

Castrop-Rauxel

Am Standort Castrop-Rauxel werden von der RÜTGERS Germany Basis- und Spezialchemikalien für verschiedene Industrien produziert. Auf dem gut 100 Hektar großen Standort sind circa 460 Mitarbeiter in Produktionsanlagen, Werkstätten und der Verwaltung tätig, darüber hinaus arbeiten weitere Dienstleister am Standort [85].

Abbildung 27: Industriepark Castrop-Rauxel [129]

Die RÜTGERS Germany GmbH ist mit ihren Tochtergesellschaften: RÜTGERS Basic Aromatics GmbH, RÜTGERS Aromatic Chemicals GmbH und RÜTGERS InfraTec GmbH am Standort vertreten. Des Weiteren haben sich insbesondere Unternehmen mit hohem Bedarf an Infrastruktur und Services, vor allem aus den Bereichen Logistik, Chemie, Recycling und Energie in Castrop-Rauxel angesiedelt [86].

Rütgers verfügt über ein effizientes Logistik-Netzwerk, um Produkte für die Aluminium- und Stahlindustrie, technische Öle, Naphthalin und andere Basis-Chemikalien über eine Beschaffungs- und Distributionslogistik aller Verkehrsträger (Fahrzeuge, Eisenbahnen und Schiffsverkehr) pünktlich zu liefern. Für die Energiesicherheit wird eine Gasturbine mit 10 MW Kraft-Wärme-Kopplung zur Strom- und Dampferzeugung verwendet [85].

Industriepark Dorsten/Marl

Abbildung 28: Industriepark Dorsten/Marl [130]

Der Interkommunale Industriepark Marl/Dorsten, im Eigentum der Evonik Steag GmbH, bietet Unternehmen auf 70 Hektar altlastenfreie Industriefläche. Insgesamt haben sich 20 Firmen angesiedelt, sodass mehr als 2000 Arbeitsplätze entstanden sind [87].

Angesiedelt sind insbesondere die verarbeitende Industrie (z.B. Kunststoffe, neue Materialien), chemienahe Unternehmen, Forschung und Entwicklung, Chemie-Logistik sowie Herstellung von Verbraucherprodukten (z.B. Waschmittel, Kosmetik, Lebensmittel, Verpackungen). Unternehmen profitieren auch hier von einer optimalen Infrastruktur. Im Industriepark wird eine Biogasanlage zur Energiegewinnung sowie zur sinnvollen Verwertung von Nährstoffen betreiben. Im Volllastbetrieb können im Jahresdurchschnitt etwa 500 Kilowatt Strom über Blockheizkraftwerke produziert werden [88].

4.1.2 Erreichung der Klimaziele durch den Kohleausstieg

Bei der Betrachtung der CO_2-Emittenten in der Region sind auch strukturelle Änderungen auf europäischer bzw. nationaler Ebene zu berücksichtigen. Die Mitgliedstaaten der Europäischen Union haben sich auf verbindliche Klima- und Energieziele festgelegt, die innerhalb der EU bis 2020 erreicht werden sollen. So sollen die Treibhausgasemissionen um 20% im Vergleich zum Basisjahr 1990 verringert werden, der Anteil an erneuerbaren Energien am Gesamtverbrauch auf 20 Prozent erhöht und die Energieeffizienz um 20 % verbessert werden. Auf nationaler Ebene wurden sich noch ehrgeizigere Ziele gesteckt, sodass bis 2020 eine Reduktion der Emissionen um 40% gegenüber dem Basisjahr und bis 2050 sogar um 80 - 95% bis 2050 angestrebt wird [89].

Nach Fischedick et al. müsste dann der Anteil an erneuerbarer Energie am Bruttoenergieverbrauch 2050 60% betragen. Eine Umstellung der Energiewirtschaft mit weitreichender Dekarbonatisierung und ein Erreichen des Klimaschutzziels den globalen Temperaturanstieg bis 2050 auf 1,5°C zu begrenzen, würde unter Einrechnung aller Effizienzmaßnahmen 1.320 TWH bedeuten (vgl. 521 TWh in 2015). Derartige Strommengen sind auf der Basis heimischer EE-Potentiale kaum realisierbar.

Die Einhaltung der gesteckten Ziele wird maßgeblich durch einen erfolgreichen Strukturwandel in NRW beeinflusst werden. Etwa ein Drittel der in Deutschland produzierten Energie stammt aus Nordrhein-Westfalen, sodass NRW das größte Energieland der Bundesrepublik ist. Dieser Verantwortung ist sich die Landesregierung bewusst und die Klimaziele für NRW dementsprechend hoch gesteckt. Bis 2020 sollen die Treibhausgasemissionen um mind. 25% und bis 2050 um mindestens 80% reduziert werden [90]. Dies hat unmittelbare Folgen für die Kraftwerke in der Emscher-Lippe-Region.

Durch die eingeleitete Energiewende und den geplanten Kohlerückzug schließen nicht nur die letzten beiden Zechen im Ruhrgebiet, welche sich beide in der Emscher-Lippe-Region befinden, sondern ebenso zahlreiche Kraftwerke, die nicht mehr benötigt werden. Dies stellt die Region vor neue Herausforderungen und birgt die Gefahr, dass der Region ihre viel beachtete Energiekompetenz verloren geht. Diese gilt es zu behalten und künftigen Bedürfnissen anzupassen [91].

Doch trotz eines immer höheren Anteils erneuerbarer Energien werden konventionelle Kraftwerke mittelfristig weiterhin einen wichtigen Beitrag zu einer zuverlässigen Energieversorgung leisten.

Hierbei wird die Nutzung von CO_2-armer Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)-Technologie, aber auch die Abscheidung von CO_2 aus konventionellen Kraftwerken eine größere Bedeutung einnehmen [92].

Die Energieversorgung in der Emscher-Lippe-Region-wurde maßgeblich von vier Kraftwerken geprägt, die in den letzten Jahrzehnten einem Strukturwandel unterlagen:

- **Kraftwerk Datteln:** In dem Steinkohlekraftwerk (ehemals EON, nun Uniper) wurden bereits drei Blöcke stillgelegt. Seit 2007 wird in Block eines der modernsten Steinkohlekraftwerke der Welt mit 1100 MW Leistung gebaut. Der Bau war zwischenzeitlich gestoppt, wird aber seit 2016 wieder fortgesetzt [93].
- **Kraftwerk Gelsenkirchen-Scholven**: In dem Steinkohle- und Heizölkraftwerk (EON, RWE) erzeugen die Blöcke B,C und FWK insgesamt 762 MW (netto) Strom, die übrigen Blöcke D, E und F wurden am Jahresende 2014 stillgelegt [93].
- **Kraftwerk Marl**: Am Standort Marl (Infracor) erzeugen drei Kraftwerke mit fünf Blöcken Dampf und Strom. Die Steinkohle-Blöcke sollen planmäßig stillgelegt werden, die restlichen Blöcke sollen weiter mit Erdgas betrieben werden. Ein altes Steinkohlekraftwerk (Block 3) wird durch eine hocheffiziente KWK-Anlage ersetzt. Die neue Anlage erzeugt eine elektrische Leistung von 60 Megawatt und eine thermische Leistung von 100 Megawatt, dabei sollen jährlich Einsparungen von etwa 280.000 Tonnen CO_2 pro Jahr möglich sein [94].
- **Castrop**-Rauxel: Das ehemalige Steinkohlekraftwerk wurde bereits 2001 stillgelegt und in den Folgejahren zurückgebaut. Zukünftig dient die Fläche zur Wohnbebauung.

Die Bundesregierung hat bisher keinen endgültigen Plan vorgelegt, bis wann der Kohleausstieg durchgesetzt und das letzte Kohlekraftwerk in Deutschland stillgelegt werden soll. Aufgrund der zum Teil unsicheren Laufzeiten älterer Kraftwerke sind für die Emscher-Lippe-Region aus langfristiger und struktureller Sicht das neue Steinkohlekraftwerk in Datteln und die KWK-Anlage in Marl von hoher Relevanz für die potentielle Nutzung von CO_2.

4.2 Spezifische regionale CO_2-Quellen

Die globalen CO_2-Emissionen hielten sich in den vergangenen Jahren auf einem stabilen Niveau von rund 32 Milliarden Tonnen pro Jahr [95]. In Deutschland sind die Treibhausgasemissionen im Jahr 2015 trotz der gesteckten Klimaziele leicht um 0,7 % gestiegen, was durch hohe Stromexporte, eine kühlere Witterung und günstigere Kraftstoffpreise begründet werden kann. Mit 908 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalente haben sich die Emissionen im Vergleich zum Basisjahr zwar um 27,2 % reduziert, die Zahlen zeigen dennoch die Notwendigkeit der Umsetzung von klimaschonenden Maßnahmen [96].

Das Bundesland Nordrhein-Westfalen hat im Jahr 2014 insgesamt 292,3 Mio. t CO_2-Äquivalente emittiert und ist damit für mehr als ein Viertel der bundesweiten Treibhausgasemissionen verantwortlich. Die Emissionen stammen vor allem aus dem Energiesektor (55 %), der Industrie (18,6 %), dem Verkehrssektor (11,4 %) sowie den Haushalten und Kleinverbrauchern (9,5%). Die Bereiche Landwirtschaft und Abfall sind mit 2,6 % und 0,2% von geringerer Bedeutung [97].

In der Emscher-Lippe-Region sind bisher nur detaillierte Kohlenstoffdioxidemissionsdaten aus dem Jahr 2012 verfügbar. Diese sind im Emissionskataster NRW [98] hinterlegt und zeigen für die Region folgende Teilregionen im Fokus der CO_2-Emissionen:

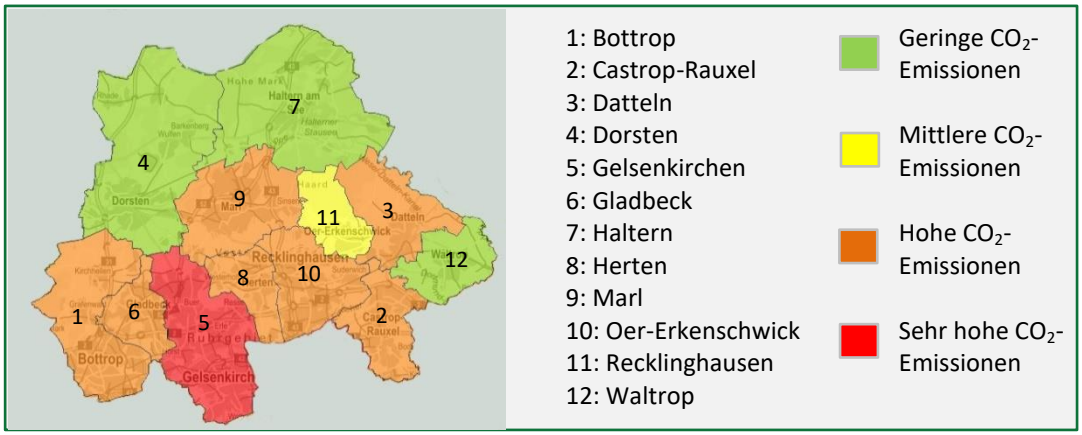


Abbildung 29: Emissionskataster Emscher-Lippe [99]

Aus den Daten ist zu erkennen, dass vor allem der Süden der Emscher-Lippe-Region maßgeblich für die entstehenden CO_2-Emissionen, die sich in der Region auf rund 23,7 Millionen Tonnen belaufen, verantwortlich ist. Insbesondere die Kreisstadt Gelsenkirchen (ca. 15 Millionen t), aber auch die Gemeinden in Marl (ca. 3,3 Millionen t) und Datteln (ca. 1,7 Millionen t) emittieren am meisten Kohlenstoffdioxid in der Emscher-Lippe-Region (siehe Tab. 6).

Unterteilt ist der CO_2-Austoß im Emissionskataster in die Emittentengruppen Industrie (beinhaltet Anlagen zur Energieerzeugung), Feuerung (Haushalte und Kleinverbraucher) und Verkehr. Der Sektor Landwirtschaft wird in dieser Darstellung nicht berücksichtigt:

Tabelle 6: CO_2-Emissionen in Tonnen pro Jahr (2012) auf regionaler Ebene

Gemeinde	Industrie	Feuerung	Verkehr	Gesamt	Pro km²
Bottrop	385.514	125.328	256.837	767.679	7.631
Castrop-Rauxel	131.697	103.111	123.445	358.254	6.927
Datteln	1.591.972	51.084	40.453	1.683.510	25.490
Dorsten	11.328	108.308	140.831	260.468	1.521
Gelsenkirchen	14.271.093	312.834	423.427	15.007.355	143.060
Gladbeck	341.619	104.922	146.276	592.818	16.484
Haltern	27.845	51.387	102.183	181.416	1.141
Herten	616.343	91.463	101.748	809.555	21.694
Marl	3.049.668	134.453	159.540	3.343.662	38.124
Oer-Erkenschwick	25.160	41.200	28.675	95.036	2.458
Recklinghausen	60.297	176.709	269.821	506.828	7.628
Waltrop	-	40.204	35.744	75.948	1.614
Gesamt:	**20.512.536**	**1.341.003**	**1.828.980**	**23.682.529**	

Tabelle 6 stellt die CO_2-Emissionen in der Region aus dem Jahr 2012 dar. Diese berücksichtigt daher noch Emissionen, die zum Stand 2016 zum Teil weniger relevant sind. Hierzu gehören u.a. die Kohlendioxidemissionen aus dem Kraftwerk Gelsenkirchen-Scholven, in dem im Jahre 2014 drei Anlagen stillgelegt wurden und sich die Emissionen damit deutlich reduziert haben. Noch nicht berücksichtigt sind andererseits Emissionen des neuen Steinkohlekraftwerkes in Datteln, welches im Jahre 2018 fertiggestellt werden soll. Der CO_2-Ausstoß des neuen Kraftwerks wird nach unterschiedlichen Quellen mit 6 bis 8 Mio. t jährlich angegeben, sodass der CO_2-Ausstoß in der Gemeinde Datteln deutlich zunehmen dürfte [(99)].

Dennoch lässt sich aus der oben dargestellten Tabelle bereits erkennen, dass in der Emscher-Lippe-Region trotz der bereits vollzogenen und wegen der noch ausstehenden strukturellen Veränderungen, die CO_2-Emissionen maßgeblich durch die ansässige Industrie geprägt werden. Über 20 Million Tonnen CO_2 wurden in 2012 in der Region durch industrielle Betriebe und Energieanlagen emittiert, wohingegen nur rund 1,3 Millionen Tonnen CO_2 durch kleine Feuerungsanlagen sowie ca. 1,8 Millionen Tonnen CO_2 durch den Verkehr verursacht wurden. Somit stellt die Industrie einen Anteil von über 86% der CO_2-Emissionen in der Emscher-Lippe-Region dar:

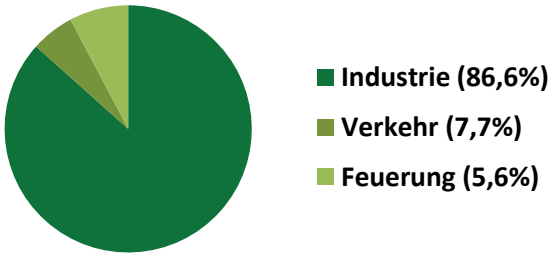


Abbildung 30: CO_2-Emissionen nach Sektoren.

Aufgrund der großen Bedeutung der industriell basierten CO_2-Emissionen richtet sich der Fokus dieser Studie für die weitere Analyse der CO_2-Emissionen auf den Sektor Industrie. Die Kohlenstoffdioxidemissionen aus den Sektoren Verkehr, Feuerung und auch Landwirtschaft werden auch aufgrund einer praktikablen Umsetzung der CO_2-Abscheidung nicht weiter berücksichtigt.

Um geeignete CO_2-Emittenten in der Region zu identifizieren, wurden für die Auswahl drei Kriterien festgelegt, nach denen die potentielle Nutzung der CO_2-Emissionen abgeschätzt werden kann. Hierzu gehören die Menge der CO_2-Emissionen, die Qualität des emittierten Kohlenstoffdioxids sowie die mögliche Nutzung von „grünem CO_2“. Anhand dieser drei Kriterien erfolgt am Ende des Kapitels eine Auswahl an Unternehmen, die als CO_2-Emittenten in der Emscher-Lippe-Region für eine potentielle Abscheidung des Kohlenstoffdioxids in Frage kommen.

4.2.1 Kriterium 1: Menge der CO_2-Emissionen

Zur Analyse der CO_2-Emissionen der Industriebetriebe in der Emscher-Lippe-Region wurde das Emissionskataster NRW als Untersuchungsgrundlage gewählt. Hier sind alle CO_2-Emissionen von Unternehmen ab einer relevanten CO_2-Menge aus dem Jahr 2012 hinterlegt. Um den umfassenden Industrie-Sektor anschaulicher darzustellen, wurde dieser in vier Unterkategorien eingeteilt: Chemische Industrie, Energiesektor/Raffinerien, Metallindustrie und Sonstige Industrien. In den nachfolgenden Tabellen werden die wesentlichen CO_2-Emittenten der Emscher-Lippe-Region aufgelistet sowie ihre

CO_2-Mengen und deren Geschäftsfeld beschrieben:

Die Chemische Industrie spielt in der Emscher-Lippe-Region aus wirtschaftlicher und struktureller Sicht eine besondere Rolle, was sich auch an den Emissionsdaten der Region erkennen lässt. Hier gilt es vor allem den Chemiepark Marl hervorzuheben, dessen Unternehmen einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtemissionen der Emscher-Lippe-Region haben. Zu nennen sind speziell die Infracor- sowie die Evonik-Anlagen, die für einen Großteil der Emissionen aus der Chemischen Industrie verantwortlich zeichnen.

Tabelle 7: CO_2-Emissionen der Chemischen Industrie (EKL-NRW, 2012) [98]

Unternehmen	Portfolio	Standort	CO_2 Menge (in kg/a)	Beschreibung der Emissionen
Rütgers InfraTec GmbH	Chemierohstoffe aus Steinkohlenteer	Castrop-Rauxel	100.657.316	Feuerungsanlagen feste, flüssige u. gasförmige Brennstoffe
Infracor GmbH	Chemische Dienstleistung	Marl	2.420.790.875	Metalloberflächenbehandlung. elektrolytisch, chemisch; Feuerungsanlagen feste, flüssige u. gasförmige Brennstoffe; Therm. Abfallentsorgung; Herstellung von Säuren Chrom-, Fluss-, Phosphor-, Salpeter-, Salz-, Schwefelsäure u.a. Chemische Behandlung gefährlicher Abfälle
VESTOLIT GmbH u. Co. KG	Herstellung von PVC	Marl	50.280.415	Herstellung von Säuren Chrom-, Fluss-, Phosphor-, Salpeter-, Salz-, Schwefelsäure und halogenhaltigen Kohlenwasserstoffen; Herstellung von halogenhaltigen Kohlenwasserstoffen
Evonik Oxeno GmbH	Produktion von 1,3-Butadien, 1-Buten, ETBE, Isononanol und den Weichmacher Diisononylphthalat (DINP).	Marl	283.284.377	Herstellung von Gasen NH3, Cl2, HCl, F2, HF, COx, S-Verb., NOx, H_2, SO2, Phosgen; Herstellung von sauerstoffhaltigen Kohlenwasserstoffen; Herstellung von Kohlenwasserstoffen
Evonik Degussa GmbH	Herstellung von keramischen Membranfolien	Marl	179.817.761	Herstellung von Basiskunststoffen; Herstellung von sauerstoffhaltigen Kohlenwasserstoffen

Der Energiesektor gehört traditionell zu den größten Emittentengruppen einer Wirtschaft, sowohl auf nationaler als auch regionaler Ebene. Die Steinkohle-Kraftwerke der Region verlieren aufgrund des geplanten Kohleausstiegs zwar immer mehr an Bedeutung, gehören aber weiterhin zu den Hauptemittenten der Region. Hierzu gehört das Steinkohlekraftwerk in Scholven, welches vor der Stilllegung dreier Anlagen Hauptemittent von CO_2-Emissionen in der Emscher-Lippe-Region war, zukünftig aber vom Neubau des Kohle-Kraftwerks Datteln 4 abgelöst werden wird. Weitere wichtige Emittenten sind darüber hinaus die Raffinerien der RUHR Oel Werke Scholven und Horst in Gelsenkirchen,

die in 2012 rund ein Fünftel der gesamten Emissionen in der Emscher-Lippe-Region verursacht haben.

Tabelle 8: CO_2-Emissionen des Energiesektors / Raffinerien (EKL-NRW, 2012) [98]

Unternehmen	Portfolio	Standort	CO_2 Menge (in kg/a)	Beschreibung der Emissionen
RUHR OEL GMBH Werk Scholven	Mineralölverarbeitung, Herstellung von Ethylen und Propylen	Gelsenkirchen	3.694.961.146	Verarbeitung von Erdöl, Erdölerzeugnissen (Raffinerien); Feuerungsanlagen feste, flüssige u. gasförmige Brennstoffe >= 50 MW; Herstellung von Nichtmetallen, Metalloxiden u. sonst. anorg. Verbindungen
Ruhr Oel GmbH Werk Horst	Mineralölverarbeitung	Gelsenkirchen	988.847.909	Verarbeitung von Erdöl, Erdölerzeugnissen (Raffinerien); Chemische Erzeugnisse, Arzneimittel, Mineralölraffination; Herstellung von Nichtmetallen, Metalloxiden u. sonst. anorg. Verbindungen
Kraftwerk Scholven (Uniper)	Steinkohlekraftwerk	Gelsenkirchen	9.341.112.000	Feuerungsanlagen feste, flüssige u. gasförmige Brennstoffe >= 50 MW
Minegas GmbH/Hugo Ost BHKW	Verbrennung von Grubengas (ehemals Steinkohlebergbau)	Gelsenkirchen	47.331.407	Feuerungsanlagen sonst. gasförmige Brennstoffe 10 -< 50 MW
E.ON DAMPFWERK ZWECKEL	Heizöl	Gladbeck	102.749.000	Feuerungsanlagen feste, flüssige u. gasförmige Brennstoffe >= 50 MW

In der Metallindustrie ist aus Sicht der CO_2-Emissionsmengen vor allem die ArcelorMittal Kokerei in Bottrop von großer Relevanz. Die vielen ansässigen mittelständischen Unternehmen in der Region werden alleine aufgrund ihrer Größe nicht für eine potentielle CO_2-Abscheidung berücksichtigt werden können, da die nutzbaren CO_2-Mengen in keinem Verhältnis zum Aufwand einer Implementierung der Abscheide-Technologien stehen.

Tabelle 9: CO_2-Emissionen der Metallindustrie (EKL-NRW, 2012) [98]

Unternehmen	Portfolio	Standort	CO_2 Menge (in kg/a)	Beschreibung der Emissionen
ArcelorMittal Bremen GmbH Kokerei Prosper	Kokerei: Koks, Gas und hochwertige Kohlenwert-stoffe	Bottrop	377.590.707	Trockendestillation von Kohle, Holz, Torf, Pech; Feuerungsanlagen feste, flüssige u. gasförmige Brennstoffe >= 50 MW
TRIMET ALU-MINIUM AG Niederlassung Gelsenkirchen	Guss, Recyc-ling und Ver-trieb von Aluminium	Gelsen-kirchen	10.516.522	Schmelzen, Legieren NE-Metalle >= 4 t/d Pb, Cd od. >= 20 t/d sonst. NE

Die Emscher-Lippe-Region kennzeichnet sich durch eine große Vielfalt an Unternehmen aus verschiedenen Industriezweigen aus. Für die Betrachtung der CO_2-Emissionen von großer Relevanz sind dabei vor allem die AGR Abfallentsorgungs-Gesellschaft Ruhrgebiet mbH in Herten, insbesondere aufgrund ihrer Müllverbrennungsanlage, sowie der Glasproduzent Pilkington AG in Gladbeck.

Tabelle 10: CO_2-Emissionen Sonstiger Industrien (EKL-NRW, 2012) [98]

Unternehmen	Portfolio	Standort	CO_2 Menge (in kg/a)	Beschreibung der Emissionen
Deutsche Rockwool Mineralwoll GmbH & Co. OHG	Dämmung	Gladbeck	62.073.000	Schmelzen mineralischer Stoffe und Mineral-fasern >= 20 t/d
AGR mbH Herten	Müllverbren-nung	Herten	616.025.552	Therm. Abfallentsorg. für feste, flüssige, ge-faßte gasförmige, gefährl. Abfälle od. Depo-niegas
Pilkington AG -Werk Glad-beck-	Glas	Gladbeck	176.620.330	Herstellung von Glas od. Glasfasern Schmelz-leistung >= 20 t/d
Quarzwerke GmbH	Gewinnung, Aufbereitung und Verede-lung von Quarzsanden	Haltern	27.845.347	Feuerungsanlagen HEL, Pflanzenöle, Metha-nol, Ethanol, Erdgas 20 -< 50 MW

Betrachtet man einzig die Emissionsmengen als Kriterium für die spätere Nutzung von CO_2, sind in der Emscher-Lippe-Region vor allem die Infracor GmbH sowie die Evonik Werke im Chemiepark Marl, die Ruhr Oel Werke in Gelsenkirchen, das Steinkohle-Kraftwerk in Datteln, die Arcelor-Kokerei in Bottrop sowie die AGR in Herten als größte Emittenten zu identifizieren.

4.2.2 Kriterium 2: Einschätzung der Kohlendioxidqualität

Eine Einschätzung der CO_2-Qualität der unter Punkt 4.2.1 aufgeführten Prozesse (Tabellen 7 - 10) gestaltet sich aufgrund der Informationslage als schwierig. Um eine hinreichende Aussage über die Qualität treffen zu können, sind detailliertere Prozessinformationen notwendig. Daher wird sich auf eine Beschreibung der Qualitätskriterien und einer Einschätzung weniger, greifbarer Emissionsquel-

len konzentriert.

Um Kohlendioxid hinsichtlich der Qualität zu beurteilen, gilt es zwei Parametern besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Neben dem offensichtlichen Kriterium der Reinheit des anfallenden Kohlendioxids ist auch der Druck bzw. Kohlendioxidpartialdruck des Gasstromes von entscheidender Bedeutung. In diesem Zusammenhang gilt, dass eine Aufreinigung mit sinkendem Kohlendioxidpartialdruck aufwändiger und damit teurer wird. [100] Je nachdem welches Nutzungsszenario gewählt wird, ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Kohlendioxidqualität und damit auch unterschiedliche Kosten für die Bereitstellung. Im Allgemeinen sind hohe Anforderungen an die Reinheit mit einer kostenintensiven Bereitstellung verbunden. Nach einer Studie des Forschungszentrums Jülich ist der Reinheitsgrad von Kohlendioxid für einige Synthesen gleich den Anforderungen für einen CO_2-Transport über Pipelines. Ausgenommen ist die Synthese von Methanol, die eine sehr geringe Toleranz gegenüber Katalysatorgiften aufweist. In Tabelle 11 sind die Anforderungen für den Pipelinetransport von CO_2 aufgelistet. [37]

Tabelle 11: Anforderungen an Kohlendioxid für den Pipelinetransport.

Verbindung	Volumenanteil
CO_2	>95,5 %
N_2	< 4 %
Ar	< 4 %
H_2	< 4 %
O_2	< 4 %
CH_4	< 4 %
CO	2000 ppm
H_2S	200 ppm
H_2O	500 ppm
SO_x	100 ppm
NO_x	100 ppm

Die in Kraftwerken anfallenden Rauchgase weisen je nach verwendetem Brennstoff und Kraftwerkstyp unterschiedliche Gasbestandteile auf. Typischerweise liegt der Volumenanteil an Kohlendioxid in Rauchgasen zwischen 3 und 14 %. Bei Gasturbinenkraftwerken liegt der CO_2-Anteil im unteren Bereich des Spektrums, bei Kohlekraftwerken kann er bis auf 14 % steigen. Kraftwerksabgase fallen meist bei Atmosphärendruck an, wodurch sich ein geringer CO_2-Partialdruck und höherer Kostaufwand für die Abtrennung ergibt. [100] Ein typisches Abgas eines Post-Combustion Kraftwerks nach der Rauchgasaufbereitung enthält etwa 100 ppm an Stickstoff, Argon und Sauerstoff sowie Schwefeloxiden und Stickoxiden. [37]

Das Kraftwerk Datteln 4 gilt als ein *capture ready* Kraftwerk. Das heißt, zumindest die Flächenanforderungen für einen nachträglichen Bau einer Anlage zur CO_2-Abscheidung sind gegeben. Zu beachten ist, dass der Wirkungsgrad eines Kraftwerkes durch eine Post-Combustion Abscheidung von Kohlendioxid um bis zu 12% abnehmen kann. Die Verringerung des Wirkungsgrades ist vor allem auf die zur Abscheidung und Kompression des Kohlendioxids benötigte Energie zurückzuführen. Mit Hilfe von

Arbeiten zur Kostenberechnung von Anlagen zur CO_2-Abscheidung aus Kohlekraftwerken kann eine grobe Schätzung des Investitionsvolumens einer solchen Anlage für Datteln 4 abgeleitet werden. [101]

Für ein Kohlekraftwerk mit einer jährlichen Kohlendioxidemission von 2960 kt berechneten Singh et.al 2001 Investitionskosten in Höhe von 294.249.975 $. Die Absorptionsanlage basierte auf MEA und schied 90% des anfallenden CO_2 ab. Die Investitionskosten beziehen die Verdichtung des CO_2 mit ein. Das National Energy Technology Laboratory führte 2006 eine ähnliche Berechnung durch. Die betrachtete CO_2-Absorption mittels MEA sollte ebenfalls 90% der CO_2-Emissionen eines Kohlekraftwerks abscheiden. In diesem Fall emittierte das Kraftwerk 3441 kt/a. Die Investitionskosten wurden auf 400.094.000 $ berechnet.

Mit Hilfe der Degressionsmethode (Formel 1) lassen sich Investitionskosten ähnlicher Anlagen unterschiedlicher Kapazität abschätzen. Als Referenzanlage dient normalerweise eine bereits bestehende Anlage, die in diesem Fall jedoch nicht vorhanden ist. Daher handelt sich bei dem angegebenen Wert um eine sehr grobe Einschätzung mit einer Genauigkeit von 30-50%. [102]

$$I_2 = I_1 \left(\frac{K_2}{K_1}\right)^{\chi} \cdot i \qquad (1)$$

Dabei stellen I die Investitionskosten der Anlage und K die jeweilige Kapazität dar. Der Degressionsfaktor χ beträgt meist 2/3. Der Preisindex für den Chemieanlagenbau i beträgt 2015 108,5. [103]

Kohlendioxidemissionen aus Chemieprozessen stellen eine interessante Bezugsquelle dar, denn dort entsteht CO_2 in sehr reiner Form und bei hohem Druck. Klassische Prozesse, die Kohlendioxid als Nebenprodukt erzeugen, sind die Herstellung von Wasserstoff, Ammoniak, Ethylenoxid und Methanol. Der anfallende Gasstrom enthält zwischen 8 und 20 Volumenprozent CO_2 und liegt bei Drücken über 20 bar. [100] Abgasströme mit hohen Kohlendioxidanteilen werden auch bei Kalzinierungsprozessen generiert.

Besonderes Augenmerk ist in diesem Zusammenhang auf die im Chemiepark Gelsenkirchen-Scholven ablaufenden Prozesse zur Wasserstoff-/Ammoniak- und Methanolproduktion zu legen.

Des Weiteren stellt die Aufreinigung von Erd- und in der Emscher-Lippe-Region auch Grubengas eine in Betracht zu ziehende CO_2-Quelle dar. Zu den energieintensivsten Industriezweigen gehört die Eisen- und Stahlherstellung. Aus diesem Grund entstehen dort auch große Mengen an Kohlendioxid, die genutzt werden können. Bei der direkten Eisenreduktion reagiert Eisenoxid mit Wasserstoff und Kohlenmonoxid zu Eisen, Wasser und Kohlendioxid. Dabei fällt Kohlendioxid mit einem hohen Reinheitsgrad an. Auch das während der Koksherstellung entstehende Kokereigas kann nach der Aufreinigung als mögliche CO_2-Quelle dienen.

Auch Biogasanlagen stellen eine mögliche Bezugsquelle von Kohlenstoffdioxid dar, die im Vergleich zu den zuvor geschilderten Quellen eine nicht-fossile Alternative bietet. Im Folgenden werden die Potentiale für die Abscheidung von CO_2 aus Biogasanlagen näher erläutert.

4.2.3 Kriterium 3: CO_2-Potentiale der Biogasaufbereitungsanlagen

Biogasaufbereitungsanlagen haben zum Ziel, Rohbiogas aus Fermentationsprozessen zu Biomethan aufzubereiten. Dadurch unterscheidet sich das Produkt chemisch nicht von fossilem Erdgas und kann in das Erdgasnetz eingespeist und entsprechend weiterverwendet werden. Die Gasaufbereitung ist in verschiedenen Verfahren Stand der Technik und beinhaltet im Wesentlichen die Trennung von Kohlendioxid und Methan. Daher stellen Biogasaufbereitungsanlagen eine potenzielle Quelle für die Gewinnung und Weiternutzung von CO_2 dar.

Um Gasaufbereitungsanlagen in der Emscher-Lippe-Region zu identifizieren, wurde der Einspeiseatlas der Deutschen Energieagentur (dena) ausgewertet, welcher auf der Online-Plattform „Biogaspartner“ veröffentlich ist. Demnach gibt es in der Gemeinde Dorsten im Kreis Recklinghausen eine Biogasanlage mit Aufbereitung und Einspeisung von Biomethan. Die Anlage ist seit 2013 in Betrieb und auf eine Produktionskapazität von 1.300 Nm³ Biomethan pro Stunde ausgelegt. Nach einer Insolvenz wurde das Betriebsregime durch den neuen Betreiber umgestellt. Die Anlage wird seitdem hauptsächlich mit Wirtschaftsdünger bedient und die Produktionsmenge wurde auf rund 700 Nm³/h reduziert, um unter anderem den Druck auf die landwirtschaftlichen Flächen für den Anbau von Biogassubstrat zu vermindern.

Tabelle 12: CO_2-Potential Biogasaufbereitung Dorsten.

Biogasaufbereitung Dorsten		
Verfahren	Druckwasserwäsche	
Betriebsaufnahmedatum	2013	
Einspeisung	700	m³/h
Methananteil	60%	
CO_2-Anteil	35%	
Rohbiogas	1.170	Nm³/h
CO_2-Potential	410	Nm³/h
Volllaststunden	8.000	h/a
CO_2-Potential	3.276.000	Nm³/a
Dichte	1,89	kg/m³
CO_2-Potential	**6.200**	**t/a**

Ausgehend von der Produktionskapazität und unter Annahme einer CO_2-Konzentration im Rohbiogas von 35% lässt sich ein CO_2-Potential von 6.200 t/a ableiten. Das CO_2 müsste an der Aufbereitungsanlage gefasst und zwischengespeichert werden, um es einer weiteren Nutzung zuzuführen.

In der Region gibt es weitere Bioenergieanlagen, die grundsätzlich ein Potential zur Gasaufbereitung bzw. CO_2-Abscheidung darstellen. Im Energieatlas der Emscher-Lippe-Region sind die Bioenergieanlagen aufgeführt. Zusätzlich wurde das EEG-Anlagen-Register ausgewertet, um die Stromerzeugung aus Bioenergieanlagen zu ermitteln. Es ist zu vermuten, dass es sich überwiegend um Biogasanlagen handelt, weswegen das CO_2-Potential aller Anlagen unter Annahme der Nachrüstung mit einer Aufbereitungsanlage berechnet wurde.

Tabelle 13: CO_2-Potential durch Erweiterung der Biogasaufbereitung.

Potenzielle Biogasaufbereitung in der Region		
Anzahl Bioenergieanlagen	26	Stück
Gesamtleistung Bioenergieanlagen	16.648	kW
Durchschn. installierte Leistung	640	kW
Stromertrag	127.090.127	kWh/a
Biogasmenge	55.740.000	Nm^3/a
CO_2-Potential	19.509.000	Nm^3/a
CO_2-Potential	**36.900**	**t/a**

Über den Stromertrag der Anlagen lässt sich über einen durchschnittlichen elektrischen Wirkungsgrad von 38% die produzierte Biogasmenge abschätzen. Daraus wiederum lässt sich ein CO_2-Anteil von 35% und letztlich ein grundsätzliches Potential von 36.900 t/a berechnen.

Perspektivisch kann auch von einer Ausweitung der Bioabfallbehandlung der biogenen Fraktion aus Haushalten und Gewerbe in Vergärungsanlagen ausgegangen werden, was das Potential nochmals deutlich erhöht.

Die Ergebnisse fließen in die Handlungsempfehlungen zur Entwicklung konkreter Konzepte unter Kapitel 5 ein.

4.2.4 Zusammenfassende Priorisierung der CO_2-Emittenten

Auf Basis der bereits geschilderten Qualitätsmerkmale kann eine Priorisierung der Kohlendioxidquellen vorgenommen werden.

Bei Prozessen wie der Eisen-, Stahl- und Kalkherstellung ergeben sich in absehbarer Zeit keine anderen Möglichkeiten zur Minderung der CO_2-Emissionen als eine nachgeschaltete Abscheidung des Kohlendioxids aus den Abgasen. Aufgrund des hohen Anteils an den Gesamt-CO_2-Emissionen dieser Prozesse ist es im Hinblick auf die Klimaziele von 2050 von hoher Relevanz, CO_2-Emissionen aus diesen Prozessen zu nutzen. Außerdem gibt es bezüglich der Nutzung von Hüttengasen geförderte Projekte (Carbon2Chem), wodurch ein Zugang zu diesen Quellen erleichtert werden kann. Aus dem Bereich der Metallindustrie ist die Kokerei Prosper zu nennen. Das Mengenpotential bei einer Abscheidung von CO_2 aus der Kokerei Prosper beläuft sich auf rund 377.000 kt/a.

Im Energiesektor sind vor allem die Kraftwerke Datteln und Scholven zu erwähnen. Zum einen stellen beide Kraftwerke die größten Emittenten dar. Zum anderen ist davon auszugehen, dass Datteln als Neubau eine längere Laufzweit aufweisen wird als das Kraftwerk Scholven. Dadurch ist eine Abscheidung des entstehenden CO_2 aus dem Kraftwerk Datteln eine Notwendigkeit für die Erreichung der Klimaziele. Zudem bietet das Kraftwerk einen hohes Mengenpotential von über 6 Mt CO_2/a.

Eine weitere zu priorisierende CO_2-Quelle stellt die Raffinerie in Gelsenkirchen-Scholven dar. Bei einer Raffiniere gibt es unterschiedliche Emissionsquellen, die potentiell für eine Abscheidung in Frage kommen. Besonders geeignet ist die Wasserstoffherstellung auf Grund des hohen Volumenanteils und des erhöhten Druckes des anfallenden Abgasstroms. Man geht davon aus, dass etwa neun Ton-

nen Kohlendioxid pro Tonne erzeugtem Wasserstoff anfallen. Davon entstehen wiederum 40% bei der Verbrennung von Erdgas zur Energieerzeugung. Das bevorzugte Kohlendioxid entsteht mit einem Anteil von 60% bei der Wasserstoffproduktion selbst, wodurch sich ein geschätztes Potential von 5,4t CO_2/t H_2 ergibt. [104] [37]

Im Chemiepark Marl stellt Sasol zwischen 200 und 500 kt Ethylenoxid pro Jahr her. [85] Bei der Synthese wird Ethen zu Ethylenoxid oxidiert, als Nebenprodukt fällt Kohlendioxid an. De Coninck & Mikunda schätzen den CO_2-Anfall bei der Ethylenoxidherstellung auf etwa 30% der Ethylenoxidmenge. Für Marl wären das 60 - 150 kt CO_2/a. Außerdem verfügt der Standort Marl über eine Synthesegas- und Wasserstoffproduktion, die auch als CO_2-Quelle in Frage kommen. Das Potential beträgt hier etwa bei 5,4 t CO_2/t H_2.

4.3 Potentielle regionale Abnehmer von CO_2

Ausgehend von den zuvor beschriebenen Verfahren zur CO_2-Nutzung ergeben sich Zugänge zu verschiedenen Wertschöpfungsketten. Diese werden erläutert und in Zusammenhang mit regionalspezifischen Gegebenheiten gebracht. Dazu zählt eine Analyse der ansässigen Unternehmen der Region und deren Produktportfolio, um potentielle Kohlendioxidabnehmer als umsetzende Instanz der dargestellten Wertschöpfungsketten zu realisieren, Kreisläufe zu schließen und innovative kohlendioxidbasierte Produkte zu schaffen. Zudem werden mögliche Abnehmer dieser CO_2-basierten Produkte genannt.

Als besonders interessanter Standort für die Umsetzung von Kohlendioxid gilt der Chemiepark Marl. Dort gibt es zum einen ein Potential für die Direktnutzung von CO_2. Zum anderen wird Methanol als Syntheserohstoff verwendet, wodurch sich eine CO_2-basierte Methanolproduktion anbieten würde. Potential zur stofflichen Nutzung von Kohlendioxid geht auch vom Chemiepark Gelsenkirchen-Scholven aus. Dort wird Methanol aus Synthesegas hergestellt.

Direktnutzung

Air Liquide als Hersteller technischer Gase stellt einen potentiellen Abnehmer für Kohlendioxid dar. Neben dem Vertrieb von CO_2 für die Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie, Kunststoffverarbeitung, Medizin, Analytik oder zum Schweißen stellt Air Liquide auch Trockeneis zur Verfügung. Auch die Linde AG ist in Marl ansässig und betreibt eine Anlage für die Bereitstellung technischer Gase. Anfallendes Kohlendioxid des Marler Chemieparks wird bereits von Linde zur Herstellung von Kohlensäure in Lebensmittelqualität genutzt. Dadurch sind Strukturen vorhanden, die eine Nutzung von CO_2 mit vergleichsweise geringem Aufwand ermöglichen. Nach dem momentanen Kenntnisstand konnten für die Direktnutzung Air Liquide und die Linde Group als potentielle Abnehmer in der Emscher-Lippe-Region identifiziert werden.

Synthese von Basischemikalien

<u>Methanol</u>

Im Chemiepark Gelsenkirchen-Scholven wurden im Jahr 2011 etwa 190.000 t Methanol hergestellt. (BP in Gelsenkirchen, Standortbroschüre) Die Produktion verläuft über Synthesegas, das durch Schwerölvergasung hergestellt wird. Die Erzeugung von Synthesegas kann wie unter Punkt 3.2.2.1.1 erläutert auch aus Kohlendioxid über die Reverse-Wassergas-Shift Reaktion erfolgen.

Des Weiteren ließe sich durch ein solches Verfahren ein Massenbilanzansatz implementieren. Dem Synthesegas wird anteilig der Nachfrage bezüglich kohlendioxidbasierter Produkte Synthesegas aus CO_2 und regenerativem Wasserstoff zugeführt. Die nachgefragten Produkte sind demnach, rein rechnerisch, aus CO_2 und regenerativem Wasserstoff hergestellt und somit dem Konzept der zirkulären Wertschöpfung folgend.

Im Chemiepark Marl wird Methanol als Ausgangsstoff für die Synthese von MTBE, Methylchlorid und Formaldehyd verwendet.

<u>MTBE</u>

Evonik Industries produziert Methyl-tert-butylether(MTBE), eine Verbindung die aus Isobuten und Methanol hergestellt wird. MTBE findet Anwendung als Kraftstoffadditiv, Lösungs- und Extraktions-

mittel. Die Kapazität in Marl beträgt zwischen 200.000 und 500.000 t/a, wodurch ein maximaler Methanolbedarf von etwa 181.000 t/a (entspricht 248.620 t CO_2) entsteht.

Methylchlorid

Vestolit, als Hersteller von Methylchlorid, verwendet ebenfalls Methanol als Syntheserohstoff. Die Kapazität der Methylchloridproduktion beträgt bis zu 50.000 t/a. Damit werden rund 31.700 Jahrestonnen Methanol benötigt, entsprechend 41.430 t CO_2.

Formaldehyd

Des Weiteren befindet sich im Chemiepark Marl eine Anlage zur Produktion von Formaldehyd. Betreiber ISP setzt Formaldehyd weiter zu 1,4-Butandiol und anschließend zu Tetrahydrofuran um. Die Kapazität der Formaldehydproduktion liegt zwischen 50.000 und 100.000 Jahrestonnen. Der Methanolbedarf beläuft sich dementsprechend auf bis zu 93.700 t/a, was 128.370 t CO_2 entspricht. THF kann entweder direkt als Lösungsmittel verwendet, oder zu Polytetrahydrofuran umgesetzt werden. Dieser Kunststoff findet Verwendung in der Textilindustrie und dient zur Herstellung elastischer Textilfasern. Formaldehyd kann auch für die Herstellung verschiedener Harze wie Harnstoff- oder Melaminharze und Phenolharze sowie für die Herstellung des Kunststoffes Polyoxymethylen (POM) verwendet werden. Diese Materialien ermöglichen ebenfalls eine CO_2-Fixierung über mehrere Jahre. [81]

Als möglicher Abnehmer für Formaldehyd kommt Speform Metall-Chemie GmbH in Frage, die Formaldehyd zu Herstellung von Phenolharzen sowie Harnstoffharzen verwenden könnten.

Ameisensäure und Essigsäure

Beide Carbonsäuren können ausgehend von Methanol durch die Umsetzung mit Kohlenmonoxid erhalten werden. Kohlenmonoxid, als Bestandteil von Synthesegas, kann ebenfalls aus CO_2 zusammen mit Wasserstoff gewonnen werden.

Die Anwendungen beider Carbonsäuren sind vielfältig, wodurch sich zahlreiche Abnehmer ergeben. Innerhalb der chemischen Industrie dient Essigsäure als Syntheserohstoff für Vinylacetat. Ameisensäure kann weiter zu Formamid und Dimethylformamid umgesetzt werden, wobei beide wiederum für die chemische Industrie als Syntheserohstoff bzw. Lösungsmittel von Bedeutung sind.

Die Ecronova Polymer GmbH in Recklinghausen ist Hersteller von wässrigen Polymerdispersionen. Als Anbieter von Polyvinylacetatdispersionen ist Ecronova potentieller Abnehmer von CO_2-basiertem Vinylacetat.

Als Formulierer für verschiedene Haushalts- und Pflegeprodukte ist Reinex GmbH & Co. KG ein potentieller Abnehmer für Essigsäure. Reinigungsmittel werden auch von der Firma Robotchemie in Gelsenkirchen hergestellt, wodurch ebenfalls Interesse an Ameisensäure bzw. Essigsäure bestehen könnte.

Dimethylether

Dimethylether kann entweder als CO_2-basierter Dieselersatz verwendet werden oder als Syntheserohstoff für Dimethylsulfat. Außerdem findet Dimethylether Verwendung als Treibgas. (Manfred Müller, Ute Hübsch: Dimethylether. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry,). Dimethylether kann neben Methanol auch im Rahmen der Methanol-to-X Technologien eingesetzt werden.

MTO und MTA

Die Methanol-to-Olefines und Methanol-to-Aromatics Technologien ermöglichen einen Zugang zu Olefinen und Aromaten auf Basis von Methanol. Die Olefine Ethylen und Propylen sind die wichtigsten Ausgangsstoffe der chemischen Industrie und sind die meistproduzierten Kohlenwasserstoffe. Als Alternative können Olefine und Aromaten auch über eine Fischer-Tropsch-Synthese erhalten werden. Dabei entfällt die vorgeschaltete Methanolsynthese.

Synthese hochwertiger organischer Substanzen

Carbonate und Polymere auf Basis von Kohlendioxid

Durch die Umsetzung von Kohlendioxid mit Epoxiden wie Ethylen- oder Propylenoxid entstehen die cyclischen Carbonate Ethylen- bzw. Propylencarbonat. Verwendung finden cyclische Carbonate als Lösungsmittel oder Syntheserohstoff für verschiedene Polymere und Heterocyclen in der chemischen Industrie. [(37)]

Ecronova Polymer GmbH als Hersteller wässriger Polyurethansuspensionen stellt einen möglichen Abnehmer kohlendioxidbasierter Polyurethane dar.

Karbonatisierung

Die Karbonatisierung stellt die Umsetzung von Kohlendioxid mit mineralischen Rohstoffen dar, um daraus anorganische Karbonate zu bilden.

Nach dem momentanen Kenntnisstand konnte für Produkte der Karbonatisierung kein potentieller Abnehmer in der Emscher-Lippe-Region identifiziert werden.

Methanisierung

Die Methanisierung ist ein Verfahren, das CO_2 und Wasserstoff zu Methan (Synthetic Natural Gas, SNG) umwandelt. Darüber hinaus bietet die Methanisierung eine Möglichkeit, überschüssigen erneuerbaren Strom chemisch zu speichern. Das bestehende Erdgasnetz kann die notwendige Infrastruktur für einen Methanspeicher liefern.

Als Chemierohstoff wird Methan vorrangig für die Erzeugung von Synthesegas verwendet. Synthesegas kann durch die umgekehrte Wassergas-Shift-Reaktion auch direkt aus CO_2 hergestellt werden, weshalb die Verwendung von SNG als Syntheserohstoff von geringer Bedeutung ist.

Methan als Basischemikalie und Energieträger kann großflächig eingesetzt werden, es zeigen sich diverse Abnehmer, insbesondere im Chemie- und Energiesektor.

Herstellung von Kraftstoffen

Kohlendioxidbasierte Kraftstoffe ermöglichen eine Reduktion der Nettoemissionen und bieten eine Alternative zu fossilen Energieträgern. Die Anwendung synthetischer Kraftstoffe ist auch in den Bereichen Flug- und Schiffsverkehr interessant. Im Gegensatz zu den dort eingesetzten Energieträgern weisen synthetische Kraftstoffe eine bessere Verbrennung auf und enthalten weder schwefelhaltige Verunreinigungen noch rußbildende Verbindungen. Mit der Methanol-to-Gasoline Technologie oder der Fischer-Tropsch-Synthese können klassische Ottokraftstoffe auf CO_2-Basis hergestellt werden. Methanol kann nicht nur in der chemischen Industrie als Syntheserohstoff, sondern auch direkt als

Kraftstoff im Mobilitätsbereich verwendet werden und ist neben Methan als Energiespeicher interessant.

Damit kann Methanol sowohl eine Schlüsselposition bei der Rohstoffwende der chemischen Industrie und im Mobilitätsbereich als auch bei der Energiewende einnehmen. Methanol birgt demnach das Potential, zentrales Molekül der Zukunft zu werden. [105] Dementsprechend ist der gesamte Mobilitätssektor sowie die chemische Industrie als Abnehmer prädestiniert.

Biologische Verfahren

Gewächshausdüngung

Mit einer CO_2-Düngung in Gewächshäusern kann das Pflanzenwachstum gesteigert und Kohlenstoff in Form von Biomasse fixiert werden. Die Dauer der Fixierung hängt dabei von der Art der Kultivierten Pflanze ab. Zum einen können Lebensmittel Produziert werden, was mit einer kurzen Fixierung verbunden ist. Zierpflanzen hingegen bieten Potential einer mittelfristigen CO_2-Fixierung.

Eine Ansiedelung und Ausbau von des Teilmarkt der Umweltwirtschaft - umweltfreundliche Landwirtschaft- bietet sich hier in Kraftwerksnähe an. Dazu können neue Konzepte potenzielle Abnehmer in der Emscher-Lippe-Region generieren.

Kultivierung von Algen

Photosynthese betreibende Lebewesen verwenden Kohlendioxid als Kohlenstoffquelle – so auch Mikroalgen. Anfallendes CO_2 kann für die Kultivierung von Mikroalgen in geschlossenen Photobioreaktoren verwendet werden. Neben Biomasse entstehen mit Hilfe der Mikroorganismen Wertvolle Produkte wie Farbstoffe für die Lebensmittel- und Kosmetikindustrie aber auch Fette die als Biokraftstoff Verwendung finden können. Auch Algen an sich sind ein wertvolles Produkt und können als Nahrungsergänzungsmittel angeboten werden.

Hier könnte RWE sein erprobtes System in Kraftwerksnähre etablieren. (siehe Kap. 3.3)

Biologische Methanisierung

Die biologische Methanisierung nutzt anaerobe Mikroorganismen als Katalysatoren zur Produktion von Methan aus Kohlendioxid und Wasserstoff. Vorteil der biologischen Methanisierung sind die vergleichsweise geringen Anforderungen an die CO_2-Qualität. Eine Methanisierungsanlage kann beispielsweise mit einer Biogasanlage, wie sie in Dorsten steht, kombiniert werden, um die Methanausbeute zu erhöhen.

Weiße Biotechnologie

In einfachen Reaktoren wandeln Bakterien und Hefen Gasgemische aus CO_2 und H_2 zu hochwertigen Chemikalien um. Vorteil ist, dass diese Mikroorganismen kein Licht brauchen und unter einfachen Bedingungen arbeiten. Das Gasgemisch kann einfach über eine Elektrolyse und Abgas vor Ort gewonnen werden. EVONIK ist Vorreiter auf diesem Gebiet und könnte Demonstrationsanlagen in Anlagennähe etablieren. (siehe Kap. 6)

4.4 Nutzung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien

Wie vorher bereits beschrieben wurde, wird Wasserstoff bei der Nutzung von Power-to-X Technologien eine bedeutende Rolle einnehmen und somit als ein Schlüssel zur Energiewende in Deutschland fungieren. Diese ist in Deutschland politisch vorgegeben und soll bereits bis 2020 einen Ökostromanteil von 35% erreichen. Um den bereits sehr zeitnah anfallenden Überschussstrom aus Erneuerbaren Energien, der durch die Nutzung von Wind und Solartechnologien zwangsläufig anfallen wird, auch in Zeiten geringerer Stromerzeugung nutzen zu können, sind fortschrittliche Lösungen gefragt. Wasserstoff gehört zu den neuen Energieträgern, die bspw. durch die Rückverstromung in Verbindung mit Brennstoffzellentechnologien dazu beitragen werden, dass Energie effizient, sauber und sicher umzuwandeln und wirtschaftlich zu nutzen ist [(106)].

Wasserstoff ist darüber hinaus bereits heute ein wichtiger Rohstoff für die chemische und petrochemische Industrie, dies gilt auch für Unternehmen in der Emscher-Lippe-Region. Diese können Wasserstoff überwiegend für die Herstellung von Ammoniak sowie zur Verarbeitung von Erdöl zu hochwertigen Chemieprodukten und Kraftstoffen nutzen. Der weltweite Bedarf an Wasserstoff, welches als Element in nahezu unendlicher Menge vorhanden ist, ist mit etwa 540 Milliarden Kubikmeter jährlich enorm groß. In Deutschland werden davon etwa 20 Milliarden Kubikmeter pro Jahr benötigt. Aufgrund abnehmender Erdölvorräte wird die Nachfrage nach dem „Substitut“ Wasserstoff voraussichtlich weiter steigen.

Der aktuell für die Chemie als Basisprodukt verwendete Wasserstoff wird weltweit zu 96% aus fossilen Energieträgern hergestellt. In der Kohle- und Stahlindustrie sowie in vielen Raffinerien werden große Mengen Wasserstoff produziert, allerdings auch vor Ort direkt wieder genutzt. Nur ein sehr geringer Teil des Wasserstoffs wird in gasförmiger oder flüssiger Form über Straßen, Schienen oder Pipelines gehandelt. Die Herstellung von „grünem“ Wasserstoff durch Elektrolyse deckt mit bisher 4% der Gesamtmenge an Wasserstoff nur einen kleinen Teil ab. Die Produktion von Wasserstoff aus Wind- und Wasserkraft sowie Sonnenenergie ist heute schon technisch möglich und wird langfristig als Schlüssel zu einer weltweit nachhaltigen Energiewirtschaft steigende Bedeutung erlangen. Wasserstoff erfüllt alle Anforderungen an einen speicherfähigen, transportierbaren und umweltfreundlichen Energieträger [(106)].

In Nordrhein-Westfalen existieren bereits leitungsgebundene Infrastruktur-Cluster für die industrielle Nutzung von Wasserstoff. Um diese weiter auszubauen, sollen zukünftig auch kleinere dezentrale Elektrolyseanlagen sowie zusätzliche Wasserstoffpipelines gebaut werden. Aus diesem Grund bieten sich für den „grünen“ Wasserstoff, der mittels Power-to-X Anlagen mit Erneuerbaren Energien erzeugt wird, zusätzlich zur Einspeisung ins Erdgasnetz und Nutzung aller Optionen der Erdgasinfrastruktur gute Voraussetzungen für die Entwicklung einer eigenständigen Infrastruktur und Erschließung direkter Märkte an. Hiervon könnten auch weitere Industrien profitieren, wie etwa der Verkehrs- und Energiesektoren.

Im nun folgenden Abschnitt werden relevante Wasserstoff-Akteure, bisherige Projekte sowie die bereits vorhandene Infrastruktur für Wasserstoff in der Emscher-Lippe-Region dargestellt.

4.4.1 Akteure in der Region

Die Themen Wasserstoff, Brennstoffzellen, Energiespeicher und erneuerbare Energien sind in der Emscher-Lippe-Region bereits seit Anfang des 21. Jahrhunderts fest verankert und sollen die Zukunftsfähigkeit der Region vorantreiben. Früh haben Unternehmen und Kommunen das Potential erkannt, welches insbesondere durch die Nutzung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien ausgeschöpft werden kann. Die im umliegenden Ruhrgebiet geschaffene Infrastruktur sowie die vorhandenen Ressourcen können genutzt werden, um die Wirtschaftlichkeit der Region zu erhöhen und somit langfristig Arbeitsplätze zu sichern und zu schaffen [(107)].

Zentrale Anlaufstelle rund um das Thema Wasserstoff ist dabei das Anwenderzentrum H2 Herten, welches im Jahre 2009 eröffnet wurde. Dort haben sich seitdem zahlreiche Firmen von der Produktion über die Speicherung und den Transport bis zur konkreten Anwendung von Wasserstoff angesiedelt, die von vielen Synergieeffekten profitieren können. Im Fokus steht auch hier die Entwicklung von Technologien, die für die Produktion und auch die Nutzung von grünem Wasserstoff interessant sein können. In diesem Feld spielt auch das H2-Netzwerk-Ruhr seit 2008 eine wichtige Rolle. Dies ist ein Netzwerk, welches Unternehmen, Kommunen, Verbände und Forschungseinrichtungen in der Region zusammenbringt, um sich rund um das Thema Wasserstoff auszutauschen und mögliche Kooperationen und Synergien zu schaffen. Seit dem Start ist die Mitgliederzahl auf über 30 Akteure gewachsen.

Auch im Bildungsbereich gehört die Region beim Zukunftsthema Wasserstoff zu den Vorreitern in Deutschland. 2001 wurde das Energie-Institut der Westfälischen Hochschule Gelsenkirchen (damals: Fachhochschule Gelsenkirchen) gegründet, welches als ist Partner und Knotenpunkt für die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Industrie fungiert. Ziel der Forschung in Gelsenkirchen ist dabei die Entwicklung und Optimierung zukunftsfähiger Energiesysteme unter Berücksichtigung einer ressourcenschonenden Energieverwendung, insbesondere durch die Verwendung von grünem Wasserstoff. Im direkten Umkreis der Emscher-Lippe-Region sind darüber hinaus weitere Akteure aus dem Hochschulsektor im Bereich der Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie aktiv. An den Universitätsstandorten Bochum, Dortmund, Essen und Duisburg sowie an den Fachhochschulen in Dortmund, Bochum, Gelsenkirchen und an der Fachhochschule Ruhr-West (am Institut für Energiesysteme und Energiewirtschaft in Bottrop) sind Arbeitsgruppen etabliert worden, die sich dem Thema Wasserstoff widmen [(107)].

4.4.2 Unternehmen in der Region

In der Emscher-Lippe-Region haben sich, auch aufgrund des Anwenderzentrums H2 Herten, diverse Unternehmen angesiedelt. Das Spektrum reicht von großen und internationalen Industriegas-Versorgern bis hin zu innovativen Startups, die Wasserstofftechnologien von der Entwicklung bis zum Verkauf die gesamte Wertschöpfungskette abbilden.

Als besonders relevant im Bereich Wasserstoff sind die beiden in Marl ansässigen Firmen Air Liquide Deutschland GmbH sowie die Linde Group zu nennen. Die Air Liquide Deutschland GmbH betreibt im Chemiepark Marl das größte europäische H_2-Abfüllwerk und ist speziell im Bereich des Brennstoffzellenantriebs aktiv. Die Linde Group nimmt als führender Anbieter von technischen Gasen und Wasserstoffanlagen weltweit eine Spitzenposition ein, wenn es darum geht, den Energieträger Wasserstoff in konkreten Anwendungen nutzbar zu machen.

Die dichte Verflechtung von Wasserstoffproduzenten (u.a. die Kokerei Prosper oder die Emscher Kläranlage) mit einer vorhandenen Wasserstoffleitung der Air Liquide GmbH bietet im Zusammenspiel mit potentiellen Nutzern (u.a. die Chemische Industrie, Heizmittel, Mobilitätssektor) große Entwicklungspotentiale in der Emscher-Lippe-Region. Dies gilt sowohl für die Nutzung von Wasserstoff in Kombination mit CO_2 aus der Region, als auch als eigenständiger Rohstoff. Die Stadt Bottrop möchte diese Entwicklung weiter vorantreiben und plant die Errichtung eines „Wasserstoffparks Welheimer Mark“, der Unternehmen auf etwa 19 ha Platz für die Forschung und den Betrieb von Wasserstofftechnologien bieten soll [(107)].

4.4.3 Wasserstoff-Projekte in der Region

In der Emscher-Lippe-Region wurden in Zusammenarbeit u.a. mit dem Anwenderzentrum H2 Herten zwei Pilotprojekte durchgeführt:

Windstromelektrolyse (Herten)

Das "H2Herten Anwenderzentrum" hat zusammen mit dem Energieinstitut der Westfälischen Hochschule Gelsenkirchen die Technik konzipiert, welche von Evonik und diversen Projektpartnern (u.a. Hydrogenics, Linde, Vako, Janssen u.w.) umgesetzt wurde. Herten verfügt mit der Windstromelektrolyse zur eigenen dezentralen Energieversorgung somit über ein innovatives Energiekomplementärsystem auf Wasserstoffbasis. Mit dem Windstrom von der benachbarten Halde Hoppenbruch wird per Elektrolyse Wasserstoff hergestellt. Mit diesem grünen Wasserstoff wird die witterungsabhängige und deshalb starken Schwankungen unterworfene Windenergie gespeichert. Bläst der Wind also nur schwach über die Halde, wird der Wasserstoff mittels eines Brennstoffzellen-Verbrennungsmotor-Hybridsystems wieder in Strom umgewandelt. Die Anlage erzeugt jährlich rund 250 Megawattstunden Strom und etwa 6.500 Kilogramm Wasserstoff für den Eigenbedarf des Anwenderzentrums H2Herten [(107) (106)].

Ein weiteres Elektrolyse-Projekt, welches bereits eine Anwendbarkeit im großen Maßstab bewiesen hat, ist der Energiepark Mainz in Rheinland-Pfalz. Seit Juli 2015 hat die Windstromelektrolyse-Anlage, die die Linde Group, Siemens und die Stadtwerke Mainz mit wissenschaftlicher Begleitung der Hochschule RheinMain errichtet haben, etwa 18 000 Kilogramm Wasserstoff produziert [(108).]

Erdgas und Wasserstoff aus Kläranlagen (Bottrop)

Die Wasserwirtschaft bietet mit ihren Kläranlagen wesentliche Potentiale zur Einführung einer nachhaltigen wasserstoffbasierten Energieinfrastruktur. Das Faulgas, das im Zuge der Schlammbehandlung auf Kläranlagen anfällt, kann als erneuerbare Ressource für die Erzeugung von Bioerdgas und Wasserstoff dienen. Die Emschergenossenschaft als größter Kläranlagenbetreiber Deutschlands hat frühzeitig entschieden, die Aufbereitung von Faulgas zu Bioerdgas und Wasserstoff im Demonstrationsvorhaben „EuWaK – Erdgas und Wasserstoff aus Kläranlagen“ auf der Kläranlage Bottrop zu testen und weiterzuentwickeln. Projektpartner waren die Tuttahs & Meyer Ingenieursgesellschaft für Wasser-, Abwasser- und Abfallwirtschaft mbH, das Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen, das Ingenieurbüro Redich und Partner sowie die Stadt Bottrop. Das Projekt wurde vom Bundesland NRW und der EU gefördert, Ende 2012 wurde der Forschungsbetrieb eingestellt [(106) (107)].

Die Emscher-Lippe-Region deckt das komplette Spektrum der Biomasseumwandlungstechnologien ab. Der entscheidende Vorteil: kurze Wege zwischen den Biomasseerzeugern im ländlichen Norden und den Biomasseverbrauchern in den urbanen Gebieten im Süden. Die Abfall- und Wasserwirtschaft bietet mit ihren Kläranlagen wesentliche Potentiale zur Einführung einer nachhaltigen wasserstoffbasierten Energieinfrastruktur.

4.4.4 Wasserstoff-Infrastruktur

Bei einer Analyse der Wasserstoffinfrastruktur sind alle Komponenten zu beachten, die für eine Produktion und Verteilung von Wasserstoff notwendig sind. Für eine nachhaltige Verwendung von Wasserstoff, auch in Verbindung mit der Nutzung von CO_2, wird in dieser Studie ausschließlich die Produktion von grünem Wasserstoff aus regenerativen Energien betrachtet, wie etwa die Windstromelektrolyse, die Vergasung von Biomasse oder die Reformierung von Faulgasen und durch Algen [(107)].

Die Speicherung von Wasserstoff wird langfristig ein wichtiges Kriterium für den wirtschaftlichen Erfolg der Wasserstoffnutzung für Energieumwandlungssysteme u.a. mit Brennstoffzellen werden. Hierbei müssen Kriterien wie die Speichereffizienz, der Energiebedarf, die Lebensdauer, Be- und Entladungsgeschwindigkeit, Speicherform, Wasserstoffverluste sowie die entstehenden Kosten betrachtet werden. Die gängigsten Speicherformen sind zurzeit die Hochdruckgasspeicher, Flüssiggasspeicher und Feststoffspeicher, die einen Transport über das ausgeweitete Straßen-, Schiffs- und Schienennetz in der Emscher-Lippe-Region ermöglichen. Im Chemiepark Marl betreibt die Air Liquide Deutschland GmbH das größte Wasserstoffabfüllzentrum Europas für Hochdruckkartuschen, mit denen beispielsweise der Großteil der regionalen Fahrzeuge betrieben wird. Wasserstoff-Tankstellen gibt es in der Region mittlerweile in Bottrop, Gladbeck und Herten [(106)].

Der in der Emscher-Lippe-Region womöglich bedeutendere Aspekt der Wasserstoff-Infrastruktur ist jedoch das vorhandene Pipeline-Netz, welches insbesondere von der Chemischen Industrie genutzt wird. Für die Auslieferung des Wasserstoffs wird von Großkunden das Pipeline-Netz verwendet, das sich vom nördlichen Rand des Ruhrgebiets über eine Gesamtlänge von 240 km verzweigt. Der Chemiepark Marl ist dabei der Ausgangspunkt für die längste deutsche Wasserstoff-Pipeline, die eine Kapazität von bis zu 40.000 Kubikmetern Wasserstoff pro Stunde ermöglicht. Mit dieser Pipeline wird ein kostengünstiger und sicherer Wasserstofftransport mit hoher Versorgungssicherheit gewährleistet [(106)].

Abbildung 31: Wasserstoff Pipeline-Netz [(87)]

Betrachtet man das Gesamtspektrum von Erzeugung, Produktion, Entwicklung oder Anwendungen, ist keine andere Region entlang der Wertschöpfungskette der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie so breit aufgestellt wie das Ruhrgebiet und die Emscher-Lippe-Region.

4.5 Prognose und Speicherbedarf erneuerbarer Energien

Wenn die klima- und energiepolitischen Ziele der Bundes- und Landesregierung umgesetzt werden, ist mit einem erhöhten Anteil erneuerbarer Stromeinspeisung für die Elektrizitätsversorgung zu rechnen. Im Zuge der Energiewinde wird insbesondere der Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien (FEE) aus Wind- und Solarenergie weiter ansteigen. Dies führt dazu, dass vermehrt Zeiten auftreten, in denen Angebot und Nachfrage an Elektroenergie divergieren. Bereits heute werden zweitweise Windenergieanlagen abgeregelt, wenn der potenziellen Stromeinspeisung keine Last gegenüber steht. Um das Überangebot an FEE zu nutzen, werden verschiedene Speichertechniken diskutiert und erprobt. Eine Möglichkeit stellt das sogenannte Power-to-Gas (PtG), wobei synthetische Gase aus Ökostrom hergestellt werden. Im ersten Schritt kann die Elektroenergie über die Elektrolyse von Wasser in Wasserstoff gespeichert werden. Dieser kann gespeichert und weiterverwendet werden. In einem weiteren Verfahrensschritt lassen sich unter Verwendung von CO_2 beispielsweise Methan (vgl. 3.2.1) oder Methanol (vgl. 3.2.2.4) synthetisieren.

Zunächst ist jedoch zu analysieren, wie weit die FEE in der Emscher-Lippe-Region ausgebaut werden können und welcher Speicherbedarf sich daraus ergibt. Um die Potentiale erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung zu ermitteln, wurden die Klimaschutzkonzepte der Städte Bottrop, Gelsenkirchen und Recklinghausen ausgewertet. Darin sind Angaben über das Ausbaupotential erneuerbarer Energien gemacht, welche für eine Potentialabschätzung in der Emscher-Lippe-Region herangezogen werden. Außerdem kann aus den Konzepten der Strombedarf in der Region abgeleitet werden. Im Ergebnis wurden ein Trend- und ein ambitioniertes Szenario zum Anteil der erneuerbaren Energien an der Strombereitstellung abgeleitet.

Tabelle 14: Szenarien zum Anteil erneuerbarer Energien am Strombedarf.

Szenarien EE-Anteil am Strombedarf		
Strombedarf	4.660.000 MWh/a	
EE-Potential	**absolut**	**prozentual**
EE IST	645.000 MWh/a	14%
EE Trend	1.536.000 MWh/a	33%
EE Ambitioniert	3.381.000 MWh/a	73%

Der IST-Zustand ist dem EEG-Anlagenregister von EnergyMap entnommen. Das Trendszenario orientiert sich an den mittleren Ausbaupfaden der regionalen Klimaschutzkonzepte, die sich entweder auf das Jahr 2025 oder das wirtschaftliche Ausbaupotential beziehen. Das ambitionierte Szenario ist an den anspruchsvollen Ausbaupfaden orientiert, welche einen längerfristigen Fokus haben oder auf dem technischen Potential beruhen. Zusammengefasst zeigt die folgende Grafik den Anteil erneuerbarer Energien je nach Szenario.

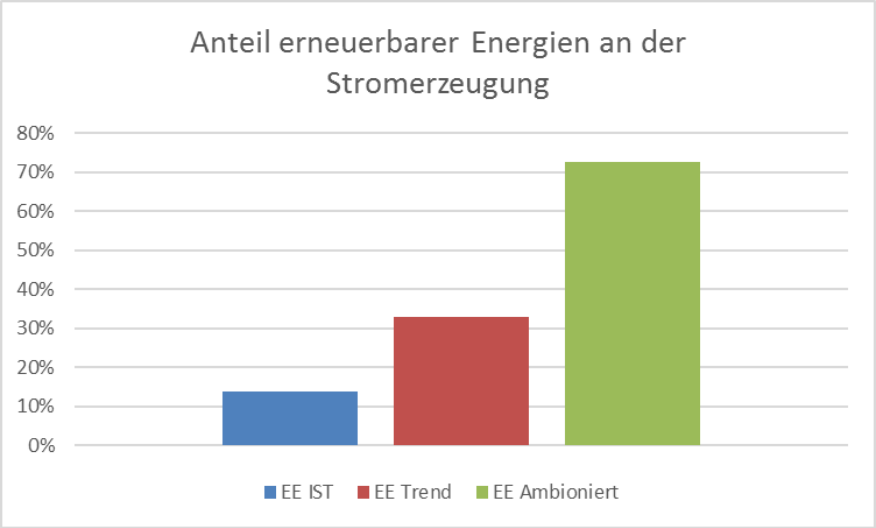


Abbildung 32: Szenarien zum Anteil erneuerbarer Energien am Strombedarf.

Das Trendszenario entspricht in etwa dem Anteil erneuerbarer Energien an der bundesweiten Stromversorgung. Bereits bei diesem Anteil können regional Stromüberschüsse auftreten, welche nicht unmittelbar abgenommen werden können. Bei 73% erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung sind über das Jahr gesehen etliche Phasen zu erwarten, in denen die fluktuierende Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik über dem Lastgang der Stromverbraucher liegt.

Daher wurde eine Jahresdauerlinie simuliert, welche die witterungsbedingte Fluktuation der erneuerbaren Energien berücksichtigt. Dabei wird die erzeugte Strommenge aus Wind- und PV-Anlagen unter Berücksichtigung meteorologischer und astronomischer Daten auf Viertelstundenwerte aufgelöst. Demgegenüber wird der Strombedarf ebenfalls auf Viertelstundenwerte und anhand von Standardlastprofilen verteilt. Die folgende Grafik zeigt das Ergebnis.

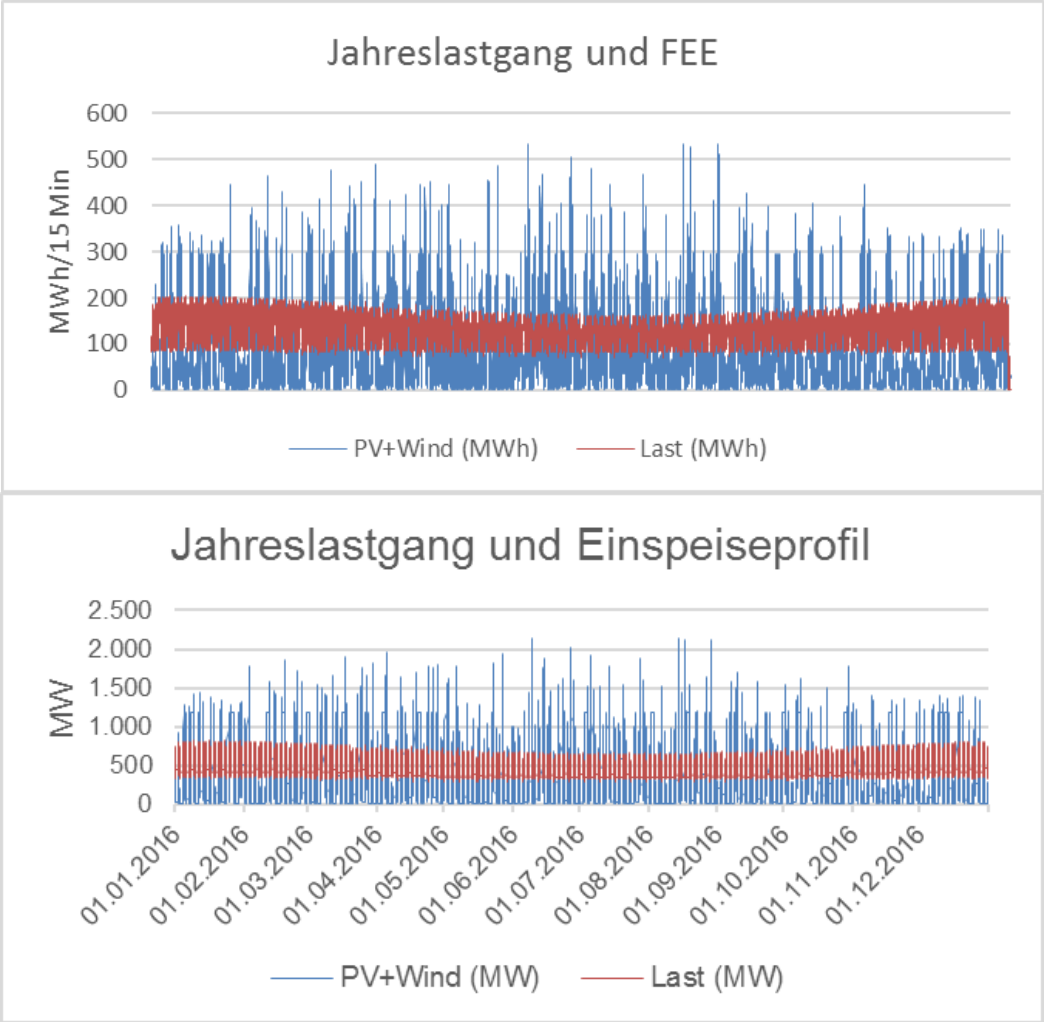


Abbildung 33: Jahresganglinie Stromlast und fluktuierende Stromeinspeisung.

Es lässt sich erkennen, dass häufig Strom erzeugt wird (blaue Kurve), der über den Bedarf (rote Kurve) hinausgeht. Dies liegt insbesondere an den Windereignissen aber auch an den Sonnenstunden. Der resultierende „Überschussstrom“ kann berechnet und für eine PtG-Anlage und damit zur Wasser-Elektrolyse genutzt werden. Aus der Kumulation der Einzelwerte ergibt sich ein Potential von rund 1 Mio. MWh Stromüberschüsse, welches nicht unmittelbar für den Bedarf in der Emscher-Lippe-Region genutzt werden können. Das Funktionsprinzip des PtG ist in der folgenden Abbildung visualisiert.

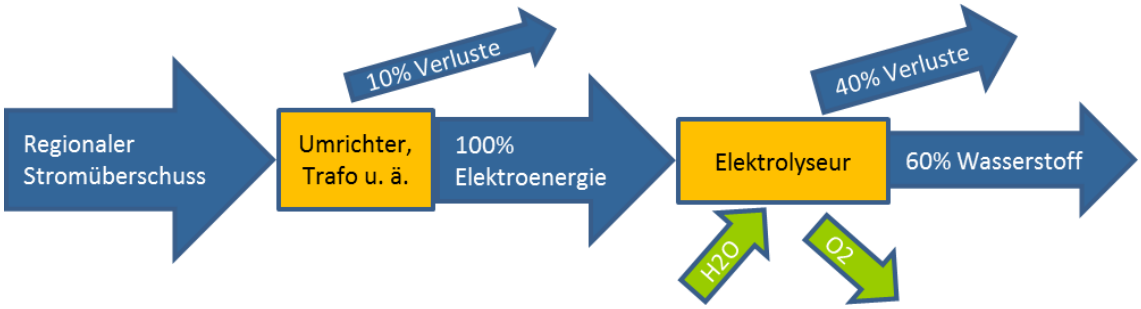


Abbildung 34: Funktionsprinzip von Power-to-Gas mit Wirkungsgradverlusten in der Prozesskette.

In der folgenden Tabelle ist dargestellt, wieviel Wasserstoff über die Elektrolyse mittels FEE theoretisch hergestellt werden könnte. Außerdem ist dargestellt, in welchen Mengen der gewonnene Wasserstoff mithilfe von Kohlendioxid in Methan umgewandelt werden kann.

Tabelle 15: Potential zur Wasser-Elektrolyse und Methanisierung von Überschussstrom.

Elektrolyse zur Wasserstoffproduktion	Regionales Potenzial	Einheit
Anschlussleistung Elektrolyseur	1.700.000	kW
Elektroenergie Elektrolyseur	990.000.000	kWh/a
Vollbenutzungsstunden Elektrolyseur	582	h/a
Wirkungsgrad Elektrolyse	60%	
Wasserstoffertrag	594.000.000	kWh/a
Wasserstoffertrag	17.800	t/a
Sauerstoffertrag	142.400	t/a
Wasserbedarf	160.200	t/a
Methanisierung (Sabatier-Prozess)	**Regionales Potenzial**	
Wirkungsgrad Methanisierung	70%	
Methanertrag	415.800.000	kWh/a
Methanertrag	29.900	t/a
CO_2-Bedarf	82.225	t/a
Wasserüberschuss	67.275	t/a
Wasserbedarf netto	92.925	t/a
Gesamt-Wirkungsgrad (Elektrolyse und Methanisierung)	42%	

Nach dem oben dargestellten Szenario zum potenziellen Stromüberschuss aus Windkraft- und PV-Anlagen in der Emscher-Lippe-Region lässt sich ein Potential zur Nutzung von CO_2 für die Methanisierung von rund 82.000 t/a ableiten. Dies ist nur ein relativ kleiner Bruchteil der identifizierten, regionalen Emissionen. Für den Gesamtprozess würde ein Wasserbedarf von rund 93.000 t/a benötigt und ein Sauerstoffertrag von 18.000 t/a anfallen. Alternativ zu Methan können andere Produkte wie bspw. Methanol synthetisiert werden bzw. kann der Wasserstoff direkt als Energieträger oder chemischer Grundstoff genutzt werden. Für die Power-to-X-Technologie (PtX) gilt jedoch grundsätzlich, dass die Errichtung einer großen Anlage zur Wandlung des gesamten Überschussstroms in der Region nicht praktikabel bzw. unwirtschaftlich ist. Anhand der ausgewiesenen Vollbenutzungsstunden von nur knapp 600 im Jahr lässt sich erkennen, dass eine entsprechende Anlage nur eine sehr geringe Auslastung erfahren würde. Die Handlungsempfehlung geht daher in die Richtung, kleinere, lokale Einheiten zu entwickeln und dabei möglichst konzentrierte CO_2-Emissionen zu nutzen.
Die Ergebnisse werden unter Kapitel 5 aufgegriffen, um konkrete Technikkonzepte für die Emscher-Lippe-Region zu entwickeln.

5 Geeignete Techniken und Konzepte für die Region

5.1 Ergebnisse der Nutzungsmöglichkeiten für CO_2 als Rohstoff in der Region

5.1.1 Potentialanalyse der Mengen des nutzbaren CO_2

Mit dem Übereinkommen von Paris hat sich die Weltgemeinschaft das Ziel gesetzt, die Erderwärmung auf maximal zwei Grad im Vergleich zu vorindustriellen Werten zu begrenzen. Bestenfalls soll ein Temperaturanstieg von 1,5 Grad erreicht werden. Dafür wurde der notwendige Entschluss gefasst, bis 2050 die Treibhausgasemissionen um 80-95% im Gegensatz zu 1990 zu verringern. [(109)] Darüber hinaus hält der Weltklimarat [(100)] eine alleinige Reduzierung der Treibhausgasemissionen für nicht zielführend. Der IPCC geht davon aus, dass es nötig sein wird Verfahren einzusetzen die Kohlendioxid aus der Atmosphäre abscheiden. [(110)] Zudem spielt die Implementierung Erneuerbarer Energien und deren Verbindung mit einer stofflichen CO_2-Nutzung eine zentrale Rolle wenn es um das Einhalten des 2 bzw. 1,5 Grad-Zieles geht. Im Zusammenspiel von Erneuerbaren Energien und der Nutzung von CO_2 wird so einerseits eine Dekarbonisierung verschiedener Sektoren vorangetrieben, andererseits entsteht ein geschlossener Kohlenstoffkreislauf.

Für die stoffliche Nutzung von Kohlendioxid in der Emscher-Lippe-Region sind zunächst drei Nutzungsszenarien denkbar. Innerhalb der Nutzungsszenarien stehen die folgenden Kohlenstoffquellen zur Verfügung:

- Biogenes CO_2, welches Beispielsweise bei der Biogaserzeugung anfällt
- Kohlendioxidströme aus Verbrennungs- und Industrieprozessen fossiler Rohstoffe
- Atmosphärisches CO_2

Szenario 1

In Szenario 1 wird neben Kohlendioxid fossilen Ursprungs auch biogenes CO_2 als Rohstoff verwendet. Dazu muss erwähnt werden, dass fossiles Kohlendioxid weder treibhausgasneutral oder regenerativ ist. [(111)] Mit der Umsetzung des eingangs erwähnten Klimazieles ist unweigerlich ein Rückgang an Kohlendioxidquellen fossilen Ursprungs verbunden. Die Nutzung von Kohlendioxid aus fossilen Quellen kann somit als Übergangstechnologie eingesetzt werden und kann eine Möglichkeit bieten, die Entwicklung von Verfahren zur rohstofflichen Nutzung von CO_2 weiter voranzutreiben.

Um die eingangs erwähnte Reduzieren der Treibhausgasemissionen zu erreichen, müssen Prozesse auf Basis fossiler Rohstoffe sukzessive zurückgefahren werden. Dadurch werden auch große Punktquellen an Kohlendioxid verschwinden und stehen ab einem gewissen Zeitpunkt nicht mehr zur Verfügung. Als längerfristiges CO_2-Potential beträgt 6,4 Mt/a bei einer Abscheidung aus der Kokerei Prosper und dem Kraftwerk Datteln. Hinzu kommt das Potential aus der Wasserstofferzeugung mit 5,4t CO_2/ t H_2.

Szenario 2

In Szenario 2 wird nur biogenes CO_2 verwendet, welches zum Beispiel in Kombination mit einer Biogasproduktion oder Fermentation gewonnen werden kann. Das Umweltbundesamt geht davon aus,

dass sich die energetische Biomassenutzung aus Umweltgründen auf die Verwendung von Rest- und Abfallstoffen beschränken wird. [112] Die Entwicklung des CO_2-Potentials wird sich nach dieser Einschätzung pessimistischer Verhalten, als unter aktuellen Gesichtspunkten angenommen. Die potentiell verfügbare Menge an biogenem CO_2 ergibt sich zu 36900 t/a. Es muss erwähnt werden, dass dieses CO_2-Potential auf 26 Anlagen innerhalb der Emscher-Lippe-Region verteilt ist.

Szenario 3

Das Nutzungsszenario 3 beschränkt sich auf die Atmosphäre als Kohlenstoffquelle. Diese wird in einigen Arbeiten als die einzige langfriste Kohlenstoffquelle beschrieben, die zudem ausreichend Rohstoff zur Verfügung stellt. [23] [111] Verfahren zur Abscheidung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre sind unter *Direct Air Capture* (DAC) bekannt. Die Verwendung dieser Technologie ergibt zudem die Möglichkeit über eine CO_2-Einsparung hinaus, negative Emissionen zu erzeugen die Notwendig sind um die erwähnten Klimaziele zu erfüllen. Die Verfügbarkeit von atmosphärischem Kohlendioxid ist praktisch unbegrenzt, und wird im Wesentlichen durch die Abscheidekapazität der Anlage begrenzt. Bei Climeworks, einem der führenden Anbieter von DAC-Anlagen, wird eine Kapazität von bis zu mehreren Tonnen pro Stunde als machbar angegeben. [113]

5.1.2 Identifikation potentiell geeigneter Techniken für die Emscher-Lippe-Region

Im folgenden Abschnitt werden die unter 3.1-3.3 dargestellten Technologien zur CO_2-Abscheidung sowie zur Chemischen und Biologischen Nutzung unter Betrachtung der in 4.3 als potentielle Abnehmer identifizierten Unternehmen analysiert. Ziel ist es, die zuvor ausgewählten Technologien auf ihre Anwendbarkeit in der Emscher-Lippe-Region zu prüfen, um abschließend konkrete Techniken nennen zu können, die in Pilotprojekten in Zusammenarbeit mit ansässigen Unternehmen umgesetzt werden könnten.

Potentielle CO_2-Abtrennungstechnologien in der Emscher-Lippe-Region:

Nicht weiter betrachtet werden die in 3.1 genannte Herstellung Ammoniak, die Kalzinierung sowie die Abtrennung von natürlichen Gasquellen:

- Kalzinierung: Trotz der geringen Verunreinigung erfolgt eine Fassung des CO_2 aus wirtschaftlichen Gründen in der Regel nicht, da die sehr hohen Kosten in keinem Verhältnis zum Ertrag stehen
- Natürliche Gasquellen: Natürliche Gasquellen für die CO_2-Gewinnung spielen in der vorliegenden Studie keine Rolle, da sie i. d. R. in Gebieten mit Öl- oder Gaslagerstätten anzutreffen sind

In der Emscher-Lippe-Region konnten zwei Technologien identifiziert werden, welche für die Abtrennung von CO_2 besonders gut geeignet sind:

- Rauchgas aus der thermischen Umwandlung von Energieträgern: Diese Technologie ist insbesondere für die Stein- und Braunkohle- sowie Erdgaskraftwerke von großem Interesse, wird bislang aber in Pilot- und Demonstrationsanlagen eingesetzt. Die in der Emscher-Lippe-Region ansässigen Steinkohle-Kraftwerke Datteln und Gelsenkirchen sind als mögliche Nutzer dieser Technologie zu nennen.

- Fermentationsprozesse (biologische Prozesse zur Umwandlung von Kohlenwasserstoffen zu Biomasse): Da es sich i. d. R. nicht um fossile CO_2-Quellen handelt, muss der Klimaschutzeffekt und auch das quantitative Potential auf die unvermeidlichen CO_2-Emissionen angerechnet werden. Dies kann eine sinnvolle Quelle zur CO_2-Gewinnung und -Nutzung sein, wenn bspw. eine Biogasaufbereitung auf Erdgasqualität ohnehin vorhanden oder geplant ist. Hier kann die Abfallwirtschaft durch Nutzung der biogenen Abfallströme einen erheblichen Beitrag leisten.

CO_2-Nutzungstechnologien in der Emscher-Lippe-Region:

Welche Technologien gute Voraussetzungen für die Nutzung von CO_2 in der Region mit sich bringen, wurde anhand von sechs Kriterien bewertet:

Der **Technology Readiness Level (TRL)** kann als Technologie-Reifegrad bezeichnet werden und beschreibt den Entwicklungsstand einer neuen Technologie auf Basis einer systematischen Analyse. Die hier verwendete Bewertung folgt der im Rahmen des EU-Programms Horizont 2020 ausgearbeiteten Skala, die von TRL 1 (Grundprinzipien beobachtet) bis hin zu TRL 9 (System funktioniert in operationeller Umgebung) reicht.

Die **Fixierungsdauer** beschreibt, wie lange das CO_2 chemisch oder auch biologisch in einem Produkt/Prozess gebunden ist, sodass es nicht in der Atmosphäre enthalten ist und somit sein Treibhausgaspotential entfalten kann.

Für die Bewertung einer Technologie spielt auch das CO_2-**Mengenpotential** eine wichtige Rolle. Dieses liefert eine grobe Abschätzung darüber, welche Menge an CO_2 als Rohstoff in einer Wertschöpfungskette verwendet werden kann.

Das **Produkt- und Verwendungspotential** beschreibt die mögliche Anzahl an Produkten, die unter Berücksichtigung des theoretischen Mengenpotentials, durch die Technologie hergestellt werden kann. Hierbei wird auch die potentielle Nachfrage nach den hergestellten Produkten in der Region mitbetrachtet.

Von großer Bedeutung für die erfolgreiche Implementierung einer Technologie in der Region ist die Anzahl der **Anwender in der Region**. Sind in der Region bereits Unternehmen ansässig, die die Technologie anwenden können, wird dies eine praktische Implementierung deutlich beschleunigen können.

Die **Wirtschaftlichkeit** der Technologie wird anhand verschiedener Faktoren bewertet. Hierzu gehört, inwieweit die Technik bereits am Markt vertreten ist (Vgl. zum TRL) oder ob Pilotprojekte erfolgreich beendet oder möglicherweise eingestellt wurden. Betrachtet wird hierfür auch das Investitionsvolumen im Verhältnis zu möglichen Erträgen.

Die Ergebnisse der Potentialanalyse für die in Kap.3 identifizierten Technologien, die anhand der genannten Auswahlkriterien für die Emscher-Lippe-Region analysiert wurden, sind in Tabelle 16 dargestellt:

Tabelle 16: Identifizierte Technologien für die Emscher-Lippe-Region

	NUTZUNG	AUSWAHLKRITERIEN (Potential: + Gering / ++ Mittel / +++ Hoch)						GEEIGNET FÜR DIE EMSCHER-LIPPE-REGION
	Beschreibung	TRL	Fixierungsdauer	Mengenpotential	Produkt- und Verwendungspotential	Anwender in der Region	Wirtschaftlichkeit	Ja / Nein
CHEMISCHE NUTZUNG	Direktnutzung	+++	+	+	++	+++	+++	evtl. ÜT*
	Synthese hochwertiger organischer Substanzen	++	++	+	++	+++	++	Ja
	Karbonatisierung	+	+++	+++	+	+	+	Nein
	Synthese von Basischemikalien	++	++	++	+++	+++	+++	Ja
	Methanisierung	+++	+	+++	+	++	+++	Ja
	Herstellung von Kraftstoffen	++	+	++	+++	+++	+	evtl. ÜT*
BIOLOGISCHE NUTZUNG	Gewächshausdüngung	+++	+	+	++	+	++	evtl.
	Kultivierung von Mikroalgen	+	+	++	+++	+	+	evtl.
	Biologische Methanisierung	+	+	++	+	+++	+	Ja
	Weiße Biotechnologie	++	++	+	+++	+++	++	Ja

* ÜT: Diese Nutzungstechnologien sollten nur als Übergangstechnologie betrachtet werden

Ungeeignete Techniken für die Emscher-Lippe-Region:

Auf eine Karbonatisierung des anfallenden Kohlendioxids sollte aus verschiedenen Gründen verzichtet werden: Vor allem ist der Reifegrad der Technologie zu nennen. Dieser ist in keinem Stadium, das eine zeitnahe und wirtschaftliche Betriebsweise ermöglicht. Auch nach weiterer Verfahrensentwicklung wird die Wirtschaftlichkeit eine Herausforderung darstellen, da die Produkte einen geringen Marktwert aufweisen.

Die Kultivierung von Mikroalgen in geschlossenen Systemen befindet sich weiterhin im Entwicklungsstadium. Die wohl größte Hürde stellen der Betrieb einer Anlage sowie die effiziente Abtrennung von Biomasse und Nährmedium dar. Im Moment kann dadurch bei einer energetischen Nutzung von Mikroalgen keine positive Energiebilanz erreicht werden.

Geeignete Techniken für die Emscher-Lippe-Region:

Die potentielle Direktnutzung von CO_2 stellt in der Emscher-Lippe-Region, trotz eines geringen Mengenpotentials und kurzer Fixierungsdauer (als Ausnahme kann die Verwendung als Kältemittel genannt werden), eine geeignete Technik dar. Dies liegt insbesondere am hohen TRL und den vielen Anwendungsmöglichkeiten in der Region, um diese Technik auch aus wirtschaftlicher Sicht zu betreiben.

Bei der Synthese hochwertiger organischer Substanzen ist die Fixierungsdauer abhängig von der anschließenden Verwendung der Produkte, wobei Kunststoffe mit Kohlendioxid als Bestandteil die Möglichkeit einer mittelfristigen Fixierung bieten. Das Mengenpotential ist zwar gering, die Anwendung in der Region ist aber als sehr erfolgsversprechend anzusehen.

Die Synthese von Basischemikalien ermöglicht eine CO_2-basierte Produktion von Methanol und bietet somit großes Potential für die Etablierung einer zirkulären Wertschöpfungskette. Eine wirtschaftliche Umsetzbarkeit wird für viele Produkt- und Anwendungsmöglichkeiten in der Emscher-Lippe-Region erwartet.

Die Methanisierung ist aufgrund des hohen TRL und einer hohen erwarteten Wirtschaftlichkeit als eine geeignete Technik für die Emscher-Lippe-Region zu nennen. Durch die Verwendung von Methan als Kraftstoff ist die Fixierungsdauer des Kohlenstoffs gering, weist aber ein hohes Mengenpotential auf.

Kohlendioxidbasierte Kraftstoffe bieten ein hohes Mengenpotential, weisen aber bedingt durch ihre Verwendung nur eine geringe Fixierungsdauer auf. Das Produkt- und Verwendungspotential ist durch die vielfältige Nutzung sehr hoch. Genau wie bei der Direktnutzung stellt die energieintensive Herstellung von Kraftstoffen im Gegensatz zu manchen Chemikalien jedoch keine CO_2-Senke, sondern vielmehr eine Kaskadennutzung dar und sollte daher nur als Übergangsverfahren betrachtet werden.

Die Versorgung von Gewächshäusern mit Kohlendioxid als Pflanzendünger stellt eine beispielhafte Möglichkeit zur Einsparung von Erdgas und Nutzung von CO_2 dar, ist aber in der Emscher-Lippe-Region nur bei Implementierung großer zusammenhängender Gewächshausflächen möglich, unter Nutzung von heutigen Brachflächen.

Ähnlich wie bei der Kultivierung von Mikroalgen ist für eine erfolgreiche Umsetzung der biologischen Methanisierung noch Entwicklungsarbeit notwendig. Durch die theoretische Anwendung in jeder Biogasanlage in der Emscher-Lippe-Region ist das Potential für Anwender jedoch sehr hoch.

Auch bei der Etablierung der „weißen Biotechnologie“ ist noch Entwicklungsarbeit zu leisten, wobei einfache Fermentationsanlagen fakultativ in Anlagennähe betrieben werden könnten. Diese Technologie birgt hohes Potential, allerdings sind die Umsetzungsmengen von Kohlendioxid insgesamt gering.

5.2 Priorisierte Verfahren

Tabelle 17: Aufzählung der Priorisierten Verfahren für die Emscher-Lippe-Region

VERFAHREN	PRODUKTE		AUSWAHLKRITERIEN			AUSWAHL
			Entwicklung regionaler Wertschöpfung	Anbindung an der Infrastruktur	Auswirkung Zirkuläre Wertschöpfung	Priorität (+/++/+++)
Direktnutzung	Kohlensäure		Produkt im Chemiepark Marl; Know-How Vorhanden	Regionale Produktionsanlage vorhanden(technisches CO2); Synergie mit Kältemittel- und Trockeneisproduktion	Kein Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt	+
	Trockeneis		kleiner Markt; geringes Wachstumspotential	Synergie mit Kältemittel- und Kohlensäureproduktion	Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt	+
	Kältemittel		Wachstumspotential durch Substitution von Halogenkohlenwasserstoffen; großer Markt erschließbar	Regionale Produktionsanlage vorhanden(technisches CO2); Synergie mit Kohlensäure- und Trockeneisproduktion von reinem CO2 vorhanden	Kein Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt	+++
Synthese hochwertige organischer Substanzen	Ethylencarbonat		Benötigtes Edukt Ethylenoxid wird in Marl Produziert; Wachstumspotential bei steigender Nachfrage an Lithium-Ionen-Akkus	Keine Anlage bekannt; Verwendung des regionalen Eduktes; Kein Abnehmer bekannt	Sehr geringes Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt	+
	Propylencarbonat		Wachstumspotential bei steigender Nachfrage an Lithium-Ionen-Akkus	Keine regionale Produktionsanlage bekannt; Kein Abnehmer bekannt	Sehr geringes Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt	+
	Dimethylcarbonat		Wachstumspotential bei steigender Nachfrage an Lithium-Ionen-Akkus	Keine regionale Produktionsanlage bekannt; Kein Abnehmer bekannt	Sehr geringes Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt	+
	Polypropylencarbonat		Kein regionales Know-How bekannt	Keine regionale Produktionsanlage bekannt	Möglicher biologischer Nährstoff; mittelfristige Fixierung	+
	Polyurethane		Regionaler Produzent von Polyurethandispersionen als möglicher Abnehmer	Keine regionale Produktionsanlage bekannt	Eingeschränke Recyclierbarkeit; Probleme mit Restmonomere	+
Synthese von Basischemikalien aus Methanol	Formaldehyd		Produkt im Chemiepark Marl; Know-How vorhanden; Rohstoff für Industrie und KMU der Region	Produktionsanlage vorhanden, Infrastruktur kann genutzt werden; Regionale Abnehmer: Chemiepark, KMU	Humantoxikologische Eigenschaften (hoch)	++
	Methyl-tert-butylether		Produkt im Chemiepark Marl; Know-How vorhanden;			+
	Ameisensäure		Möglichkeit einer Regionalen Wertschöpfung; Importe können reduziert werden	Keine Produktionsanlage bekannt; Verwendung in der Region anzunehmen	Humantoxikologische Eigenschaften	++
	Essigsäure		Möglichkeit einer Regionalen Wertschöpfung; Importe können reduziert werden	Keine Produktionsanlage bekannt; Rohstoff für Industrie und KMU der Region; Direkte Abnehmer vorhanden	Sehr geringes Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt	+++
	Dimethylether		Rohstoff für Methanol-to-Olefines-Technologie; regerative Dieselalternative	Keine Produktionsanlage bekannt		+
	(Methanol-to-Olefines) Olefine		Möglichkeit einer Regionalen Wertschöpfung; Substitution fossiler Rohstoffe	Rohstoff für Chemische Industrie der Region	Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt	++
	(Methanol to-Aromatics) Aromaten		Möglichkeit einer Regionalen Wertschöpfung; Substitution fossiler Rohstoffe	Rohstoff für Chemische Industrie der Region	Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt; Abhängig von der Zusammensetzung	++
Methanisierung	Methan		Energiespeicher; Keine stoffliche Nutzung; Substitution von Erdgas	Einspeisung ins Erdgasnetz	Potentielles Treibhausgas	+
Herstellung von Kraftstoffen	Methanol		Treibstoff / Energiespeicher, in diesem Fall keine stoffliche Nutzung; hohes Wachstumspotential	Vorhandene Infrastrukturen flüssiger Kraftstoffe können genutzt werden	Humantoxikologische Eigenschaften, biologisch Abbaubar	+++
	Fischer-Tropsch-Synthese / Methanol-to-Gasoline	Methan, C2-C4 Alkane & Alkene	Rohstoff für Chemische Industrie der Region	Anlage zur Herstellung nicht bekannt; Produkte können verschiedenen Infrastrukutren zugeführt werden: Chemie, Energie	Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt; Abhängig von der Zusammensetzung	++
		Naphta	Rohstoff für Industrie der Region	Anlage zur Herstellung nicht bekannt; Produkt kann Raffinerieprozessen zugeführt werden	Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt	++
		Benzin	Treibstoff; keine stoffliche Nutzung	Anlage zur Herstellung nicht bekannt; Produkt kann vorhandener Infrastruktur zugeführt werden	Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt (hoch)	+
		Kerosin	Treibstoff; keine stoffliche Nutzung	Anlage zur Herstellung nicht bekannt; Produkt kann vorhandener Infrastruktur zugeführt werden	Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt (hoch)	+
		Diesel	Treibstoff; keine stoffliche Nutzung	Anlage zur Herstellung nicht bekannt; Produkt kann vorhandener Infrastruktur zugeführt werden	Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt (hoch)	+
Biologische Methanisierung	Methan		Energiespeicher; Keine stoffliche Nutzung; Substitution von Erdgas	Kombination mit bestehenden Biogasanlagen; Einspeisung ins Erdgasnetz	Potentielles Treibhausgas	++

5.3 Projektskizzen

Projektskizze – Drehscheibe Methanol

Projektziel:	Implementierung einer CO_2 basierten Methanolsynthese unter Verwendung von regenerativ hergestelltem Wasserstoff.
Steckbrief:	Durch die Kombination von Erneuerbaren Energien mit einer Power-to-Liquid-Technologie bzw. Wasserstoffproduktion wird das Problem adressiert, dass bei überschüssiger Stromproduktion EE-Anlagen abgeschaltet werden. Dadurch geht wertvolle Energie ungenutzt verloren, was aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht zu vermeiden ist. Überschüssiger Strom muss einer Wertschöpfung zugeführt werden, wie sie die Power-to-X-Technologien darstellen. Der große Vorteil, den die Power-to-Petrol-Technologie in Vergleich zu anderen Strategien aufweist, ist der große Mehrwert der durch die Produktion von Methanol ausgeht. Die Herstellung von Methanol aus regenerativem Wasserstoff und Kohlendioxid eröffnet nicht nur die Möglichkeit elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen chemisch zu speichern, sondern birgt auch das Potential eines Treib- und Chemierohstoffes. Über die Nutzung als Energierohstoff hinaus, kann Methanol Problems als Treibstoff im Mobilitätsbereich verwendet werden, und dort eine Rohstoffwende herbeiführen. Mit den vielseitigen Wertschöpfungsketten, die Methanol als Chemierohstoff eröffnet wird Methanol zur Drehscheibe und Katalysator in einer sektorübergreifenden Energie- und Rohstoffwende. [105] In der chemischen Industrie kann Methanol an die Stelle von fossilen Rohstoffen wie Erdöl oder Erdgas treten. Schon heute basieren viele relevante Chemikalien auf Methanol. Dieses Potential lässt sich durch die Methanol-to-Olefines, Methanol-to-Gasoline und Methantol-to-Aromatics-Prozesse weiter ausbauen. Dadurch lässt sich eine Versorgung mit wichtigen Ausgangsverbindungen wie Ethen, Propen sowie verschiedenen aromatischen Verbindungen sicherstellen. [114] Ausgehend von Methan können Essigsäure und Formaldehyd, Verbindungen für die es Abnehmer in der Region gibt, hergestellt werden.
Akteure und Partner:	BP Gelsenkirchen Scholven, Evonik Chemiepark Marl

Projektskizze – CO_2 als Kältemittel - Substitution von Halogenkohlenwasserstoffen	
Projektziel:	Mit der Verwendung von CO_2 als Kältemittel wird zum einen CO_2 in einem geschlossenen Kreislauf geführt. Zum anderen kann die Verwendung von Halogenkohlenwasserstoffen reduziert werden.
Steckbrief:	Wie bereits unter Punkt 3.2.5 erwähnt, kann Kohlendioxid als Kältemittel in Kälteanlagen eingesetzt werden, wodurch eine Substitution von Substanzen mit weitaus höherem Treibhauspotential (bis zu fast 4000-mal höheres Treibhausgaspotential [115]) erreicht wird. Der Einsatz von Kohlendioxid als Kältemittel kann dadurch gleich zwei wichtige Beiträge zum Klimaschutz leisten: Zum einen wird Kohlendioxid in einem geschlossenem Kreislauf geführt, und gerät damit nicht in die Atmosphäre. Zum anderen kann ein wichtiger Beitrag zur Erfüllung des Montreal-Protokoll geleistet werden. Die Unterzeichner des Protokolls haben sich dazu verpflichtet, den Ausstoß klimaschädlicher Verbindungen, wie den Halogenkohlenwasserstoffen die in vielen Kälteanlagen Einsatz finden, zu Reduzieren und letztlich vollkommen zu Vermeiden. Mit dem vorhandenen Know-How bei der Herstellung technischer Gase sind die regional ansässigen Unternehmen Linde und Air Liquide. Darüber hinaus werden Unternehmen benötigt, die Interesse daran haben Kälteanalgen mit Kohlendioxid zu betreiben.
Akteure und Partner:	Linde / Air Liquide Chemiepark Marl zur Bereitstellung von CO_2.

Projektskizze – Bereitstellung von regenerativ erzeugtem Synthesegas

Projektziel:	Eine Darstellung von Synthesegas durch die umgekehrte Wassergas-Shift Reaktion aus Kohlendioxid und Wasserstoff.
Steckbrief:	Die Erzeugung von Synthesegas aus CO_2 und erneuerbarem Wasserstoff birgt das Potential, eine zirkuläre Wertschöpfung am Beginn der Prozesskette zu implementieren. Synthesegas ist Ausgangspunkt vielzähliger Syntheserouten der chemischen Industrie. Mit einer Bereitstellung von erneuerbar erzeugtem Synthesegas besteht die Möglichkeit dieses als Drop-in Solution in bereits bestehende Produktionsprozesse zu integrieren. Dies kann einen verringerten Erdgasverbrauch bewirken, eröffnet aber auch die Möglichkeit eines Massenbilanzansatzes, wie unter Punkt 4.3 beschrieben.
Akteure und Partner:	Evonik Chemiepark Marl, BP Gelsenkirchen-Scholven

Projektskizze – Stromspeicherung durch flexible Lichtbogentechnologie

Projektziel:	Überschüssige Erneuerbare Energie wird verwendet, um einen Lichtbogen zu erzeugen, durch welchen Methan, beispielsweise aus Biogas, zu Wasserstoff und Acetylen umgesetzt wird. [116]
Steckbrief:	Vorteilhaft bei dem Einsatz eines Lichtbogens ist die hohe Flexibilität des Verfahrens, welches schnell auf vorahnden Überschussstrom reagieren kann. Die CO_2-Nutzung ergibt sich bei diesem Verfahren indirekt, über den erzeugten Wasserstoff. Wird Methan aus Biogasanlagen verwendet, so kann dieses mit Überschussstrom zu Wasserstoff und die Basischemikalie Acetylen umgesetzt werden. Acetylen wird im Chemiepark Marl bereits über dieses Verfahren hergestellt, ausgehen von Erdgas, hergestellt. Der entstehende Wasserstoff kann anschließend mit dem Kohlendioxid der Biogasanlage zur Reaktion gebracht werden. Mit der Nutzung von Biogas entsteht die Möglichkeit negative Emissionen zu erzeugen, und die Kohlendioxidkonzentration der Atmosphäre zu verringern. Dies kommt durch die vorangegangene Kohlendioxidfixierung der Pflanzen zum Aufbau von Biomasse.
Akteure und Partner:	Evonik Chemiepark Marl

Projektskizze – Carbon Capture am Kraftwerk Datteln 4

Projektziel: Der Neubau des Steinkohle-Kraftwerks Datteln 4 bietet die Möglichkeit, bereits in der Konstruktionsphase eine Abscheidung des Kohlendioxids aus den Abgasen vorzusehen und damit Emissionen von schätzungsweise 2,9 Mio. t/a im Sinne einer zirkuläre Wertschöpfung, umzuleiten.

Steckbrief: Das Steinkohle-Kraftwerk Datteln 4 befindet sich in der Bauphase und wird im Ergebnis eine elektrische Bruttoleistung von 1.100 MW für das öffentliche Stromnetz und Bahnstrom bereitstellen. Darüber hinaus ist eine Wärmeauskopplung für die Einspeisung ins regionale Fernwärmenetz vorgesehen. Über eine angenommene Auslastung des künftigen Kraftwerksbetriebs von rund 4.000 Vollbenutzungsstunden im Jahr wird die voraussichtliche Stromerzeugung und damit Kohlendioxid-Emission abgeschätzt. Die CO_2-Abscheidung kann im Post-Combustion-Verfahren erfolgen, d. h. das Kohlendioxid wird über eine Aminwäsche vom Abgasstrom getrennt. Mit diesem Verfahren können ca. 90% des CO_2 abgetrennt werden. Die Eckdaten des Projektansatzes sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Elektrische Leistung (brutto)	1.100	MW
Stromerzeugung (bei 4.000 Vbh/a)	4.400.000	MWh/a
CO_2-Abscheidung (90%)	2.930.000	t/a
Kosten	1.430	Mio. €
Wirkungsgradminderung durch CO_2-Abscheidung	10%	
Verminderte Stromerzeugung (bei 4.000 Vbh/a)	440.000	MWh/a

Problematisch ist derzeit die Wirtschaftlichkeit einer CO_2-Abscheidung. Zum einen müssen die Investitionen von rund 1,4 Mrd. € finanziert werden und zum anderen ist der zusätzliche Prozessschritt mit Wirkungsgradverlusten verbunden, welche den potenziellen Stromertrag um rund 440.000 MWh/a mindern (vgl. auch Kapitel 3.13).

Akteure und Partner: Uniper SE, WiN Emscher-Lippe GmbH, Landesregierung NRW

Konkrete Schritte:

- Gespräche mit Uniper SE über die Integration einer Pilot- oder Demonstrationsanlage
- Tragfähiges Konzept für die Weiterverwendung des CO_2
- Eruieren von Einnahme-Möglichkeiten durch die CO_2-Vermeidung (z. B. europäischer Emissionshandel)
- Prüfen möglicher Zuschüsse durch Landes-, Bundes- oder EU-Mittel
- Weitere Fach- und Genehmigungsplanung einer Pilot- oder Demonstrationsanlage

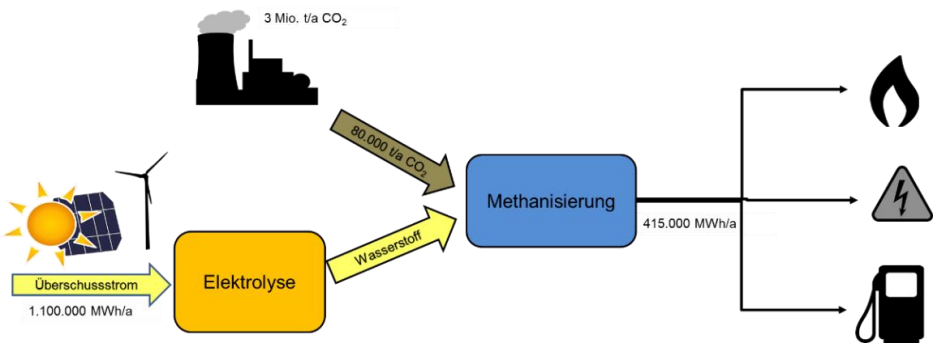
Projektskizze – Methan- oder Methanolherstellung i. V. mit Kraftwerk Datteln 4 und Überschussstrom

Projektziel: Mittelfristig Nutzung von regionalen Stromüberschüssen und CO_2 aus der Kohleverstromung in Datteln für die Herstellung von Methan oder Methanol. Im Ergebnis Substitution fossiler Rohstoffe durch die weitere Verwendung des Produkts (Erdgasnetz, Treibstoff, Basischemikalien)

Steckbrief: In Kapitel 4.5 wurde der mittel- und langfristige Stromüberschuss durch die fluktuierende Erzeugung aus Windkraft und PV dargelegt. Diese Elektroenergie kann für die Herstellung von Wasserstoff (PtG) genutzt werden.

Methanisierung:

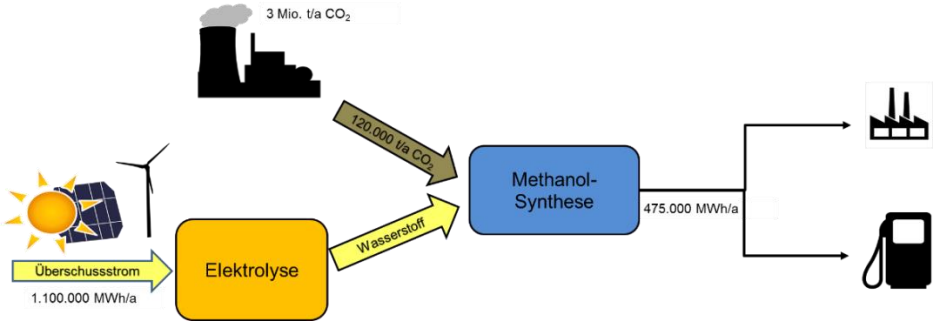
Neben der direkten Nutzung von Wasserstoff (Energieträger/-speicher, Basischemikalie) kann dieser unter Zugabe von CO_2 in Methan umgewandelt werden. Das Methan kann in die bestehende Erdgas-Infrastruktur (Netze, Speicher, Abnehmer) eingebunden werden und so als Speicher erneuerbarer Energie dienen. Zudem ist eine zusätzliche Wertschöpfungsstufe für das CO_2 geschaffen und es kann fossiles Erdgas an anderer Stelle substituiert werden. CO_2-Quelle kann das Steinkohle-Kraftwerk Datteln 4 sein, wo im Fall einer Abscheidung erhebliche Mengen CO_2 anfallen. In folgender Abbildung ist das Schema des Projektansatzes mit der Energiebilanz und Kohlendioxidnutzung dargestellt.



Der limitierende Faktor ist in diesem Fall der angenommene regionale Überschussstrom von rund 1,1 Mio. MWh/a. Falls dieser tatsächlich in der Größenordnung auftreten sollte, könnte damit Wasserstoff produziert und über eine Methansierung rund 80.000 t Kohlendioxid aus dem Kraftwerk Datteln 4 in Methan gebunden werden. Damit würde nur ein Bruchteil des CO_2-Potentials von 3 Mio. t/a für PtG verwendet. Das Methan mit einem Energiegehalt von rund 400.000 MWh/a kann für die Strom- und Wärmeerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplung oder auch als Treibstoff genutzt werden. Je nach Anwendungsfall können dabei fossile Erdgasmengen substituiert und damit Treibhausgasemissionen reduziert werden.

Methanolherstellung:

Anstatt zu Methan kann der Wasserstoff aus der Elektrolyse auch in Methanol umgewandelt werden. Dieser Prozess hat einen etwas besseren Wirkungsgrad und das Methanol ist flüssig und damit sehr gut lager- und transportfähig. Außerdem bietet das Methanol ein größeres Potential um CO_2 zu binden.



Aber auch hierbei kann nur ein Teil des CO_2-Potentials aus dem Kraftwerk für eine weitere Verwendung gebunden werden. Für die weitere Verwendung spielt insbesondere auch die Chemieindustrie eine Rolle, da Methanol als Basischemikalie für etliche chemische Produktionsprozesse dienen kann (vgl. Projektskizze „Drehscheibe Methanol") Aber auch im Mobilitätsbereich kann Methanol eingesetzt werden, sowohl als gut handhabbarer Energieträger für eine Brennstoffzelle oder auch als Benzinersatz im Ottomotor oder Ausgangsprodukt für ein Diesel-Substitut. Entsprechend besteht auch ein großes Potential fossilen Kohlenstoff in den verschiedenen Anwendungsfeldern zu ersetzen.

Grundsätzlich ist auch denkbar, sowohl Methan als auch Methanol herzustellen. Entsprechend würden sich die Produktmengen verringern, da nur ein begrenztes Potential an erneuerbarem Strom und damit Wasserstoff zur Verfügung steht.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die Projektskizze eine außerordentlich große Elektrolyse-Anlage voraussetzt bzw. mehrere dezentrale Anlagen errichtet werden müssen. Auch die Methanisierung hätte eine enorme Kapazität wie sie derzeit am Markt vermutlich nicht ohne weiteres erhältlich ist. Eine Wirtschaftlichkeit für den Projektansatz ist ohne Fördermittel oder Steuervorteile auf die erzeugten Produkte nicht zu erwarten.

Akteure und Partner: Uniper SE, Wasserstoffzentrum Herten, regionale EVU, WiN Emscher-Lippe GmbH

Konkrete Schritte:

- Machbarkeitsstudie mit Marktanalyse zum Vergleich von Methan- und Methanol-Produktion
- Verifizierung und Konkretisierung möglicher Stromüberschüsse aus FEE
- Prüfen verschiedener Geschäftsmodelle für PtG und Power-to-Methanol

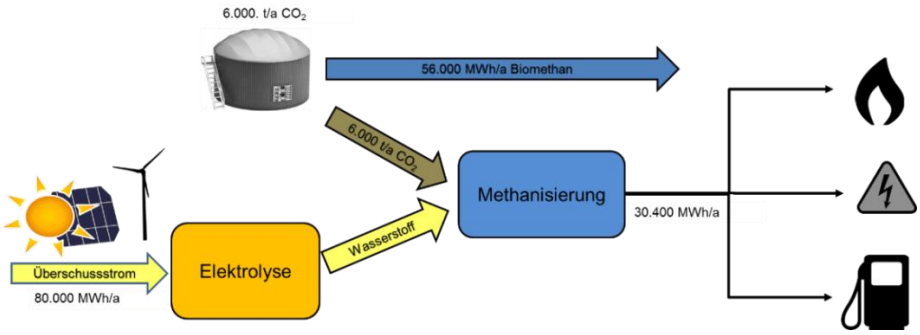
Projektskizze – Methan- oder Methanolherstellung i. V. mit Biogasanlage Dorsten

Projektziel: Kurz- bis mittelfristig Nutzung von regionalen Stromüberschüssen und CO_2 aus der Biogasaufbereitung in Dorsten für die Herstellung von Methan oder Methanol. Im Ergebnis Substitution fossiler Rohstoffe durch die weitere Verwendung des Produkts (Erdgasnetz, Treibstoff, Basischemikalien)

Steckbrief: In Kapitel 4.5 wurde der mittel- und langfristige Stromüberschuss durch die fluktuierende Erzeugung aus Windkraft und PV dargelegt. Diese Elektroenergie kann für die Herstellung von Wasserstoff (PtG) genutzt werden. Die weitere Synthese zu Methan oder Methanol kann aus dem CO_2 der Biogasanlage in Dorsten (vgl. Kapitel 4.2.3) erfolgen. Hierbei handelt es sich um relativ kleine Mengen, die aber ggf. auch über die Zeit der fossilen Kohlenstoffnutzung hinaus zur Verfügung stehen (vgl. Kapitel 5.1.1, Szenario 2). Die Fassung des CO_2 ist in diesem Projektansatz relativ einfach zu realisieren, da es durch die Biogasaufbereitung auf Erdgasqualität ohnehin anfällt.

Methanisierung:

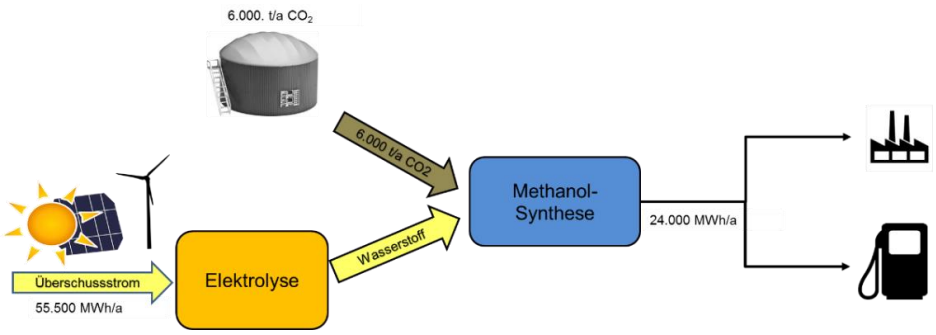
An der Biogasanlage wird heute schon Biomethan erzeugt und in das Erdgasnetzt eingespeist. Durch die zusätzliche Nutzung des abgeschiedenen CO_2 und durch die Methanisierung mit Wasserstoff kann die Methanmenge erhöht und vor Ort gemeinsam eingespeist werden. In folgender Abbildung ist das Schema des Projektansatzes mit der Energiebilanz und Kohlendioxidnutzung dargestellt.



Bei diesem Projektansatz ist die an der Biogasanlage verfügbare CO_2-Menge die limitierende Größe. Es kann entsprechend nur ein Teil der potenziellen Stromüberschüsse genutzt werden. Jedoch könnte die Elektrolyse auch größer dimensioniert und ein Teil des Wasserstoffes anderweitig genutzt werden (z. B. Brennstoffzelle oder Basischemikalie).

Methanolherstellung:

Die Methanolherstellung ist auch an der Biogasanlage in Dorsten denkbar, um das CO_2-Potential zu nutzen. Die Größenordnungen zeigt die folgende Abbildung.



Damit könnte mit Methanol ein Produkt für die regionale Chemieindustrie bereitgestellt werden, wobei die technische Komplexität im Vergleich zur Methanerzeugung zunimmt. Die nutzbare Menge des Überschussstroms für die Methanol-Synthese nimmt allerdings wegen des limitierten CO_2-Potentials ab.

Der Vorteil dieser Projektskizze ist der kleinere Maßstab gegenüber der CO_2-Nutzung am Kraftwerk Datteln 4. An der Biogasanlage könnte ein Elektrolyseur mit rund 25 MW elektrischer Anschlussleistung installiert werden. Dies ist zwar immer noch größer als die heutigen Demonstrationsanlagen (vgl. Audi-Etogas-Anlage mit 6,3 MW) aber durchaus mit der heute verfügbaren Technik vorstellbar.

Akteure und Partner: Agravis AG, Wasserstoffzentrum Herten, regionale EVU, WiN Emscher-Lippe GmbH

Konkrete Schritte:

- Machbarkeitsstudie mit Marktanalyse zum Vergleich von Methan- und Methanol-produktion
- Verifizierung und Konkretisierung möglicher Stromüberschüsse aus FEE
- Prüfen verschiedener Geschäftsmodelle für PtG und Power-to-Methanol

5.4 Strategien zum Ausbau synergetisch vernetzter Kooperationen zwischen Unternehmen

Die Emscher-Lippe-Region steht vor einem strukturellen Wandel, der durch den Umbau 21 zukunftsorientiert und erfolgreich umgesetzt werden soll. Diese strategische Neuausrichtung stellt für die Region eine große Herausforderung dar, kann aber auch als Chance gesehen werden. Im Rahmen der Umgestaltung der Emscher-Lippe-Region wurde u.a. das „cirC_2ess"-Projekt initiiert, welches die Implementierung einer zirkulären Wertschöpfung anstrebt, um dauerhaft Stoffkreisläufe zu schließen und somit Ressourcen zu schonen. So könnte beispielsweise ein Unternehmen von den Reststoffen, in diesem Fall CO_2, eines anderen Unternehmens profitieren, indem es den „Abfall" als Rohstoff zur Herstellung eines neuen Produktes verwendet. Für die Umsetzung zirkulärer Prozesse ist dabei eine Verknüpfung von Akteuren aus der Region essentiell.

Die Betrachtung von CO_2 als Rohstoff und nicht als Reststoff, könnte für die Region von hoher gesellschaftlicher Relevanz sein. Wie bereits in den Kapiteln zuvor beschrieben, bietet die Nutzung von CO_2 diverse Möglichkeiten, um eine erhöhte Wertschöpfung in der Region zu generieren. So können u.a. Technologien entwickelt (und das Know-How exportiert werden) und Produkte ohne die Verwendung weiterer fossiler Stoffe für die ansässige Chemische Industrie hergestellt werden. Eine Stärkung der regionalen Industrie kann darüber hinaus langfristig Arbeitsplätze sicherstellen, durch Synergien zwischen lokalen Unternehmen die Wettbewerbsfähigkeit der Region erhöhen und den Materialfluss aus der Region reduzieren.

Insbesondere in der Emscher-Lippe-Region könnte die Verwendung des Rohstoffes CO_2 als ein Thema für diverse umweltwirtschaftliche Teilmärkte dienen und relevante Themenfelder miteinander verknüpfen. So kann CO_2 durch die Umsetzung von Power-to-X Technologien im Teilmarkt der Umweltfreundlichen Energiewandlung, -transport und -speicherung eine zentrale Rolle einnehmen. Hierbei müssten verschiedene Akteure zusammengebracht werden, um vom CO_2-abscheidenden Unternehmen, über den Lieferanten des Wasserstoffes, bis hin zum letztlichen Anwender der Power-to-X Technologien alle Akteure in die Wertschöpfungskette einzubinden. Die Verbindung von CO_2 und H_2 zur Speicherung des in der Region erzeugten Überschussstroms ist dabei nur ein Beispiel, welches als eine Art Leuchtturmtechnologie Antrieb für weitere Entwicklungen in der Region geben könnte.

Die Nutzung von CO_2 als Rohstoff etwa für die chemische Industrie oder als Nährstoff für Biomasse-Anlagen wurde im Rahmen des cirC_2ess-Projektes als ein potentielles Themenfeld für die Implementierung einer Zirkulären Wertschöpfung in der Emscher-Lippe-Region identifiziert. Bekannte Unternehmen aus der Region (wie z.B. ZINQ, AGR, Evonik/Creavis) sowie Wirtschaftskammern, Gewerkschaften und Hochschulen treiben zusammen mit der WiN Emscher-Lippe diese Entwicklung voran. Im Bereich der CCU-Technologien und der Entwicklung von sogenannten Power-to-X Methoden sind weitere überregionale Akteure aktiv (wie etwa Bayer, BASF, Thyssenkrupp, RWE oder Siemens), die an der Umsetzung von Pilot-Projekten auf regionaler Ebene beteiligt werden könnten.

Um die Entwicklung der CCU-Technologien in der Emscher-Lippe-Region voranzutreiben, könnte ein Kompetenzzentrum im Bereich der Nutzung von CO_2 als Schnittstelle zwischen der Region und den Akteuren der Industrie fungieren. Wie gut dies funktionieren kann, zeigen das Anwenderzentrum H2 in Herten sowie das H2-Netzwerk Ruhr. Für die Entwicklung neuer Technologien, insbesondere in frühen Entwicklungsphasen, müssen die Akteure aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft gemeinsam

in ihrer Forschungsarbeit gefördert werden. Hier spielen auch die in Kapitel 3 genannten Fördermöglichkeiten, wie etwa die nationalen Fördergelder vom BMBF oder dem „European Strategic Energy Technology Plan“ der EU eine wichtige Rolle.

Eine Übersicht beispielhafter Akteure in der Emscher-Lippe-Region, die im Bereich der CO_2 Nutzung zusammengeführt werden könnten, wurde in Abbildung 35 dargestellt:

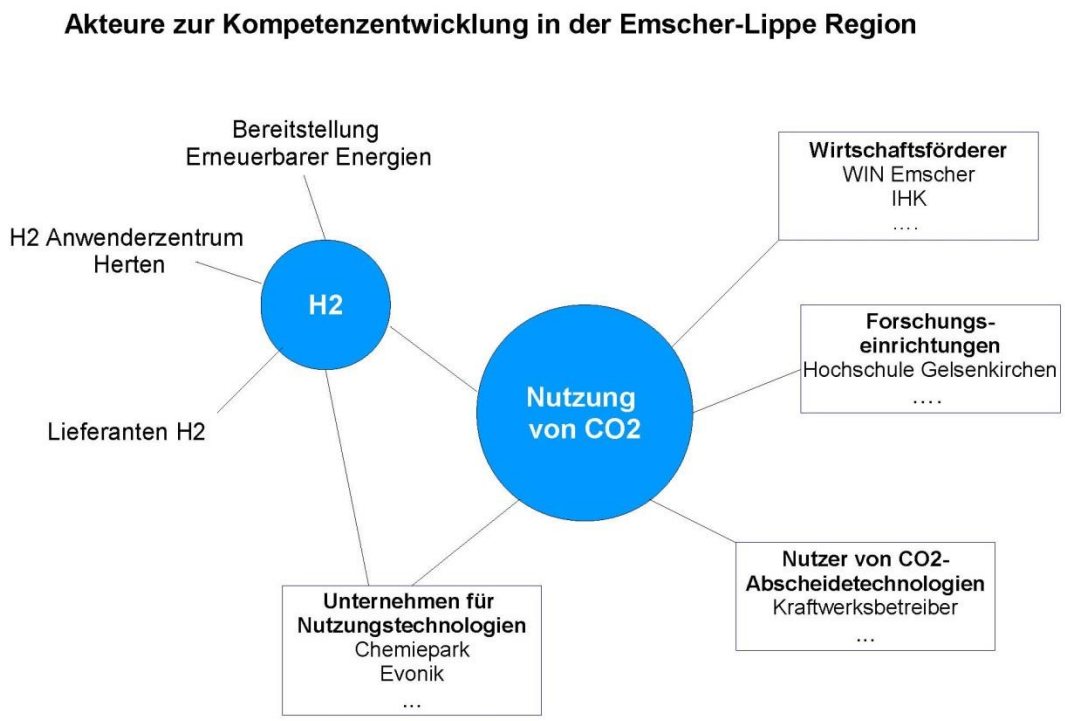


Abbildung 35: Relevante Akteure der Region und ihre Zusammenführung

Sind die potentiellen Akteure erst einmal identifiziert, bietet sich die Ausrichtung eines Workshops an, auf dem gemeinsam die strategische Entwicklung der CO_2 Nutzung in der Emscher-Lippe-Region diskutiert wird. Dabei kann u.a. die Gründung einer Kompetenzplattform in der Region besprochen werden. Darüber hinaus könnten bereits bestehende Best-Practice Beispiele betrachtet und auf eine mögliche Umsetzbarkeit geprüft werden. Von großer Bedeutung sind dabei vor allem der direkte Austausch und die Verknüpfung der Akteure, um mögliche Schritte zu besprechen.

6 Qualitative Interviews

Durchgeführt von Dr. Tanja Scheelhaase (EPEA)

Gegenstand:

Die WiN Emscher-Lippe GmbH hat die EPEA GmbH und das Institut für angewandtes *Stoffstrommanagement (*IfaS) mit der Potentialanalyse „Evaluation zur Nutzung von Kohlendioxid (CO_2) als Rohstoff in der Emscher-Lippe-Region“ beauftragt. In der Studie wurden die Potentiale einer Nutzung von Kohlendioxid (CO_2) als Rohstoff für den Wirtschaftsstandort Emscher-Lippe beleuchtet und konkrete, regionalspezifische Handlungsempfehlungen erarbeitet.

Kohlendioxid (CO_2) hat das Potential als Kohlenstoffquelle für Energieträger oder Chemierohstoffe genutzt zu werden. Hierfür stehen diverse Technologien und Katalysatoren zur Verfügung. Werden regenerative Energien genutzt, können in Kombination mit CO_2 eine Vielzahl interessanter und umweltfreundlicher Möglichkeiten zur Speicherung von Energie (bspw. als Methan oder flüssige Energieträger) oder zur Produktion von Chemikalien und Kunststoffen entstehen. Allerdings stehen viele dieser Technologien aufgrund hoher Entwicklungskosten und Herausforderungen einer wirtschaftlichen Umsetzbarkeit noch am Anfang des Implementierungsprozesses. So ist zu klären, ob die Emscher-Lippe-Region für die Implementierung dieser Technologien aufgestellt ist und als innovatives Zentrum sowie Treiber fungieren kann.

In diesem Rahmen wurde eine Expertenbefragung über die regionalspezifische Ausgangsposition, das geschätzte Potential für eine Nutzung von Kohlendioxid und daraus resultierende Produkte durchgeführt.
Abgefragt wurde die Meinung der Experten über das Nutzungspotential von Kohlendioxid (CO_2) als Rohstoff in der Emscher-Lippe-Region und

- eine Einschätzung der Relevanz für verschiedene Branchen
- eine Einschätzung der Relevanz für Ihr Unternehmen
- Ansätze und Potentiale in ausgewiesenen Unternehmen
- Mögliches Interesse an Material-, Produkt- und Komponentenströmen
- Vielversprechende Hebel und Chancen für die Implementierung und Ausweitung
- Barrieren, Hindernisse und Hemmnisse
- Erfahrungen mit den Lieferketten
- Pilotprojekte und schnell zu erzielende Erfolge.

Anhand des folgenden Interviewleitfadens wurde das Meinungsbild der Experten im Rahmen einer Diskussion eingefangen. Dieser Leitfaden wurde vorab an die Teilnehmer der Interviews geschickt.

1. International erhält das Thema der CO_2-Abtrennung und -Nutzung eine zunehmende Bedeutung. Auf verschiedenen Ebenen wird die Kohlenstoffdioxid-Nutzung erforscht und in ersten Pilotprojekten von Unternehmen konkret umgesetzt.
   1.1. Ist die CO_2-Abtrennung und Nutzung ein Thema und Treiber für innovative Technologien?
   1.2. Verfolgt Ihr Institut konkrete Strategien, um Technologien zur CO_2-Abtrennung und Nutzung weiter zu erforschen und zu etablieren?

2. Sehen Sie übergeordnete Ansätze in der Region?
   2.1. Besteht Interesse an CO_2-basierten Wertschöpfungssystemen?
   2.2. Welche Technologien sehen Sie als geeignet an?

3. Für die Emscher-Lippe-Region sind insbesondere die CO_2-Quellen aus Kohle- und Erdgaskraftwerken sowie der Chemieindustrie von Relevanz.
   3.1. Sehen Sie diese Nutzung als sinnvoll und zukunftsweisend an?
   3.2. Gibt es Überlegungen an Ihrem Institut CO_2-Abtrennungstechnologien effizienter zu gestalten?
   3.3. Ab wann würde Sie eine Abtrennungstechnologie als wirtschaftlich sinnvoll einschätzen?

4. Aus CO_2 und Wasserstoff können Basischemikalien für die chemische Industrie sowie Kraftstoffe mithilfe verschiedener Technologien hergestellt werden.
   4.1. Welche Substanzen erachten Sie als relevant?
   4.2. Welche Substanzen wären Ihrer Meinung nach für die Region relevant?
   4.3. Konventionelles Synthesegas könnte durch regeneratives Synthesegas aus CO_2 und regenerativem Wasserstoff substituiert werden. Wäre eine solche Implementierung interessant?
   4.4. Ist die Herstellung und/oder Verwendung hochwertiger organischer Produkte aus CO_2 aus Ihrer Einschätzung relevant? (Organische Carbonate wie Dimethylcarbonat (DMC), Polycarbonate und Polyurethane oder Harnstoff)

5. Bei der biologischen / biotechnologischen Nutzung von Kohlendioxid, unter Einsatz von Mikroorganismen, Enzymen oder Algen, wird Wasserstoff, Methan oder Algenmasse erzeugt.
   5.1. Wie bewerten Sie die biologischen Prozesse für die Region?
   5.2. Als Alternative können biogene Verbindungen /Verfahren als Kohlenstoffquelle dienen. Wie schätzen Sie das Potential von CO_2 als Kohlenstoffquelle aus biogenen Prozessen ein?

6. Ist es Ihrer Meinung nach sinnvoll regeneratives H_2 für eine Umwandlung von CO_2 zu einem Energieträger zu nutzen oder sehen Sie kohlenstofffreie Technologien wie Brennstoffzellen als zukunftsweisend?

Prof. Dr. Michael Dröscher

Clustermanager CHEMIE.NRW, Vorsitzender ChemSite Initiative

Kurzbeschreibung:

Prof. Dr. Michael Dröscher ist Manager des Clusters CHEMIE.NRW und dazu seit 2014 Vorsitzender der ChemSite Initiative. Zuvor war er Vorsitzender der Deutschen Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie (2005-2006) und Präsident der Gesellschaft Deutscher Chemiker (2010-2011).

In der Enquetekommission *Zukunft der Chemie in NRW* im Landtag NRW war er sachverständiges Mitglied. Bis 2009 leitete er das *Innovationsmanagement Chemicals* der Evonik Degussa GmbH. Nach seinem Eintritt 1982 in die Hüls AG hatte er verschiedene F&E-Leitungsfunktionen inne, darunter die Geschäftsführung der Creavis Ges. für Technologie und Innovation mbH.

Zudem ist er Generalsekretär der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte e.V.

Ergebnisse des Interviews:

Die Chemieindustrie ist heutzutage nur ein minimaler CO_2-Produzent. CO_2 ist auch in der Chemiebranche ein Energiethema, wobei ca. 10% der Kosten der Chemischen Industrie für Energie anfallen. Die anfallenden CO_2-Ströme aus unterschiedlichen Prozessen werden zum Teil wieder genutzt. Beispiel: Die Synthese von Ethylenoxid oder Direktanwendung als Reingas.

Es gilt die Frage zu beantworten, inwieweit CO_2 als Kohlenstoffquelle in der chemischen Industrie zum Einsatz kommen und als Grundstoff für Synthesegas dienen kann. Dazu ist die Verwendung von Wasserstoff (H_2) für weitere Reaktionen quasi unabdingbar.

Es gibt viele Ansätze, welche über Katalyse die Aktivierungsenergie von CO_2 senken. Prof. Dröscher schätzt für eine technische Umsetzung eine Dauer von ca. 15 – 20 Jahre ein, da die „Chemie“ dazu noch nicht endgültig und ausreichend erforscht ist. Allerdings gibt es aktuell auf diesem Gebiet umfangreiche Forschungsprojekte. Die Umsetzung von CO_2 mit H_2 zu Methanol und anderen Produkten ist energieintensiv und rentiert sich auch in absehbarer Zeit nicht. Die Verfahren dazu sind bekannt.

Regenerativer Wasserstoff kann als Energiespeicher oder als Rohstoff genutzt werden. Die nächsten zehn Jahre könnte beispielsweise H_2 aus Überschussenergie in die Kavernen mit Erdgas geleitet und aufdotiert werden, was den Brennwert erhöht.

Fossile Träger reichen mindestens bis zum Jahre 2050 als Grundstoff der Chemischen Industrie, was bedeutet, dass kein Grund besteht kurzfristig auf CO_2 umzuschwenken.

Solange Erdgas als Energieträger oder Grundstoff zu Verfügung steht, bietet die Synthese von CO_2 + H_2 nicht genügend Vorteile. Eine Umstellung auf die chemische Synthese von Methan aus regenerativem Wasserstoff und abgetrenntem CO_2 in einem Zeithorizont nach 2050 ist rein theoretisch denkbar, doch zur Zeit wirtschaftlich nicht darstellbar.

Der Rohstoff für die Chemische Industrie ist Methan (CH_4), besser noch Naphta, unabhängig der Herkunft, aus diesem wird für weitere Produkte zunächst Ethylen C_2H_4, Propylen C_3H_6 und Butylen C_4H_8 hergestellt. Hierbei ist es egal, ob die Grundstoffe aus fossilen oder regenerativen Quellen kommen, der Preis ist hier vor allem ausschlaggebend.

In absehbarer Zukunft werden Kohlekraftwerke Auslaufmodelle sein. Daher scheint es nicht sinnvoll, kurzfristig in eine CO_2-Abtrennungtechnik zu investieren, da diese wiederum sehr energieintensiv ist. Das Problem würde man nur mit großen Stoffströmen lösen, wie z.B. aus der Stahlindustrie. Bei der Herstellung von Stahl ist ein Abgasstrom mit CO_2 auch langfristig nicht zu vermeiden. Sinnvoll erscheint aber eine direkte Umwandlung des Hüttengases, da dieses am effektivsten ist. Dieser Weg wird von Thyssen-Krupp bereits verfolgt.

Eine Vision ist die künstliche Fotosynthese mit Hilfe verschiedener Katalysatoren, welche heute in der Grundlagenforschung ist. Die Verwirklichung der Idee scheint aber noch ca. 30 Jahre bis zur Produktionsreife zu brauchen.

Die Abtrennung und Nutzung von CO_2 wird in den nächsten 15 Jahren nur für Nischen sinnvoll sein. Dazu gehört u.a. auch das Projekt von Bayer (Covestro). Doch langfristig muss sich die Chemische Industrie über die Quellen von ca. 300 Mio. Tonnen Kohlenstoff Gedanken machen. Diese Mengen alleine aus Biomasse zu produzieren, hält Prof. Dröscher für illusorisch.

Die Biotechnologie mit Algen und Umsetzung von CO_2 wird eher ein Nischenprodukt bleiben. Die Durchmischung und Versorgung der Algen in hocheffizienten Röhrensystemen ist extrem energieaufwendig und rentiert sich nur für die Gewinnung von Feinchemikalien.

Zukunftsweisend sieht Prof. Dröscher den Weg für Feinchemikalien über eine direkte Umsetzung von Syngas (CO_2 mit H_2 beaufschlagt) in einem biotechnischen Verfahren. Dabei werden die Bioreaktoren direkt mit Sythesegas beaufschlagt, was als Futter für Bakterien dient. Der Umweg über Fischer-Tropsch-Verfahren wird nicht gegangen. Allerdings befindet sich dies noch in der Grundlagenforschung. Problematisch bleibt das Verhältnis der Investitionskosten einer Anlage, welche ausschließlich mit regenerativer Überschussenergie betrieben werden soll, und deren Auslastung. Hohe Investitionskosten lohnen sich nicht, wenn lediglich 25% der Zeit Überschussenergie zu Verfügung steht.

Die Grundsatzfrage lautet: Müssen wir CO_2 aus dem Stoffstrom wegen der Klimabelastung entfernen oder reicht es aus die CO_2-Emissionen zu reduzieren? Abschließend wird entscheidend sein, ob eine Kreislaufführung von Kohlenstoff aus fossilen Quellen mit CO_2 günstiger als die Umstellung auf regenerative Energien ist.

<u>Wandel der Rohstoffsituation</u>:

Wenn es eine Pilotanlage zur Abtrennung und Umwandlung von CO_2 in den nächsten 5 Jahren geben sollte, dann bietet sich hierfür die Emscher-Lippe-Region an. An diesem Standort befinden sich alle wesentlichen Anlagen die CO_2 emittieren, wie Gas- und Kohlekraftwerke, die Stahlindustrie wie auch die Chemische Industrie mit den etablierten Crackern und etablierten Herstellungsverfahren von Synthesegas. Des Weiteren werden hier auch biotechnologische Verfahren vorangetrieben. Hier sind alle Teilnehmer der Wertschöpfungskette vor Ort. In Kooperationen mit den Hochschulen und Instituten könnten hier richtungsweisende Technologien etabliert werden, welche über die Grenzen von Deutschland exportiert werden können. Eine Pilotanlage, welche einen kohlenstoffreichen Strom aus einem Abgas in Grundchemikalien umwandelt, wäre in der Emscher-Lippe-Region gut denkbar. Im Hinblick auf eine Wettbewerbsfähigkeit ist eine solche Anlage allerdings aufgrund der weltpolitischen Situation und der Rohstofflage in absehbarer Zeit nicht als sinnvoll zu betrachten.

Dr. Jörg Harren

Standortleiter Chemiepark Marl

Kurzbeschreibung:

Herr Dr. Jörg Harren ist seit Anfang 2017 Standortleiter des Chemiepark Marls.

Bis dahin hat er als Director R&D and Applications des Unternehmens EVONIK Degussa GmbH gearbeitet. Er war im Bereich R&D von Superabsorbern und Acylsäue federführend. Von 20002 – 2007 war er Global Manager Pilot Plants and Technology Development bei Degussa.

Kurze Vorstellung des Chemiepark Marl:

Im Chemiepark Marl sind rund 10.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter beschäftigt. Das Gelände erstreckt sich über eine Fläche von 6,5 Quadratkilometern – eine hochmoderne, chemietypische Infrastruktur.

Neben Evonik, ihren Tochtergesellschaften und Beteiligungen, sind zwölf weitere Unternehmen im Chemiepark angesiedelt. Die rund 100 Produktionsanlagen stehen in einem engen stofflichen und energetischen Verbund und werden zum größten Teil rund um die Uhr betrieben. Mehr als vier Millionen Tonnen Produkte werden jährlich produziert. Der Energiebedarf des Chemieparks Marl wird durch die Erzeugung von Strom und Dampf in umweltfreundlicher Kraft-Wärme-Kopplung gedeckt. Dafür werden zwei eigene Gas- und ein Kohlekraftwerk betrieben.

Der Produktionsschwerpunkt im Chemiepark Marl ist die Umsetzung von petrochemischen Rohstoffen wie Benzol, Ethylen, Propylen, Methanol und Phenol zu Basis-, Fein- und Spezialchemikalien – vom C4-Schnitt zu Folgeprodukten, von der Chlorelektrolyse zu PVC, vom Acetylen zu Tetrahydrofuran, von Fettalkoholen und Ethylenoxid zu Tensiden und von Acrylsäure zu Butylacrylat. All diese Produkte finden in Bereichen des täglichen Lebens Verwendung, wie zB: Tapete, Farbe, Reinigunsmittel, Shampoo, Hygieneartikel, Lebensmittel wie Joghurt und Margarine, Sportartikel, Latex-Matratzen oder Pharmazeutika, Komponenten für den Autobau und Kraftstoffzusätze sowie Dämmstoffe für die Bauindustrie – die Produktpalette ist vielfältig.

Ergebnisse des Interviews:

Nach Aussage von Dr. Harrem lohnt sich die CO_2-Nutzung wirtschaftlich nicht, insbesondere bei einem niedrigen Ölpreis. Im Falle eines sog. „Peak-Oil“ könnte sich die Situation ändern, die Frage ist inwieweit wir darauf vorbereitet sind. Der Standort Marl könnte sich nur in diese Richtung entwickeln, wenn der Weltmarktpreis sich entsprechend verteuert.

Doch solange 91% des geförderten Öls verbrannt wird, wird es keine Diskussion in der Petrochemie über die Substitution von Kohlenstoffträgern geben. Die werthaltige Nutzung von Kohlenstoff findet in der Chemie statt, welche weltweit 9 % des geförderten Erdöls in Produkte umwandelt.

Carbon capture reduziert die Anlageneffizienz um rund 10%, was gleichzusetzen ist mit einem um 25% erhöhten Energieeinsatz. Diesen Punkt sieht Dr. Harren als entscheidend, insbesondere gegenüber der konkurrierenden Rohstoffe wie Öl und Kohle als Kohlenstoffquelle. So ist die Frage, ob der Fokus nicht besser auf eine Ausweitung der regenerativen Energieerzeugung zu legen ist.

CO_2 bietet hier wenige Chancen, da das Molekül extrem viel Umwandlungsenergie beansprucht, wenn der Kohlenstoff genutzt werden soll. CO_2 ist extrem energiearm und stabil. Die Bildungsenthalpie von CO_2 ist fast -400 kJ/mol, dieses müsste dann wieder als Energie eingesetzt werden, meist in Form einer H_2-Quelle.

Für den Standort Marl sind die Produkte Synthesegas und Kohlenmonoxid (CO) zum Betreiben von Hydroformulierungsanlagen entscheidend. Eine einzigartige Verbundstruktur bei dem C2, C3 und C4-Stoffstrom – die C-Bausteine wie Ethylen, Propylen, Buten, Iso-Buten und Butadien etc. bei der kompletten Verwertung eines Raffinatschnittes eines Crackers -, ist hier beispielhaft etabliert. An diesem Standort gibt es sogar einen H_2-Überschuss, welcher in gewissen Produktionen als Nebenprodukt anfällt – dort allerdings aus fossilen Quellen gewonnen wird.

Im Chemiepark Marl werden Basischemikalien für den klassischen Markt produziert, er steht damit im extremen Wettbewerb, weltweit. Damit bestimmen die aktuellen Marktpreise, u.a. beeinflusst von den Ölpreisen, die Produktion und die Rohstoffauswahl. Die Kosten von Naphta und der Preis für die großen Olefin-Ströme wie Propylen, Ethylen sind maßgebend. Daraus resultiert eine extreme Abhängigkeit vom Weltmarktpreis sowohl bezüglich der Rohstoffe, als auch für die Produkte. Laut Dr. Harren: „Scheit der Chemiepark Marl nahezu nach günstigen Rohstoffen."

Der Aufwand, die Oxidationsstufe von CO_2 als hochoxidierten Kohlenstoff –abzusenken und zu niedrigen Oxidationsstufen zu bringen, ist sehr hoch und ist nur mit Hilfe von H_2 möglich, was sowohl kosten- wie energieaufwendig ist. Dies ist von einer Wirtschaftlichkeit weit entfernt und ineffizient, selbst bei einer deutlich effizienteren Wasserstoffherstellung. Es ergibt nach Meinung von Herrn Dr. Harren keinen Sinn, aus CO_2 und Wasserstoff wieder Methan herzustellen als Grundstoff für Polymere, welche wieder verbrannt werden.

Sinnvoll wäre es, regenerative Energien einzusetzen und gleichzeitig aufzuforsten, sprich eine Erhöhung von Biomasse und Humus als Kohlenstoffspeicher.

Die Speicherung von regenerativer Energie über H_2 mit einer direkten Nutzung ist durchaus ein Thema, allerdings nicht mit der Umsetzung von CO_2.

Vorstellbar ist der Einsatz einer Lichtbogentechnologie, um mit einer Kohlenstoffquelle Basischemikalien herzustellen, in dem *Power-to-Chemistry*® Model, wobei eine großtechnische Umsetzung noch weit entfernt scheint. Allerdings sollte auch eine Lichtbogenanlage zu 90% ausgelastet sein, um die Anlage wegen der hohen Investitionskosten amortisieren zu können. Betriebswirtschaftlich betrachtet müsste die regenerative Energie hier dauerhaft zu Verfügung stehen, da die Investitionskosten von Chemieanlagen extrem hoch sind.

Die Emscher-Lippe-Region bietet sich als Standort an, um dies im Rahmen einer vorwettbewerblichen Forschung voranzutreiben, da in der Region das Know-How, die Rohstoffe und die Industrie vor Ort sind.

Dr. Thomas Haas

Leiter des S2B-Center Biotechnologie der Creavis am Standort Chemiepark Marl

Kurzbeschreibung:

Dr. Thomas Haas ist Leiter des S2B-Center Biotechnologie der Creavis am Standort Chemiepark Marl.

Die Creavis ist die strategische Forschungs- und Entwicklungseinheit der Evonik und befasst sich mit neuen und nachhaltigen Geschäftsmodellen, zukunftsweisenden Technologieplattformen und wachsenden Märkten. Neben dem Science-to-Business Center Biotechnologie arbeiten Forscher in Marl außerdem im Science-to-Business Center Eco² an den Themen Energieeffizienz und Klimaschutz. Das Advanced Projekthaus "Light & Electronics" in Taiwan beschäftigt sich mit neuen Produkten und Technologien für die Fotovoltaik-, Display-, LED- und Beleuchtungsindustrie. Außerdem gibt es besondere Aktivitäten zu den Themen Corporate Foresight, Life Cycle Management und Photovoltaik.

Ergebnisse des Interviews:

Bei der Nutzung von CO_2 ist das Gas nicht der limitierende Faktor, sondern die Energie, welche aufgebracht werden muss, um diesen Stoff wieder zu aktivieren und umzusetzen, unabhängig von der Zuführung über Strom, Temperatur, Druck oder auch H_2.

Im Ruhrgebiet könnte ein Szenario für 2030, in dem weniger CO_2 emittiert und mehr Energien aus regenerativen Quellen eingesetzt werden, visioniert werden. Dabei würden die Sektoren Energie und Chemie miteinander gekoppelt werden. Beispielsweise könnten die großen Mengen an Synthesegas aus den Stahlwerken direkt als Rohstoff für die chemische Industrie eingesetzt werden, um daraus höherwertige Produkte wie Chemikalien herzustellen. Die daraus resultierende Energielücke sollte durch regenerative Energie aufgefüllt werden, als indirekte Strategie zur CO_2-Einsparung. In diesem Kontext würden die chemischen Umsetzungsprozesse und die daraus resultierenden Produkte als eine Art Energiespeicher fungieren können.

Die Umwandlung von CO_2, Wasser und Strom in Chemikalien, wie auch eine technische Photosynthese, könnte hier etabliert und als Expertise an geeignete Standorte exportiert werden, an denen regenerative Energie günstiger ist, wie bspw. in Regionen mit deutlich höherer Sonneneinstrahlung. Hier in Deutschland bzw. NRW, sollten die dazu notwendigen Chemikalien und Additive sowie das Know-How produziert werden, um an Standorten weltweit, wo regenerative Energie günstig ist, eine technische Photosynthese umzusetzen.

Nach Überzeugung von Dr. Haas geht der Weg über die Biotechnologie. In Demonstrationsanlagen in Marl im Verbund mit Universitäten und weiteren Instituten könnte hier die notwendige Technik erforscht und der Standort als „Technologieschmiede“ etabliert werden.

In der sogenannten „Weißen Biotechnologie“ nutzt die Chemische Industrie die Biologie in technischen Prozessen. In einfachen Reaktoren wandeln im Wesentlichen Bakterien und Hefen Gasgemische aus CO_2 und H_2 zu hochwertigen Chemikalien um. Vorteil ist, dass diese Mikroorganismen kein Licht brauchen und unter einfachen Bedingungen arbeiten. Das Gasgemisch kann einfach über eine Elektrolyse und Abgas vor Ort gewonnen werden. Hier sieht Dr. Haase CO_2-verstoffwechselnde Orga-

nismen als Brücke der modernen Industrie zur Natur, wobei bei der Umwandlung die Werkzeuge der Natur genutzt werden.

Für die Verwendung von regenerativem Überschussstrom bietet sich eine Kopplung von Fermentern und einem Stahlwerk an. In Zeiträumen von Stromspitzen aus Überschussenergie wird das im Stahlwerk anfallende Kuppelgas direkt in die Fermenter geleitet, wo die Bakterien es umsetzen. Wenn kein Überschussstrom vorhanden ist, wird alternierend das Gas zur Energiegewinnung verbrannt. Die Bakterien werden so in einem Batchbetrieb gefahren und erhöhen ihre Effektivität. Hier ist ein Umdenken erforderlich, die Anlagen müssen flexibel sowie modular aufgebaut sein und relativ geringe Investitionskosten aufweisen, da diese nur im Teillastbetrieb gefahren werden. Entwicklungsarbeit ist hier allerdings noch zu leisten, wobei der Weg über anaerobe Prozesse gehen wird.

Dabei ist die jeweilige Nutzung von CO_2 standort- und kontextabhängig. In Regionen mit kostengünstigem regenerativen Strom, wie z.B. Brasilien, könnte dann eine Direktumwandlung von CO_2 mit H_2 ein Lösungsweg darstellen sowie modulare Fermenter mit Direkteinleitung von Abgasen.

Dazu würde sich eine Demonstrationsanlage in der Emscher-Lippe-Region anbieten, da dort alle Beteiligten etabliert sind.

Prof. Dr.-Ing. Görge Deerberg

Stellv. Institutsleiter – Fraunhofer UMSICHT

Kurzbeschreibung:

Prof. Dr. Görge Deerberg ist stellvertretender Institutsleiter und wissenschaftlicher Direktor am Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT in Oberhausen und leitet dort das Geschäftsfeld Prozesstechnik. Er ist außerdem Leiter des interdisziplinären Fernstudiums Umweltwissenschaften »infernum«, welches das Fraunhofer UMSICHT in Kooperation mit der Fernuniversität in Hagen anbietet.

Nach seinem Studium der Chemietechnik an der Universität Dortmund promovierte er 1996 zu dem Thema »Zur sicherheitstechnischen Beurteilung von Semibatch-Prozessen mit Gas-Flüssigkeits-systemen«. Seit 1997 ist er für das Institut UMSICHT tätig.

Ergebnisse des Interviews:

Die primäre Stromerzeugung sollte auf regenative Energiequellen ausgerichtet werden. Der Fokus liegt primär nicht auf der CO_2-Abtrennung bei Kraftwerken mit fossilen Energieträgern, da die Abtrennung selbst sehr energieaufwendig ist. Die Energie, welche zur Abtrennung und CO_2-Reaktivierung benötigt würde, könnte besser direkt genutzt werden.

In einigen Bereichen sind jedoch CO_2-Emissionen unvermeidbar, wie bei der Zementherstellung, Stahlerzeugung und Abfallverbrennung, nur hier haben die Überlegungen der CO_2-Abtrennung überhaupt Sinn.

Hier könnte über eine Abtrennung und Nutzung nachgedacht werden, welche allerdings extrem energieineffizient wäre. Bei unvermeidbaren CO_2-Emittenten wie der Stahlerzeugung ist die Kohlenstoffnutzung über die Kuppelgase weitaus sinnvoller.

Bei der Stahlerzeugung kann direkt über das Hüttengas/Kuppelgase der Kohlenstoffstrom deutlich effizienter reaktiviert und eine chemische Nutzung zugeführt werden. Die Substitution des Energieträgers Hüttengas durch regenerative Energie scheint effektiver zu sein, da das Schwachgas, welches heutzutage verbrannt wird, nur mit einem geringen Wirkungsgrad genutzt wird. In dem Zuge könnte die gesamte Prozesskette mit Strom, Wärme sowie Energie deutlich optimiert werden.

Regenerativer Strom sollte für die H_2-Produktion eingesetzt werden. Perspektivisch wird regenerativer Strom importiert werden können, um den Bedarf zu decken. Prognosen des Wuppertal-Institutes gehen von einem Bedarf von ca. 1.320 TWh mit Effizienzeffekten und über 3000 TWh ohne diese in 2040 aus, bei einer vollständigen Dekarbonisierung des Energiesystems (> 95% Minderung der THG Emissionen). Zurzeit werden rund 600 TWh produziert.

Nach Prof. Deerberg hat die großtechnische Umsetzung von CO_2 durch Algen keine realistische Chance, da die ständige Umwälzung im System sowie die Abtrennung viel zu energieaufwendig ist. Dabei wird 98% Wasser bewegt bei nur 2% nutzbarer Algenmasse. Diese Verfahren sind nur für Spezial-Chemikalien interessant, bei Produkten mit hoher Wertschöpfung, z.B. Astaxanthin als Antioxidans. Für den Energiesektor scheint nach dem heutigen Stand der Aufwand zu hoch. Weitere Grundlagen-

forschung ist sinnvoll, da erst sehr wenige Algenarten und deren Reaktionsmechanismen erkundet sind. Auf diesem Sektor steckt noch viel Potential.

Kohlenstoffquellen für die Herstellung von Produkten sollten verstärkt aus Biomasse und biogenen Reststoffen generiert werden.

Perspektivisch sollte in der Region der Fokus auf eine weitreichende Nutzung von biogenen Reststoffen gelegt werden. Über Vergärungsverfahren und insbesondere einer Co-Fermentation mit Abwässern – auch aus der Industrie, können wertvolle Nährstoffe zurückgewonnen werden, wie Nitrat und Phosphat. Weiter wird eine nicht unerhebliche Menge an Biogas generiert, sowie ein Düngsubstrat für den Boden.

Eine weitere interessante Entwicklung könnte die Lichtbogentechnologie darstellen, welche im Chemiepark Marl etabliert ist. Hier wird aus Methan Acetylen und Wasserstoff gewonnen. Mit diesem Wasserstoff könnte dann wiederum CO_2 umgewandelt werden.

Diese Technik bietet sich als anpassungsfähige und wechsellastfähige Alternative zur Elektrolyse an, mit relativ geringem Investitionsaufwand. Allerdings ist die Bereitstellung von einer Regelreserve und Stabilisierung des Stromnetzes durch punktuelle Abschöpfung von Überschussstrom ein Strommarktthema.

Dr.-Ing. Achatz Reinhold

Head of Corporate Function Technology, Innovation & Sustainability bei ThyssenKrupp

Kurzbeschreibung:

Seit Oktober 2013 ist Dr.-Ing. Achatz Reinhold Head of Corporate Function Technology, Innovation & Sustainability bei ThyssenKrupp. Er war davor Corporate Vice President und Forschungschef der Siemens AG und leitete die globale Siemens Forschung (Corporate Research and Technologies).

Ergebnisse des Interviews:

Die ThyssenKrupp AG initiiert gemeinsam mit Partnern aus Forschung und Wirtschaft ein branchenübergreifendes Technologietransfer-Projekt Carbon2Chem®, in dessen Mittelpunkt die Umwandlung von Prozessgasen aus der Stahlherstellung zu werthaltigen Chemikalien steht. Die Zusammenarbeit zwischen Stahl und chemischer Industrie soll eine wirtschaftliche und stoffliche Verwertung, von bei der Stahlherstellung benötigtem Kohlenstoff, bis hin zu Düngemitteln oder Treibstoff ermöglichen. Das Projekt hat damit das Potential, den CO_2-Ausstoß der Hütte auf nahezu Null zu reduzieren.

Untersucht wird die Möglichkeit aus CO_2 aus Hüttengasen wertvolle Chemikalien zu generieren. Hüttengas besteht zu 44 Prozent aus Stickstoff, 23 Prozent Kohlenstoffmonoxid, 21 Prozent Kohlendioxid, 10 Prozent Wasserstoff und zwei Prozent Methan. Aus Stickstoff und Wasserstoff wird Ammoniak im so genannten Haber-Bosch Verfahren, als Basis für Mineraldünger, hergestellt. Die chemische Reaktion verläuft bei einem Druck von 200 bis 300 bar und einer Temperatur von 350 bis 450 Grad Celsius. Ein Katalysator beschleunigt die Umwandlung. Hierfür wird Strom aus erneuerbaren Quellen verwendet.

Dieses Verfahren ist fakultativ – wenn Überschussenergie aus erneuerbaren Quellen das Stromnetz überlasten würde, setzt die Chemieproduktion ein. In dieser Situation werden die Hüttengas-Ströme aufgeteilt, sodass ein Teil weiterhin für den Bedarf der Stahlherstellung und der andere Teil für die Chemieproduktion mithilfe erneuerbarer Energien zur Verfügung stehen. Mit diesem Konzept des Lastmanagements oder auch Demand Side Management wird das Stromnetz stabilisiert, was ein wichtiger Baustein der Energiewende darstellt.

Der Weg ausschließlich über das Abgas CO_2 zu gehen ist aufgrund der benötigten hohen Energiemengen nicht sinnvoll.

Zusammenfassung der Interviews

Die Experten waren unisono der Meinung, dass eine Abtrennung und Umsetzung von CO_2 zu Methan aus heutiger Perspektive wenig erfolgversprechend ist, da diese einen extrem energieintensiven Prozess darstellt. Hierzu sind noch weitere Grundlagenforschungen notwendig, um das Verfahren effizient gestalten zu können.

Dreh- und Angelpunkt ist die Bereitstellung von sehr preiswerter regenerativer Energie, damit die Verfahren mit den Weltmarktpreisen für einerseits Rohstoffe, aber auch Produkte, konkurrieren können. Das Zusammenspiel der Investitionskosten für die Anlagen und die fakultative Betriebszeit, bedingt durch den Einsatz von Überschussenergie der regenativen Energie, werden hier eine entscheidende Rolle spielen.

Die Speicherung der Überschussenergie aus den regenerativen Energiequellen ist zwingend erforderlich, könnte jedoch eleganter gelingen. Hier wurde die direkte Speicherung in H_2 genannt, wobei das Gas in Erdgasspeichern aufdotiert werden könnte.

Fakultative Verfahren, welche ein flexibles An- und Ausschalten der Anlagen abhängig der Energiesituation ermöglichen, sind weiter voranzutreiben. Dazu gehören Verfahren der „Weißen Biotechnologie“ zur Produktion von Feinchemikalien, wie auch Anlagen mit Lichtbogentechnologie. Bei beiden Verfahren kommt vor allem Synthesegas zum Einsatz als Grundlage zur Umsetzung.

Eine Pilotanlage, welche einen kohlenstoffreichen Strom aus einem Abgas in Grundchemikalien umwandelt, wäre in der Emscher-Lippe-Region gut denkbar. An diesem Standort befinden sich alle wesentlichen Anlagen wie Gas- und Kohlekraftwerke, welche CO_2 emittierten, die Stahlindustrie wie auch die chemische Industrie mit den etablierten Crackern und etablierte Herstellungsverfahren von Synthesegas, weiter werden hier auch biotechnologischen Verfahren vorangetrieben. Regenerative H_2-Ströme können vor Ort produziert werden. Hier sind alle Teilnehmer der Wertschöpfungskette vor Ort. In Kooperationen mit den Hochschulen und Instituten könnten hier richtungsweisende Technologien etabliert werden, welche über die Grenzen von Deutschland exportiert werden könnten. Im Hinblick auf die Wettbewerbsfähigkeit ist eine solche Anlage allerdings aufgrund der weltpolitischen Situation und der Rohstofflage in absehbarer Zeit nicht sinnvoll.

7 Zusammenfassung

Der Ansatz der Zirkulären Wertschöpfung zielt darauf ab, von Anfang an die richtigen Weichen für zukunftsfähige Material- und Stoffströme zu stellen, um dauerhaft funktionierende und gewinnbringende Kreisläufe zu etablieren. Unternehmen wird dadurch eine zukunftsfähige und profitable Alternative zur linearen Durchlaufwirtschaft geboten, in der das wirtschaftliche Wachstum von Primärrohstoffen entkoppelt und die Ressourceneffektivität unabhängig von einer voranschreitenden Ressourceneffizienz in den Vordergrund gestellt wird.

Die WiN Emscher-Lippe GmbH hat früh erkannt, dass in diesen neu entstehenden Wirtschaftskonzepten und Technologien ein großes Potential für eine Weiterentwicklung der regionalen Wirtschaft liegt. Die Emscher-Lippe-Region, eine hochindustrialisierte Region mit dem Schwerpunkt in den Branchen Energie und Chemie, stellt sich den zukünftigen Herausforderungen des Klimawandels und der zunehmenden Ressourcenknappheit mit dem Ansatz der Zirkulären Wertschöpfung. Das Ziel: Stoffkreisläufe schließen und somit Ressourcen optimal und dauerhaft nutzen. Kohlendioxid (CO_2) soll in der Region nicht länger nur als ein in der Industrie anfallendes „schädliches“ Abfallprodukt (Emissionen), sondern vielmehr als ein potentieller Rohstoff betrachtet werden. Die EPEA Internationale Umweltforschung und das Institut für angewandtes Stoffstrommangement (IfaS) wurden beauftragt, die Potentiale einer Nutzung der lokal anfallenden CO_2-Ströme, welche zurzeit als Treibhausgas emittieren, für den Wirtschaftsstandort Emscher-Lippe zu evaluieren und konkrete, regionalspezifische Handlungsempfehlungen zu erarbeiten.

Eines der übergeordneten Ziele neben der Nutzung von CO_2 als Rohstoff ist die deutliche Reduktion der CO_2-Emissionen, um den anthropogenen Klimawandel zu stoppen. Im Gegensatz zu bisherigen Vermeidungstechnologien kommen hierfür „Carbon Capture and Utilisation“(CCU)-Technologien zum Einsatz, die es ermöglichen, den natürlichen CO_2-Kreislauf, in dem CO_2 durch Photosynthese stetig zirkuliert, zu imitieren. Einer der größten Vorteile der CCU-Technologien ist nicht zwangsläufig die Speicherung von CO_2, sondern vielmehr der reduzierte Verbrauch fossiler Ressourcen, die ansonsten für die industrielle Produktion verwendet würden. In Verbindung mit der Nutzung erneuerbarer Energien stellen sie eine wichtige Alternative dar, um fossile Rohstoffe zu substituieren und CO_2 dauerhaft in Kreisläufen zu halten. Die Entwicklung der CCU-Technologien wird auf Bundesebene bereits stark gefördert, da die stoffliche Nutzung von CO_2 als Kohlenstoffquelle das Potential bietet, um die benötigte Rohstoffbasis für die deutsche Chemiebranche zu gewährleisten. Auch seitens der EU und diverser Unternehmen wird die Entwicklung der CCU-Technologien und Power-to-X Methoden vorangetrieben, sodass stetig neue Fortschritte erzielt und verschiedene Pilotprojekte gestartet werden konnten.

Um Kohlendioxid überhaupt mit einem „positiven“ Klimaeffekt wiederverwenden zu können, gilt es zunächst die maßgeblichen Emissionsquellen zu fassen und für die Wiederverwendung aufzubereiten. Für die Abtrennung und Nutzung der industriellen CO_2-Emissionen sind vor allem Kohle- und Erdgaskraftwerke sowie die Chemie- und Stahlindustrie von hoher Relevanz. Eine insbesondere bei Kraftwerken verwendete CO_2-Abtrennungstechnologie ist das sogenannte Pre-Combustion-Verfahren, bei dem das CO_2 nach der Verbrennung aus dem Rauchgas abgetrennt wird. Die CO_2-Abtrennung (insbesondere aus Kraftwerken) ist jedoch mit zusätzlichen Investitionskosten und hohem Energieaufwand verbunden, der zu einer Wirkungsgradverminderung von rund 10% führen

kann. Daher ist die Berücksichtigung der Abtrenntechnologien insbesondere bei unvermeidbaren CO_2-Emittenten wie Stahlwerken und Abfallverbrennungsanlagen von erhöhter Relevanz. Es gilt auch die Prämisse, dass zusätzlicher Energiebedarf, der durch die Abscheidung (und Nutzung) von CO_2 anfällt, aus erneuerbaren Quellen zu substituieren ist, um „positive“ Klimaeffekte zu erreichen. Inwieweit sich die CO_2-Abtrennung, die in der Praxis bereits angewendet wird, aus ökonomischer Sicht rechnet, richtet sich vor allem nach dem Investitionsvolumen, der potentiell nutzbaren Menge des CO_2 und den verwendeten Verfahren der CO_2-Nutzung. Ein wesentlicher Faktor hierfür ist auch die monetäre Kompensation für eine tatsächliche CO_2-Reduktion sowie wirtschaftliche Anreize, um regenerative Überschussenergie sinnvoll zu speichern und damit das Stromnetz zu stabilisieren.

Bezüglich der CO_2-Nutzung wird insbesondere zwischen zwei Verfahren unterschieden: der chemischen Nutzung und der biologischen / biotechnologischen Nutzung.

Der Nutzung von CO_2 in der chemischen Industrie wird schon länger als nur im Zuge der Rohstoff- und Energiewende Beachtung geschenkt. Bereits seit einiger Zeit gibt es industriell erprobte und etablierte Verfahren, bei denen Kohlendioxid mit energiereichen, reaktiven Verbindungen wie zum Beispiel Wasserstoff umgesetzt wird. Kohlendioxid ist ein energiearmes und dadurch reaktionsträges Molekül, für die Umwandlung müssen daher große Mengen Energie eingesetzt werden. Diese kann in Form von Wärme, Licht, Elektrizität oder einem sehr energiereichen Molekül wie H_2 bereitgestellt werden. Für diese Verfahren sowie der Produktion des benötigten Wasserstoffes bietet es sich wiederum an, bisher ungenutzte Kapazitäten erneuerbarer Energien zu nutzen. Die relevantesten Methoden sind

- die Methanisierung (Umsetzung von CO_2 zu Methan)
- die Herstellung von Basischemikalien und Kraftstoffen
- die Synthese hochwertiger organischer Produkte
- die stoffliche Direktnutzung

Die energieintensive Herstellung von Kraftstoffen sowie die Direktnutzung stellen im Gegensatz zu manchen Chemikalien jedoch keine CO_2-Senke, sondern vielmehr eine Kaskadennutzung dar und können daher höchstens als Übergangsverfahren betrachtet werden.

Bei einer biologischen / biotechnologischen Nutzung des Kohlendioxids können zum einen durch den Einsatz von Mikroorganismen, Enzymen oder Algen „Produkte“ wie Wasserstoff, Methan, Algenmasse oder Rohstoffe für Feinchemikalien erzeugt werden.

Zum anderen können aber auch Biomasse wie Holz oder Humus „hergestellt“ und damit CO_2 längerfristig aus der Atmosphäre sequestriert werden. Im Vergleich zu den chemischen Verfahren ist bei den biologischen / biotechnologischen Verfahren ein direkter Einsatz des Rauchgases als CO_2-Quelle möglich und dient dabei als wachstumsbeschleunigendes Medium. Die relevantesten Methoden sind:

- die biologische Nutzung mittels Algenkulturen (mit Einschränkungen)
- die biotechnologische Nutzung mittels Mikroorganismen

Um diese Verfahren kommerziell verfügbar zu machen, sind jedoch noch erhebliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu leisten. Diese betreffen insbesondere die Effizienz der Verfahren; sowohl die spezifische Produktionsleistung als auch die Energiebilanz müssen noch optimiert werden.

Eine Darstellung der relevantesten chemischen und biologischen Nutzungsverfahren, die daraus entstehenden Produkte sowie deren potentielle Nutzer, befindet sich im Anhang.

Die genannten Verfahren der CO_2-Abtrennung sowie -Nutzung galt es im Rahmen der Studie auf die Emscher-Lippe-Region zu übertragen. Hierfür war es notwendig, die ansässige Infrastruktur zu analysieren und potentielle Stärken und Schwächen zu identifizieren.

Die im nördlichen Ruhrgebiet ansässige traditionelle Bergbau- und Industrieregion hat sich in den vergangenen Jahrzehnten zu einem Standort für innovative Zukunftstechnologien und moderne Dienstleistungen entwickelt. Besonders stark geprägt wird die Emscher-Lippe-Region dabei durch Unternehmen aus dem Energiesektor sowie der Petro- und der Chemischen Industrie sowie deren Zulieferer. Diese sind auf eine stetige Versorgung mit Flüssigkeiten oder Gasen angewiesen, was durch ein hervorragendes Straßen-, Schienen- und Pipeline-Netz gewährleistet wird. Die Chemie- und Industrieparks in Marl, Castrop-Rauxel, Dorsten und Gelsenkirchen-Scholven sind sowohl als CO_2-Emittenten, als auch als CO_2-Nutzer von großer Relevanz.

Es ist zu erkennen, dass insbesondere der Süden der Emscher-Lippe-Region maßgeblich für die insgesamt rund 23,7 Millionen Tonnen CO_2-Emissionen verantwortlich ist. Hier sind vor allem die Kraftwerke sowie die Betriebe in den Chemie- und Industrieparks in Gelsenkirchen-Scholven und Marl zu nennen. Bei Prozessen wie der Eisen-, Stahl- und Kalkherstellung ergeben sich in absehbarer Zeit keine anderen Möglichkeiten zur Minderung der CO_2-Emissionen als eine nachgeschaltete Abscheidung des Kohlendioxids aus den Abgasen. Aufgrund des hohen Anteils an den Gesamt-CO_2-Emissionen dieser Prozesse ist es im Hinblick auf die Klimaziele von 2050 von hoher Relevanz, CO_2-Emissionen aus diesen Prozessen zu nutzen. Trotz eines steigenden Anteils erneuerbarer Energien werden konventionelle Kraftwerke bis zu ihrer endgültigen Abschaltung mittelfristig weiterhin einen wichtigen Beitrag zu einer zuverlässigen Energieversorgung leisten. In der Emscher-Lippe-Region wird aus langfristiger und struktureller Sicht das neue Steinkohlekraftwerk in Datteln (zwischen 6 bis 8 Mio. t CO_2 jährlich) und die KWK-Anlage in Marl von hoher Relevanz für die potentielle Nutzung von CO_2 sein. Die vielen ansässigen mittelständischen Unternehmen in der Region werden alleine aufgrund ihrer Größe nicht für eine potentielle CO_2-Abscheidung berücksichtigt werden können, da die nutzbaren CO_2-Mengen in keinem Verhältnis zum Aufwand einer Implementierung der Abscheide-Technologien stehen.

Ausgehend von den zuvor beschriebenen Verfahren zur chemischen und biologischen CO_2-Nutzung könnten sich nach einer CO_2-Abtrennung bei den identifizierten CO_2-Emittenten Zugänge zu verschiedenen Wertschöpfungsketten ergeben, die auch im Anhang dargestellt wurden. Als besonders interessanter Standort für die Umsetzung von Kohlendioxid gilt der Chemiepark Marl. Dort gibt es zum einen ein Potential für die Direktnutzung von CO_2. Zum anderen wird Methanol als Syntheserohstoff verwendet, wodurch sich eine CO_2-basierte Methanolproduktion anbieten würde. Potential zur stofflichen Nutzung von Kohlendioxid geht auch vom Chemiepark Gelsenkirchen-Scholven aus, in dem Methanol aus Synthesegas hergestellt wird. Auch eine biologische Nutzung in Form einer Gewächshausdüngung ist denkbar. Eine Ansiedelung und der Ausbau der umweltfreundlichen Landwirt-

schaft bieten sich in Kraftwerksnähe an. Dazu können neue Konzepte potenzielle Abnehmer in der Emscher-Lippe-Region generieren.

Wasserstoff spielt dabei nicht nur für die Nutzung von CO_2 in der Emscher-Lippe-Region eine bedeutende Rolle, sondern kann als ein Schlüssel zur Energiewende in Deutschland fungieren. Der in vielen Verfahren für die Chemie als Basisprodukt verwendete Wasserstoff wird weltweit zu 96% aus fossilen Energieträgern hergestellt, für eine klimapositive Entwicklung müsste dieser jedoch aus erneuerbaren Energien produziert werden. Im Forschungsbereich Wasserstoff sind bereits diverse Akteure (u.a. Anwenderzentrum H2 Herten, H2-Netzwerk Ruhr) und Unternehmen (u.a. Air Liquide, Linde Group) in der Region aktiv, darüber hinaus konnten Pilotprojekte für die Herstellung von „grünem" Wasserstoff realisiert werden (u.a. Windstromelektrolyse, Faulgas aus Kläranlagen). Auch der Transport von Wasserstoff ist durch das ausgedehnte Pipeline-Netz, welches insbesondere von der chemischen Industrie genutzt wird, sehr gut möglich. Betrachtet man das Gesamtspektrum von Erzeugung, Produktion, Entwicklung oder Anwendungen, ist keine andere Region entlang der Wertschöpfungskette der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie so breit aufgestellt wie das Ruhrgebiet und die Emscher-Lippe-Region.

Dennoch liegt die Menge an „grün" produziertem Wasserstoff in der Emscher-Lippe-Region bisher bei nahezu null. Zwar sind langfristig, durch höhere Anteile der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung, über das Jahr gesehen etliche Phasen zu erwarten, in denen die fluktuierende Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik über dem Lastgang der Stromverbraucher liegt. Doch für die Power-to-X-Technologie (PtX) gilt bisher, dass die Errichtung einer großen Anlage zur Wandlung des gesamten Überschussstroms in der Region nicht praktikabel bzw. unwirtschaftlich ist. Eine Handlungsempfehlung geht daher in die Richtung, kleinere, lokale Einheiten zu entwickeln und dabei möglichst konzentrierte CO_2-Emissionen zu nutzen.

Aus der Analyse der Emscher-Lippe-Region lassen sich Herausforderungen erkennen und potentiell geeignete Techniken für die CO_2-Abtrennung und -Nutzung in der Region ermitteln. So konnten zwei Technologien identifiziert werden, welche für die Abtrennung von CO_2 besonders gut geeignet sind: Zum einen die Abtrennung von Rauchgas aus der thermischen Umwandlung von Energieträgern, was insbesondere für die Stein- und Braunkohle- sowie Erdgaskraftwerke von großem Interesse ist, aber bislang nur in Pilot- und Demonstrationsanlagen eingesetzt wird. Zum anderen können Fermentationsprozesse eine sinnvolle Quelle zur CO_2-Gewinnung und -Nutzung sein, wenn bspw. eine Biogasaufbereitung auf Erdgasqualität ohnehin vorhanden oder geplant ist.

Potentielle CO_2-Nutzungstechnologien in der Emscher-Lippe-Region wurden anhand von sechs Kriterien bewertet: Technology Readiness Level (TRL), Fixierungsdauer, CO_2-Mengenpotential, Produkt- und Verwendungspotential, Anwender in der Region und die Wirtschaftlichkeit. Dabei wurden sechs relevante Technologien identifiziert:

- Die **Methanisierung** ist aufgrund des hohen TRL und einer hohen erwarteten Wirtschaftlichkeit als eine geeignete Technik für die Emscher-Lippe-Region zu nennen. Methanol kann sowohl eine Schlüsselposition bei der Rohstoffwende der chemischen Industrie und im Mobilitätsbereich, als auch bei der Energiewende einnehmen, und birgt demnach das Potential, zentrales Molekül der Zukunft zu werden.

- Die **Synthese von Basischemikalien** ermöglicht eine CO_2-basierte Produktion von Methanol und bietet somit großes Potential für die Etablierung einer zirkulären Wertschöpfungskette. Eine wirtschaftliche Umsetzbarkeit wird für viele Produkt- und Anwendungsmöglichkeiten in der Emscher-Lippe-Region erwartet.
- Bei der **Synthese hochwertiger organischer Substanzen** ist die Fixierungsdauer abhängig von der anschließenden Verwendung der Produkte. Durch die Umsetzung von Kohlendioxid mit Epoxiden wie Ethylen- oder Propylenoxid können cyclische Carbonate hergestellt werden, die u.a. als Lösungsmittel oder Syntheserohstoff für verschiedene Polymere in der chemischen Industrie verwendet werden. Das Mengenpotential ist zwar gering, die Anwendung in der Region ist aber als erfolgsversprechend anzusehen.
- Die Versorgung von **Gewächshäusern** mit Kohlendioxid als Pflanzendünger stellt eine weitere Möglichkeit zur Einsparung von Erdgas und Nutzung von CO_2 dar, ist aber in der Emscher-Lippe-Region nur bei Implementierung großer zusammenhängender Gewächshausflächen möglich, unter Nutzung von heutigen Brachflächen. Das Mengenpotential ist eher gering.
- Ähnlich wie bei der Kultivierung von Mikroalgen ist für eine erfolgreiche Umsetzung der **biologischen Methanisierung** noch Entwicklungsarbeit notwendig. Durch die theoretische Anwendung in jeder Biogasanlage in der Emscher-Lippe-Region ist das Potential für Anwender jedoch hoch, allerdings sind die Umsetzungsmengen von Kohlendioxid auch hier insgesamt gering.
- Auch bei der Etablierung der „**weißen Biotechnologie**“ ist noch Entwicklungsarbeit zu leisten, wobei einfache Fermentationsanlagen fakultativ in Anlagennähe betrieben werden könnten. Diese Technologie birgt hohes Potential, allerdings sind die Umsetzungsmengen von Kohlendioxid insgesamt gering.

Anhand dieser Erkenntnisse konnten konkrete Projektskizzen entwickelt werden:

Drehscheibe Methanol: Implementierung einer CO_2 basierten Methanolsynthese unter Verwendung von regenerativ hergestelltem Wasserstoff.

CO_2 als Kältemittel - Substitution von Halogenkohlenwasserstoffen: Mit der Verwendung von CO_2 als Kältemittel wird zum einen CO_2 in einem geschlossenen Kreislauf geführt. Zum anderen kann die Verwendung von Halogenkohlenwasserstoffen reduziert werden.

Bereitstellung von regenerativ erzeugtem Synthesegas: Eine Darstellung von Synthesegas durch die umgekehrte Wassergas-Shift Reaktion aus Kohlendioxid und Wasserstoff.

Stromspeicherung durch flexible Lichtbogentechnologie: Überschüssige Erneuerbare Energie wird verwendet, um einen Lichtbogen zu erzeugen, durch welchen Methan, beispielsweise aus Biogas, zu Wasserstoff und Acetylen umgesetzt wird.

Carbon Capture am Kraftwerk Datteln 4: Der Neubau des Steinkohle-Kraftwerks Datteln 4 bietet die Möglichkeit, bereits in der Konstruktionsphase eine Abscheidung des Kohlendioxids aus den Abgasen vorzusehen und damit Emissionen von schätzungsweise 2,9 Mio. t/a für eine zirkuläre Wertschöpfung umzuleiten.

Methan- oder Methanolherstellung i. V. mit Kraftwerk Datteln 4 und Überschussstrom: Mittelfristig Nutzung von regionalen Stromüberschüssen und CO_2 aus der Kohleverstromung in Datteln für die Herstellung von Methan oder Methanol. Im Ergebnis Substitution fossiler Rohstoffe durch die weitere Verwendung des Produkts (Erdgasnetz, Treibstoff, Chemikalien)

Methan- oder Methanolherstellung i. V. mit Biogasanlage Dorsten: Kurz- bis mittelfristige Nutzung von regionalen Stromüberschüssen und CO_2 aus der Biogasaufbereitung in Dorsten für die Herstellung von Methan oder Methanol. Im Ergebnis Substitution fossiler Rohstoffe durch die weitere Verwendung des Produkts (Erdgasnetz, Treibstoff, Basischemikalien)

Die Ergebnisse der Studie wurden im Rahmen von Experteninterviews mit Akteuren aus der Emscher-Lippe-Region, auch hinsichtlich einer möglichen Umsetzung der entwickelten Projektskizzen, diskutiert. Aus den Ergebnissen der Studie und den zusätzlichen Erkenntnissen aus den Interviews lassen sich die folgenden Schlüsse ziehen:

Eine Abtrennung und Umsetzung von CO_2 zu Methan ist in der Theorie ein vielversprechendes Verfahren, welches aus heutiger Perspektive allerdings noch wenig erfolgversprechend ist, da dieses einen extrem energieintensiven Prozess darstellt. In diesem Bereich sind noch weitere Grundlagenforschungen notwendig, um das Verfahren effizient gestalten zu können.

Dreh- und Angelpunkt für die stoffliche Nutzung von CO_2 ist die Bereitstellung von sehr preiswerter regenerativer Energie, sodass die Verfahren mit den Weltmarktpreisen für einerseits Rohstoffe, aber auch Produkte konkurrieren können. Das Zusammenspiel der Investitionskosten für die Anlagen und die fakultative Betriebszeit, bedingt durch den Einsatz von Überschussenergie der regenativen Energie, werden hier eine entscheidende Rolle spielen.

Eine Speicherung der Überschussenergie aus den regenerativen Energiequellen ist für eine erfolgreiche Energiewende zwingend erforderlich und ist daher auch für die Emscher-Lippe-Region von Bedeutung. Die direkte Speicherung in H_2 ist hier zu nennen, wobei das Gas in Erdgasspeichern aufdotiert werden könnte. Die Entwicklung fakultativer Verfahren, welche ein flexibles An- und Ausschalten der Anlagen abhängig der Energiesituation ermöglichen, ist weiter voranzutreiben. Dazu gehören Verfahren der „Weißen Biotechnologie“ zur Produktion von Feinchemikalien, wie auch Anlagen mit Lichtbogen-technologie. Bei beiden Verfahren kommt vor allem Synthesegas zum Einsatz als Grundlage zur Umsetzung.

Eine Pilotanlage, welche einen kohlenstoffreichen Strom aus einem Abgas in Grundchemikalien umwandelt, wäre in der Emscher-Lippe-Region gut denkbar. An diesem Standort befinden sich alle wesentlichen CO_2-Emittenten wie Gas- und Kohlekraftwerke, die Stahl- und Chemieindustrie mit etablierten Crackern und Herstellungsverfahren von Synthesegas und es werden biotechnologische Verfahren vorangetrieben. Regenerative H_2-Ströme könnten vor Ort produziert werden, alle Teilnehmer der Wertschöpfungskette sind in der Emscher-Lippe-Region vor Ort. In Kooperationen mit den Hochschulen und Instituten könnten hier richtungsweisende Technologien etabliert werden, welche über die Grenzen von Deutschland hinaus exportiert werden könnten. Im Hinblick auf die Wettbewerbsfähigkeit ist eine solche Anlage nach aktuellem Entwicklungsstand sowie aufgrund der weltpolitischen Situation und der Rohstofflage in absehbarer Zeit nur mit Unterstützung der Politik umsetzbar. Falls jedoch die Forschung und Entwicklung dieser Technologien in Deutschland vorangetrieben werden soll, stellt die Emscher-Lippe-Region die beste Alternative dar.

8 Literaturverzeichnis

1. **Mulhall, Douglas und Braungart, Michael.** Transforming the Psychology of Emissions. *Sustain1.* s.l. : IBTauris, 2016.

2. IASS Potsdam - CO2 inside. [Online] [Zitat vom: 29. 09 2016.]

3. **WIN Emscher Lippe.** *Integriertes Handlungskonzept für die Emscher-Lippe Region: Dachkonzept für den Umbau 21.* 2015.

4. **Lacy, Peter, Rutqvist, Jakob und Buddemeier, Philipp.** *Wertschöpfung statt Verschwendung: Die Zukunft gehört der Kreislaufwirtschaft.* s.l. : Redline Verlag, 2015.

5. European Commission Press Release Database. [Online] 2015. [Zitat vom: 20. 9 2016.] http://europa.eu/rapid/press-release_IP-15-6203_en.htm.

6. IASS Potsdam. [Online] [Zitat vom: 28. 09 2016.] http://www.iass-potsdam.de/de/content/co2-vom-abfall-zum-rohstoff.

7. *Vom Abfall zum Rohstoff - Kann CO2 in Zukunft Erdöl ersetzen?* s.l. : BMBF, 2015.

8. BMBF - Chemie und CO2. [Online] [Zitat vom: 28. 09 2016.] www.chemieundco2.de.

9. BMBF. [Online] [Zitat vom: 28. 09 2016.] https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung.

10. Fraunhofer UMSICHT. [Online] [Zitat vom: 28. 09 2016.] http://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/2016/carbon2chem.html .

11. SETIS. [Online] [Zitat vom: 28. 09 2016.] https://setis.ec.europa.eu/publications/setis-magazine/carbon-capture-utilisation-and-storage.

12. SCOT. [Online] [Zitat vom: 28. 09 2016.] www.scotproject.org.

13. Carbon Dioxide Utilisation Network. [Online] [Zitat vom: 28. 09 2016.] www.co2chem.co.uk.

14. RCN-CCUS. [Online] [Zitat vom: 28. 09 2016.] http://www.aiche.org/ccusnetwork.

15. Covestro. [Online] [Zitat vom: 28. 09 2016.] http://news.covestro.com/news.nsf/id/AAZC76-Premiere-fuer-neuen-Rohstoff.

16. **Naims, Henriette, et al., et al.** *CO2-Recycling - Option für Politik und Gesellschaft.* s.l. : IASS Potsdam, 2015.

17. Strategieplattform Power to Gas. [Online] [Zitat vom: 28. 09 2016.] Strategieplattform.

18. Viessmann. [Online] [Zitat vom: 28. 09 2016.] http://www.viessmann.de/de/presse/aktuelles/Power-to-Gas.html.

19. **Fischedick, Manfred, Görner, Klaus und Thomeczek, Margit.** *CO2: Abtrennung, Speicherung, Nutzung - Ganzheitliche Bewertung im Bereich vin Energiewirtshaft und Industrie.* s.l. : Springer, 2015.

20. **Topham, Susan, et al., et al.** Carbon Dioxide. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.* 2014.

21. **Kruse, Daniela, Kiep, Katina und Schäffner, Benjamin.** CO2-Abtrennung und -Nutzung. [Buchverf.] Manfred Fischedick, Klaus Görner und Margit Thomeczek. *CO2: Abtrennung, Speicherung, Nutzung.* s.l. : Springer, 2015.

22. **Kuckshinrichs, Wilhelm, et al., et al.** *Weltweite Innovationen bei der Entwicklung von CCS-Technologien und Möglichkeiten der Nutzung und des Recyclings von CO2.* 2010.

23. EnergieAgentur NRW. [Online] [Zitat vom: 28. 09 2016.] www.brennstoffzelle-nrw.de.

24. [Online] https://www.eex.com/de/marktdaten/umweltprodukte/auktionsmarkt/european-emission-allowances-auction#!/2016/12/16.

25. *Ein nachhaltiges Konzept zur Bereitstellung von reinem CO2 als C-Quelle für Solarfuels-Synergien zwischen Biokohle und Biogas.* **Liebeck, Miriam und Vogel, Herbert G.** s.l. : Chem. Ing. Tech., 2013, Bd. 85.

26. *Carbon Capture and Utilization (CCU) - Verfahrenswege und deren Bedeutung.* **Lehner, Markus, et al., et al.** s.l. : BHM, 2012, Berg-und Hüttenmännische Monatshefte, Bd. 157, S. 63-69.

27. *Evaluation of strategies of the subsequent use of CO2.* **Schaefer, Marc, behrendt, Frank und Hammer, Thomas.** s.l. : Front. Chem. Sci. Eng., 2010, Front.Chem.Eng. , Bd. 4, S. 172-183.

28. *Re-energizing CO2 to fuels with the sun: Issues of efficiency, scale, and economics.* **Stechel, Ellen B. und Miller, James E.** s.l. : jcou, 2013, Bd. 1.

29. *Carbon Dioxide Hydrogenation To Form Methanol via a Reverse-Water-Gas Shift Reaction.* **Joo, Oh-Shim, et al., et al.** s.l. : Ind. Eng. Chem. Res., 1999, Bd. 38.

30. *Pilot Scale Demonstration of a 100-kW Solar Thermochemical Plant for the Thermal Dissociation of ZnO.* **Villasmil, Willy, et al., et al.** s.l. : Journal of Solar Energy Engineering, 2014, Bd. 136.

31. *Comparative analysis of environmental impact of S2P (Sunshone to Petrol) system for transportation fuel production.* **Kim, Jiyong, et al., et al.** s.l. : apenergy, 2013, Bd. 111.

32. Strategieplattform Power to Gas. [Online] [Zitat vom: 06. 10 2016.] http://www.powertogas.info/power-to-gas/pilotprojekte-im-ueberblick/sunfire/.

33. *Recent development in catalystic technologies for methanol synthesis from renewable sources: A critical review.* **Ali, Khozema Ahmed, Abdullah, Ahmad Zuhairi und Mohamed, Abdul Rahman.** s.l. : RSER, 2015, Bd. 44.

34. **Fiedle, Eckhard, et al., et al.** Methanol. *Ullmann´s Encyclopedia of Industrial Chemistry.* s.l. : Wiley-VCH, 2012.

35. www.mitsuichem.com/release/2008/pdf/080825e.pdf. *ww.mitsuichem.com.* [Online] 25. August 2008. [Zitat vom: 24. 8 2016.]

36. Carbon Recycling. [Online] [Zitat vom: 24. 08 2016.] http://carbonrecycling.is/projects-1/2016/2/14/worlds-largest-co2-methanol-plant.

37. Ingenieur.de. [Online] [Zitat vom: 06. 10 2016.] http://www.ingenieur.de/Fachbereiche/Umwelt-Recyclingtechnik/Modellanlage-in-Luenen-Aus-Rauchgas-Methanol-gewonnen.

38. **Schaub, Dr. Thomas und Paciello, Dr. Rocco A.** Ein Verfahren zur Herstellung von Ameisensäure durch CO2-Hydrierung: Thermodynamik und die Rolle von CO. *Angewandte Chemie.* 2011.

39. **Nakagawa, Yoshinao, Hondam, Maayoshi und Tomishige, Keiichi.** Direct Synthesis of Organic Carbonates from CO2 and Alcohols Using Heterogeneous Oxide Catalysts. [Buchverf.] Siglinda Perathoner Gabriele Centi. *Green Carbon Dioxide: Advances in CO2 Utilization.* 2014.

40. *Environmental Assessment of Dimethyl Carbonate Production: Comparison of a Novel Electrosynthesis Route Utilizing CO2 with a Commercial Oxidative Carbonylation Process.* **Garcia-Herrero, Isabel, et al., et al.** s.l. : ACS Sustainable Chem. Eng., 2016, Bd. 4.

41. *Review of Dimethyl Carbonate (DMC) Manufacture and Its Characteristics as a Fuel Additive.* **Pacheco, Michael A. und Marshall, Christopher L.** s.l. : Energy & Fuels, 1997, energyfuels, Bd. 11.

42. *Review for the Direct Synthesis of Dimethyl Carbonate.* **Santos, Bruno A.V., et al., et al.** 5, s.l. : ChemBioEng Rev, 2014, ChemBioEng Rev, Bd. 1.

43. *Method of synthesizing dimethyl carbonate by use of reaction of urea and methanol.* 3. September 2013. CN104418732.

44. *Device and method for co-production of ammonia and dimethyl carbonate by utilizing urea and methanol. CN105111078* 16. September 2015.

45. *Techno-economic evaluation of different CO2-based processes for dimethyl carbonate production.* **Kongpanna, Pichayapan, Pavarajarn, Varong und Gani, Rafigul.** s.l. : j.cherd, 2015, Bd. 93.

46. *Recent advances in carbon dioxide based copolymers.* **Qin, Yusheng, et al., et al.** s.l. : jcou, 2015, Bd. 11.

47. **Meessen, Jozef H.** Urea. *Ullmann´s Encylopedia of Industrial Chemistry.* 2012.

48. **Zevenhoven, Ron und Fagerlund, Johan.** Fixation of Carbon Dioxide into INorganic Carbonates: The Natural and Artificial "Weathering of Silicates". [Buchverf.] Michele Aresta. *Carbon Dioxide as Chemical Feedstock.* s.l. : Wiley-VCH, 2010.

49. *CO2 mineral sequestration: developments toward large-scale application.* **Zevenhoven, Ron, Fagerlund, Johan und Songok, Joel Kibiwot.** s.l. : Greenhouse Gas Sci Technol., 2010.

50. *Post-Processing pathways in carbon capture and storage by mineral carbonation (CCSM) towards the introduction of carbon nuetral materials.* **Sanna, Aimaro, Hall, Matthew R. und Maroto-Valera, Mercedes.** s.l. : Energy Environ. Sci., 2012, Bd. 5.

51. *Carbon Dioxide Mineral Carbonation Trough pH-swing Process: A Review.* **Azdarpour, Amin, et al., et al.** s.l. : Energy Procedia, 2014, egypro, Bd. 61.

52. **BMBF-FONA.** *Kombinatorische elektrokatalytische CO2-Reduktion.*

53. **Phys.org.** [Online] März 2011. https://phys.org/news/2011-03-faux-trees-co2-o2.html.

54. **Parsons Brinckerhoff.** *Accelerating the Uptake of CSS: Industrial use of Captured Carbon Dioxide.* 2011.

55. **Hüttermann, Aloys.** *Feuerlöschen oder Klimakiller? Kohlendioxid - Facetten eines Moleküls.* s.l. : DECHEMA-Publikationen , 2010.

56. *Application of a novel calcium looping process for production of heat and carbon dioxide enrichment of greenhouses.* **Ramezani, Mohammad, et al., et al.** s.l. : enconman, 2015, j.enconman, S. 129-138.

57. *Optimal control strategies for carbon dioxide enrichment in greenhouse tomato crops-Part 1: Using pure carbon dioxide.* **Chalabi, Z. S., et al., et al.** s.l. : bioe, 2002, Biosystems Engineering, S. 323-332.

58. *Treibhausgase aus der Pipeline.* s.l. : Linde Technology, 2006. S. 40-44.

59. *Start of a CO2 Hub in Rotterdam: Connecting CCS and CCU.* **Ros, Menno, et al., et al.** s.l. : egypro, 2014, Energy Procedia, S. 2691-2701.

60. **Hennenberg, Klaus.** *Aquatic Biomass: Sustainable Bioenergy from Algae? (issue paper) .* 2009.

61. **Arnold, Karin.** CCS und Biomasse. [Buchverf.] Manfred Fischedick, Klaus Görner und Margit Thomeczek. *CO2: Abtrennung, Speicherung, Nutzung .* s.l. : Springer, 2015.

62. **Wallus, Sarah und Schwendig, Frank.** Biologische CO2-Nutzung. [Buchverf.] Manfred Fischedick, Klaus Görner und Margit Thomeczek. *CO2: Abtrennung, Speicherung, Nutzung .* s.l. : Springer, 2015.

63. *Limits to productivity of the alga Pleurochrysis carterae (Haptophyta) grown in outdoor raceway ponds.* **Moheimani, Navid Reza und Borowitzka, Michael A.** s.l. : Biotechnol. Bioeng., 2007, Bd. 96.

64. **Pulz, Otto.** *Biotechnologische Energieumwandlung - Energieträger der Zukunft.* s.l. : acatech Diskutiert, 2009.

65. Wirtschaftswoche. [Online] 15. 07 2013. [Zitat vom: 08. 09 2016.] http://www.wiwo.de/technologie/green/tech/mobilitaet-algendiesel-billiger-als-sprit-aus-erdoel/13546520.html .

66. Diamond Aircraft. [Online] [Zitat vom: 08. 09 2016.] http://www.diamondaircraft.com/wp-content/uploads/2015/11/IW_ILA_Biofuel_eng.pdf.

67. *Biotechnology of algae biomass production: a review of systems for outdoor mass culture.* **Chaumont, Daniel.** s.l. : J. Appl. Phycol., 1993, Bd. 5.

68. Algomed. [Online] [Zitat vom: 08. 09 2016.] http://www.algomed.de/.

69. Subitec. [Online] [Zitat vom: 08. 09 2016.] https://subitec.com/de.

70. Strategic Science Consult Hamburg . [Online] [Zitat vom: 08. 09 2016.] https://www.ssc-hamburg.de/.

71. Hansewerk. [Online] [Zitat vom: 08. 09 2016.] https://www.hansewerk.com/cps/rde/xchg/hansewerk/hs.xsl/137.htm.

72. Phytolutions. [Online] [Zitat vom: 08. 09 2016.] http://www.phytolutions.de.

73. RWE. [Online] [Zitat vom: 08. 09 2016.] http://www.rwe.de/web/cms/mediablob/de/334518/data/334512/1/magazin/2009/ausgabe-3/umweltschutz/so-schuetzt-rwe-die-umwelt/Algen-Projekt.pdf.

74. **Algaeparc.** [Online] [Zitat vom: 08. 09 2016.] http://www.algaeparc.com/.

75. *Biotechnologische Energieumwandlung in Deutschland - Stand, Kontext, Perspektiven .* s.l. : acatech Position, 2012.

76. Exxon Mobile. [Online] [Zitat vom: 09. 08 2016.] https://www.exxonmoible.co.uk/UK-English/files/Biofuel_A4_UK.pdf.

77. Biotechnologie. [Online] [Zitat vom: 2016. 09 216.] https://www.biotechnologie.de/BIO/Navigation/DE/root,did=149078.html.

78. Solixalgredients. [Online] [Zitat vom: 09. 09 2016.] http://solixalgredients.com/products/.

79. BASF. [Online] [Zitat vom: 09. 09 2016.] http://report.basf.com/2010/de/konzernlagebericht/diebasf-gruppe/forschungundentwicklung/wachstumscluster.html.

80. RWE. [Online] [Zitat vom: 12. 09 2016.] http://www.rwe.com/web/cms/de/971922/rwe/innovation/kraftwerke/fossil-gefeuerte-kraftwerke/biotechnologische-verwertung-von-co2/.

81. Forschungszentrum Jülich. [Online] [Zitat vom: 12. 09 2016.] http://www.fz-juelich.de/ibg/ibg-2/DE/Projekte/_bund/AUFWIND/_node.html .

82. RWE. [Online] [Zitat vom: 12. 09 2016.] http://www.rwe.com/web/cms/de/183510/rwe/innovation/kraftwerke/fossil-gefeuerte-kraftwerke/innovationszentrum-kohle/.

83. *Vergleich der biologischen und katalytischen Methanisierung für den Einsatz bei PtG-Konzepten.* **Mörs, Friedmann, Götz, Manuel und Graf, Frank.** s.l. : Gas+Energie, 2015.

84. **WIN Emscher Lippe.** [Online] 2016. www.emscher-lippe.de.

85. **Chemiepark Marl.** [Online] 2016. http://www.chemiepark-marl.de/cms/cpm/de/Pages/default.aspx .

86. **BP Gelsenkirchen.** [Online] 2016. http://www.bp.com/de_de/germany/ueber-bp/aktivitaeten-in-deutschland/raffinerie-gelsenkirchen.html .

87. **Chemsite.** [Online] 2016. http://www.chemsite.de/chemsite/chemieparks-industriestandorte/castrop-rauxel/index.php .

88. **Rütgers.** *Informationen für unsere Nachbarn am Rütgers-Produktionsstandort Castrop-Rauxel.* 2011.

89. **Industriepark Dorsten-Marl.** [Online] 2016. http://www.industriepark-dorsten-marl.de/.

90. **STEAG.** [Online] 2016. https://www.steag.com/2913.html.

91. **BMUB.** [Online] 2014. http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/kurzinfo/ .

92. **MIK NRW.** [Online] 2013. https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_bes_text?anw_nr=2&gld_nr=7&ugl_nr=7129&bes_id=22784&aufgehoben=N&menu=1&sg=0.

93. **BMWi.** [Online] 2016. - https://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Strommarkt-der-Zukunft/moderne-kraftwerkstechnologien,did=557894.html .

94. **Uniper.** [Online] 2016. https://www.uniper.energy/de/unser-geschaeft/unsere-standorte/datteln-4.html.

95. **Evonik.** [Online] 2016. http://corporate.evonik.de/de/unternehmen/standorte/europa/deutschland/marl/Pages/news-details.aspx?newsid=59405.

96. **Tagesspiegel.** *Klimawandel: Weltweiter CO2-Ausstoß sinkt.* [Online] 2016. http://www.tagesspiegel.de/politik/klimawandel-weltweiter-co2-ausstoss-sinkt/13330602.html.

97. **Umweltbundesamt.** *UBA-Emissionsdaten für 2015 zeigen Notwendigkeit für konsequente Umsetzung des Aktionsprogramms Klimaschutz 2020.* [Online] 2016. https://www.umweltbundesamt.de/presse/presseinformationen/uba-emissionsdaten-fuer-2015-zeigen-notwendigkeit .

98. **LANUV.** *Treibhausgas-emissionsinventar.* [Online] 2015. https://www.lanuv.nrw.de/klima/klimaschutz/treibhausgas-emissionsinventar/ .

99. **Emissionskataster Luft NRW .** [Online] 2012. http://www.ekl.nrw.de/ekat/ .

100. **IWR.** [Online] 2016. http://www.iwr.de/news.php?id=30820.

101. **IPCC.** *Carbon Dioxide Capture and Storage .* 2005.

102. **Sing, D., et al., et al.** Techno-economic study of CO2 capture from an existing coal-fired power plant: MEA scrubbing vs. O2/CO2 recycle combustion. *energy conversion and management.* 2003.

103. **Schembra, Mario und Schulze, Joachim.** Schatzung der Investitionskosten bei der Prozessentwicklung. *Chem.-Ing.-Tech.* 1993.

104. **VCI.** *Chemiewirtschaft in Zahlen 2015.* 2015.

105. [Online] http://www.uxc.com/smr/Library%5CAlternative%20Uses/2003%20-%20Hydrogen%20from%20Steam-Methane%20Reforming%20with%20CO2%20Capture.pdf.

106. **Kausch, Peter, et al., et al.** *Rohstoffwirtschaft und gesellschaftliche Entwicklung - Die nächsten 50 Jahre.* s.l. : Springer Spektrum, 2016.

107. **Energieagentur NRW.** *Wasserstoff - Schlüssel zur Energiewende: Beispiele aus Nordrhein-Westfalen von der Herstellung bis zur Nutzung.* Düsseldorf : s.n., 2013.

108. **H2 Netzwerk Ruhr.** [Online] 2016. http://www.h2-netzwerk-ruhr.de/Wissenschaft-Forschung.12.0.html.

109. **Mainzer Stadtwerke.** [Online] 2016. http://www.energiepark-mainz.de/artikel-detailseite/article/wasserstoff-vorzeigeprojekt-laeuft-erfolgreich/.

110. **Deutschland, Bundesregierung.** *Klimaschutzplan 2050.* 2016.

111. **Geden, Oliver und Schäfer, Stefan.** *Negative Emissionen als klimapolitische Herausforderung.* s.l. : Stiftung Wissenschaft und Politik, 2016.

112. **Umweltbundesamt.** *Integration von Power-to-Gas / Liquid in den laufenden Transformationsprozess.* 2016.

113. —. *Globale Landflächen und Biomasse.*

114. Climeworks. [Online] http://www.climeworks.com/co2-capture-plants.html.

115. **Tian, Peng, et al., et al.** Methanol to Olefins (MTO): From Fundamentals to Commercialization. *ACS Catalysis.* 2015.

116. **environment investigation agency.** *Putting the Freeze on HFC.* 2016.

117. **Markowz, Dr. Georg.** *Strom speichern im industriellen Maßstab.* s.l. : Evonik, 2014.

118. *The Degradation of Thermal Insulation Mineral Fibers.* **Low, Norman M. P.** s.l. : Centre of Building Studies, 1984.

119. **Covestro.** *www.covestro.de.* [Online] [Zitat vom: 01. 09 2016.]

120. Wirtschaftswoche. [Online] 2014. [Zitat vom: 20. 09 2016.] http://www.wiwo.de/technologie/green/biz/power-to-gas-so-koennte-das-verfahren-doch-noch-funktionieren/13549094.html.

121. Bio-based News . [Online] 2015. [Zitat vom: 20. 09 2016.] http://news.bio-based.eu/nachhaltige-kraftstoffe-chemikalien-und-polymere-aus-sonne-und-co2/.

122. *A review harvesting clean fuels from enzymatic CO2 reduction.* **Sultana, Sabiha, et al., et al.** s.l. : RSC adv, 2016, RSC Adv., S. 44170-44194.

123. *Conversion of CO2 into biomass by microalgae: how realistic a contribution may it be to significant CO2 removal?* **Fernández, F. Gabriel Acién und González-López, C. V.** 2012, Appl. Microbiol. Biotechnol., Bd. 96.

124. *Degradation of Glass Mineral Wool INsulation after 25 Years in Masonry Cavity Walls.* **F.Tittarelli, et al., et al.** s.l. : IJCEBS, 2013, Bd. 1.

125. **Peter Styring, Daan Jansen.** *Carbon Capture and Utilisation in the green economy - Using CO2 to manufacture fuel, chemicals and materials.* s.l. : The Centre for Low Carbon Futures, 2011.

126. Ruhrnachrichten.

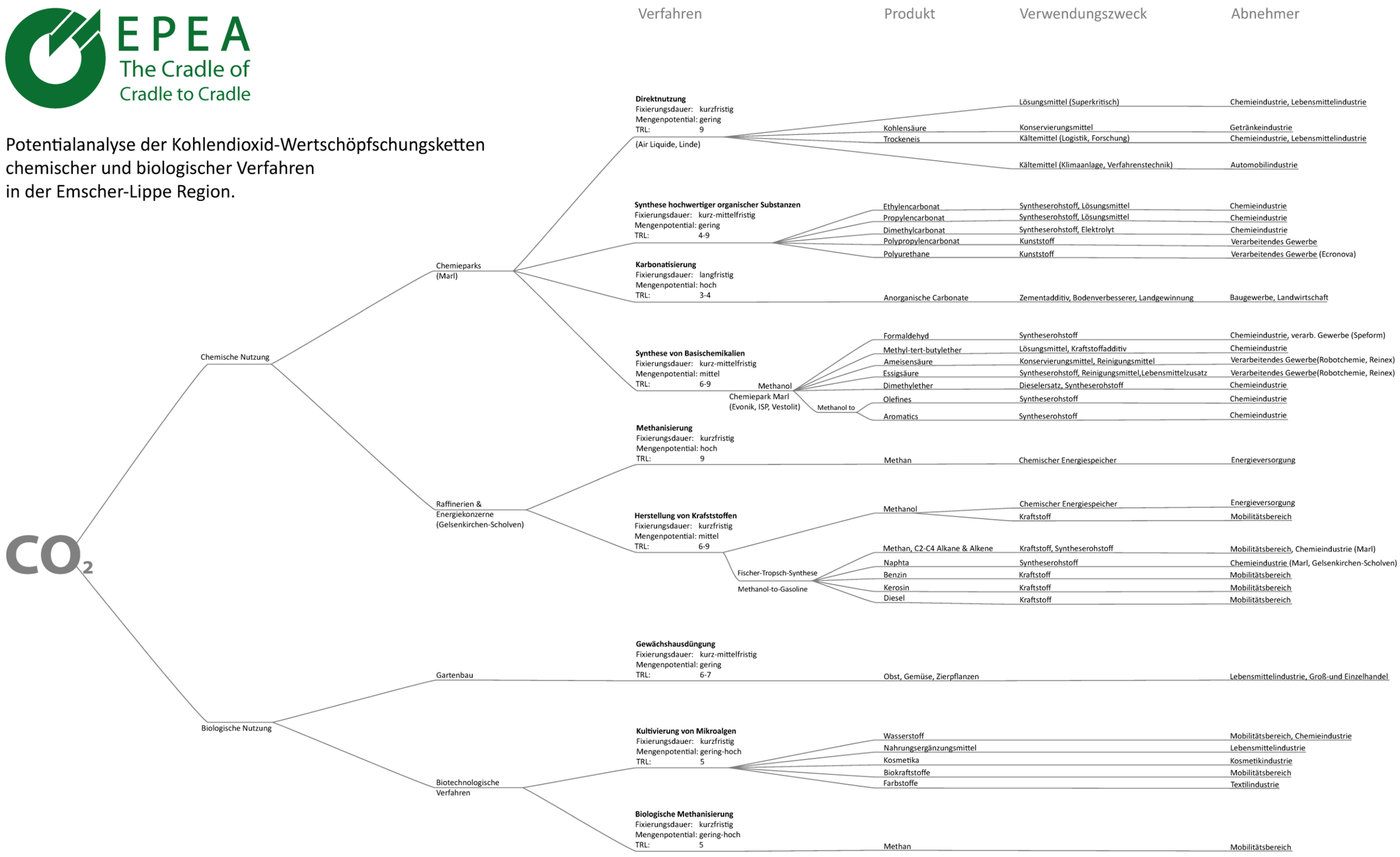
127. **Ruhrnachrichten.** [Online] http://www.ruhrnachrichten.de/storage/pic/repl-bauer/xmlios/zbm-import/aus-der-region/2927768.

128. **Emscher-Lippe.** [Online] http://www.emscher-lippe.de/chemsite/chemieparks-standorte/gelsenkirchen-scholven/.

129. **Ruhrnachrichten.** [Online] https://www.ruhrnachrichten.de/staedte/castrop/Daemmstoffproduzent-siedelt-sich-auf-tarlog-area-an;art934,1810996.

130. **DerWesten.** [Online] http://www.derwesten.de/incoming/industriepark-flaechen-in-dorsten-marl-sind-begehrt-id7265903.html.

9 Anhang

EPEA The Cradle of Cradle to Cradle

Potentialanalyse der Kohlendioxid-Wertschöpfschungsketten chemischer und biologischer Verfahren in der Emscher-Lippe Region.