



UMWELT
TECHNIK
BW

Landesagentur für
Umweltechnik und
Ressourceneffizienz



MACHBARKEITSSTUDIE IM
THEMENFELD CARBON ECONOMY

**ABGAS-RAFFINERIE MIT BIOLOGISCHEN UND
HYBRIDEN TECHNOLOGIEN MIT SCHWERPUNKT AUF
CO₂-RECYCLING AUS CO₂-PUNKTQUELLEN**

STUDIE

Machbarkeitsstudie im Themenfeld Carbon Economy: Modulare Abgas-Raffinerie mit biologischen und hybriden Technologien mit Schwerpunkt auf CO₂-Recycling aus CO₂-Punktquellen

ERSTELLT VON

Institut für Bioverfahrenstechnik

Universität Stuttgart

Allmandring 31

70569 Stuttgart

<https://www.ibvt.uni-stuttgart.de/>

Fraunhofer-Institut für Grenzflächen-
und Bioverfahrenstechnik IGB

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

<https://www.igb.fraunhofer.de/>

Umwelttechnik BW GmbH

Landesagentur für Umwelttechnik und

Ressourceneffizienz Baden-Württemberg

Friedrichstraße 45

70174 Stuttgart

T. +49 711 252841-10

F. +49 711 252841-49

info@umwelttechnik-bw.de

www.umwelttechnik-bw.de

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Ralf Takors (IBVT)

Moritz Wild (IBVT)

Yannic Mast (IBVT)

Saadet Baltaci (IBVT)

Dr.-Ing. Ursula Schließmann (IGB)

Dr.-Ing. Anette Zimmerman (UTBW)

Jürgen Schmidtke (UTBW)

Iris Beuter (UTBW)

REDAKTION

Umwelttechnik BW GmbH

GESTALTUNG & SATZ

STUDIO FÜR KOMMUNIKATION tat.sache

www.studiotatsache.de

Alle Rechte vorbehalten.

Nachdruck und Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Genehmigung der Herausgeber.

INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1. Ziel der Machbarkeitsstudie	1
2. CO₂-Recycling – Chancen und Herausforderungen	2
2.1 Chancen	2
2.1.1 Reduktion von CO ₂ -Emissionen	2
2.1.2 Ressourcenschonung und Rohstoff	2
2.1.3 Speichermöglichkeit für erneuerbare Energien	3
2.1.4 Etablierung eines industriellen Kohlenstoffkreislaufs	3
2.2 Herausforderungen	3
2.2.1 Bedarf an erneuerbarer Energie	3
2.2.2 Katalysatoren	3
2.2.3 Marktpotenziale und Infrastruktur	3
2.2.4 Bilanzierung und rechtliche/politische Rahmenbedingungen	4
2.2.5 Beitrag zum Klimaschutz	5
3. Motivation für biologische/hybride CCU-Verfahren	6
3.1 Definition und Kurzbeschreibung biologischer CCU-Technologien	6
3.2 Aktueller Stand zu Forschung, Technik und Patentlage biologischer CCU-Technologien	7
3.2.1 Gasfermentation (IBVT)	7
3.2.2 Algen	14
3.2.3 Elektrobiosynthese	15
3.3 Vorteile biologischer CCU-Technologien	15
3.3.1 Gegenüber der natürlichen Fotosynthese	15
3.3.2 Gegenüber chemisch-physikalischen Technologien	15
3.4 Herausforderungen	16
3.4.1 Technologische Herausforderungen	16
3.4.2 „Organisatorische“ Herausforderungen	16
3.5 Bedeutung des biologischen CO ₂ -Recyclings auf Landesebene Baden-Württemberg	16

4. Branchenanalyse und Konzeptentwicklung	17
4.1 Konzeptentwicklung allgemein	17
4.1.1 Bewertungskriterien	17
4.1.2 Möglichkeiten zur Sauerstoffentfernung	18
4.2 Firmenliste/Branchen (IBVT)	19
4.2.1 Zementindustrie	26
4.2.1.1 Motivation zur Emissionsminderung	26
4.2.1.2 Möglichkeiten der Einsparung	26
4.2.1.3 Bestehende Forschungsvorhaben zum Klimaschutz	26
4.2.2 Thermische Abfallbehandlung	27
4.2.2.1 Motivation zur Emissionsminderung	27
4.2.2.2 Möglichkeiten der Einsparung	27
4.2.2.3 Bestehende Forschungsvorhaben zum Klimaschutz	28
4.2.3 Automobilindustrie	28
4.2.3.1 Motivation zur Emissionsminderung	28
4.2.3.2 Möglichkeiten der Einsparung	28
4.2.3.3 Bestehende Forschungsvorhaben zum Klimaschutz	28
4.2.4 Glasindustrie	29
4.2.4.1 Motivation zur Emissionsminderung	29
4.2.4.2 Möglichkeiten der Einsparung	29
4.2.4.3 Bestehende Forschungsvorhaben zum Klimaschutz	29
4.3 Wirtschaftlich-technische Rahmenbedingungen	30
4.3.1 Gasfermentation (IBVT)	30
4.3.2 Algen	34
5. Fazit und Ausblick	37
5.1 Fazit	37
5.2 Ausblick	38
5.3 Förderprogramme	38
5.3.1 Deutschland	38
5.3.1.1 Umweltinnovationsprogramm	38
5.3.1.2 Dekarbonisierung in der Industrie	39
5.3.1.3 Industrielle Bioökonomie	39
5.3.2 Europäische Union (EU)	39
Innovation Fund	39
Literaturverzeichnis	VII

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNG 2.1	CCU im Vergleich zur herkömmlichen Produktion	5
ABBILDUNG 3.1	Algeninhaltsstoffe und Applikationsmöglichkeiten	14
ABBILDUNG 3.2	Prinzip der Bioelektrokatalyse am Beispiel der Nutzung von CO ₂	15
ABBILDUNG 4.1	Vergleichende Darstellung verschiedener Acetat- und Ethanol Ausbeuten für einen Anwendungsfall von 10.000 Jahrestonnen CO ₂ bei unterschiedlichen Stromkosten inkl. 30 % Zuschlag (durchgezogen) sowie 70 % Zuschlag (gestrichelt) im Jahr 2021	32
ABBILDUNG 4.2	Kostenrechnung für Fall c) mit verschiedenen 2,3-Butandiol-Ausbeuten sowie Stromkosten inkl. 70 % Zuschlag	33
ABBILDUNG 4.3	Verhältnis der Einsparung durch CO ₂ -Zertifikate zu Kosten (inkl. 70 % Zuschlag)	33
ABBILDUNG 4.4	Algeninhaltsstoffe in Abhängigkeit von eingesetztem Algenstamm und den Kultivierungsbedingungen am Beispiel <i>Phaeodactylum tricornutum</i> und fettsäurereicher <i>Chlorella vulgaris</i>	35
ABBILDUNG 5.1	Industrieller vs. pflanzlicher Kohlenstoffkreislauf	37

TABELLENVERZEICHNIS

TABELLE 3.1	Übersicht über Produkte, Mikroorganismen, Patente, Produktivität und Reaktortyp sowie Gasgehalt	9
TABELLE 4.1	Automobilzulieferer in Baden-Württemberg	19
TABELLE 4.2	Kraftwerke in Baden-Württemberg	20
TABELLE 4.3	Zementindustrie in Baden-Württemberg	21
TABELLE 4.4	Zellstoffindustrie in Baden-Württemberg	22
TABELLE 4.5	Glasherstellung in Baden-Württemberg	23
TABELLE 4.6	Hersteller von Baumaterialien in Baden-Württemberg	23
TABELLE 4.7	Metallverarbeitende Industrie in Baden-Württemberg	24
TABELLE 4.8	Chemische Industrie in Baden-Württemberg	25
TABELLE 4.9	Produktausbeuten für verschiedene Gasfermentationen	30
TABELLE 4.10	Break-even Stromkosten für Gasmix a) und b) mit den oben erwähnten Stöchiometrien	31
TABELLE 4.11	Stromkosten für unterschiedliche Biomasse-Produktivitäten in Abhängigkeit verschiedener Stromkostensätze bei einem 24/7-Betrieb. Spannweite von Marktpreisen für Algenbiomassen und Inhaltsstoffe, ausgewählter Preis für die Kalkulation der potenziellen Wertschöpfung	34

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

A

AC	Acetat
AGVO	Allgemeine Gruppenfreistellungsverordnung

B

BD	2,3-Butandiol
BDSAV	Bundesverband Deutscher Sonderabfallverbrennungsanlagen e. V.
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BEV	Battery Electric Vehicle
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BTM	Biotrockenmasse

C

CaO	Calciumoxid
CaCO ₃	Calciumcarbonat
CCU	Carbon Capture and Utilisation
CDU	Christlich Demokratische Union Deutschlands
CCS	Carbon Capture and Storage
CCE	Carbon Cycling Economy
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ -eq	CO ₂ -Äquivalent
CSTR	Continuous Stirred-Tank Reactor
ct	Cent

E

EtOH	Ethanol
EU	Europäische Union
EU ETS	EU Emissions Trading System

G

g	Gramm
---	-------

H

h	Stunde
ha	Hektar
H ₂ O	Wasser
H ₂	Wasserstoff

I

ITAD	Interessensgemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland
------	---

K

KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
kg	Kilogramm
km	Kilometer
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
kmol	Kilomol
kWh	Kilowattstunde

L

L	Liter
---	-------

M

m ³	Kubikmeter
Mio.	Millionen
mL	Milliliter
Mrd.	Milliarden

N

nEHS	nationales Emissionshandelssystem
NH ₃	Ammoniak

O

O ₂	Sauerstoff
----------------	------------

P

POX	Partielle Oxidation
ppm	parts per million
PTA	Terephthalsäure

S

Syngas	Synthesegas
--------	-------------

T

t	Tonne
t/a	Jahrestonnen
TAB	Thermische Abfallbehandlungsanlage
TRL	Technischer Reifegrad (engl. Technology Readiness Level)
TWh	Terawattstunde

V

VAM	Vinylacetatmonomer
VDZ	Verein Deutscher Zementwerke
VKU	Verband kommunaler Unternehmen e. V.

1

ZIEL DER MACHBARKEITSSTUDIE

Das Ziel dieser Machbarkeitsstudie ist die Entwicklung von Konzepten für modulares biologisches und hybrides CO₂-Recycling. Dabei soll das Abgas verschiedener Industriebranchen mit hohem CO₂-Ausstoß betrachtet, geeignete Technologien ausgewählt und ihr Potenzial zur

CO₂-Bindung ermittelt werden. Die Unternehmen sollen für die Potenziale der Technologien sensibilisiert werden. Die Machbarkeitsstudie zeigt einen individuellen Projektansatz und Fördermöglichkeiten für die zukünftige Umsetzung auf.

— 2 —

CO₂-RECYCLING CHANCEN UND HERAUSFORDERUNGEN

2.1 CHANCEN

2.1.1 Reduktion von CO₂-Emissionen

CO₂-Recycling wird in vielen wissenschaftlichen Studien als technischer Weg genannt, CO₂-Emissionen zu reduzieren (Bergins et al., 2016; Hepburn et al., 2019; Kätelhön et al., 2019; Otto et al., 2015; Zhu, 2019). Die Wiederverwendung von CO₂ kann zu einer Verbesserung der Klimabilanz von Produktionsverfahren beitragen, die weiterhin auf Kohlenstoff aus fossilen Quellen basieren bzw. bei denen der fossile Kohlenstoff nicht substituierbar ist (Hüsing et al., 2021). Stoffe hergestellt aus CO₂-Abluft können in Bereichen verwendet werden, deren Dekarbonisierung schwerer zu erreichen ist (Bundesministerium für Bildung und Forschung [BMBF], o. J.; National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, zitiert nach Hepburn et al., 2019) oder stofflich im Kreislauf geführt werden, z. B. in Kunststoffprodukten. Dabei kann bestehende Infrastruktur der Kohlenstoff-Wertschöpfungsketten für Transport und Produktverwendung genutzt werden (Bergins et al., 2016). CO₂-Recycling kann Kohlenstoff und Energie in eine Speicherform für die eingesetzte Energie überführen. CCU wird zudem als vielversprechende Technologie angesehen, um schwer reduzierbare Prozessemissionen, z. B. aus der Zement- oder Stahlindustrie, aber auch bei der Biogaserzeugung zu senken (Ramirez Ramirez et al., 2020). Der Beitrag zum Klimaschutz ist dabei abhängig von der Menge an fixiertem CO₂ und der Dauer der Speicherung in Produkten (T. E. Müller et al., 2015). Über die Höhe der möglichen Einsparung herrscht Uneinigkeit: In verschiedenen Studien wird ein Reduktionspotenzial zwischen 75 % bis hin zu Negativemissionen angegeben (Bennett et al., 2014). Durch die Implementierung von CCU-Technologien an Punktquellen, wie thermischen Abfallverwertungsanlagen, und die anschließende Nutzung des Kohlenstoffs in Produkten, die nach der Nutzungsphase wiederum in einer Anlage mit CO₂-Abscheidung verwertet werden, ist eine langfristige Kreislaufführung und damit Klimaneutralität für solche Prozesse möglich (siehe Kapitel 2.1.4).

Gemäß Ampelli et al. (2015) führt wiederholtes Recycling sogar zu einer höheren Reduktion von CO₂-Emissionen als die Speicherung (Carbon Capture and Storage (CCS)). Der Kreislauf wirkt wie eine C-Senke. Ein Vorteil von CCU gegenüber CCS zur Reduktion von CO₂-Emissionen ist die gesellschaftliche Akzeptanz. Während diese für CCS sehr niedrig ist (acatech, 2018), genießt CCU in der Öffentlichkeit einen positiven Ruf (Naims et al., 2015). Der Einsatz biologischer Stoffwechselleistungen CCU_{BIO} ermöglicht dabei bspw. die direkte Nutzung des Sonnenlichts oder über den Einsatz biologischer Katalysatoren (Enzyme) ein energieeffizientes Recycling.

2.1.2 Ressourcenschonung und Rohstoffsicherung

Der nahe bis mittelfristige Ausstieg aus der Nutzung fossiler, kohlenstoffhaltiger Rohstoffe stellt viele Industriezweige vor große Herausforderungen. Der überwiegende Teil der Rohstoffbasis der chemischen Industrie ist fossilen Ursprungs (Bazzanella & Ausfelder, 2017). CO₂-Recycling zur Produktion von Chemikalien stellt eine Möglichkeit dar, die negativen Folgen der Ressourcenverknappung in der chemischen Industrie abzuschwächen (Sternberg et al., 2017) und die Chemikalienherstellung vom Verbrauch fossiler Ressourcen zu entkoppeln (Kätelhön et al., 2019). Durch die Wiederverwendung von CO₂ als Kohlenstoffquelle kann auf die Nutzung von fossilem Kohlenstoff aus Primärquellen verzichtet werden (Abanades et al., 2017; Bergins et al., 2016; Mac Dowell et al., 2017; Zhu, 2019). Laut Zhu (2019) wird CCU eine wichtige Rolle bei der nachhaltigen, CO₂-armen Erzeugung von Chemikalien und synthetischen Kraftstoffen spielen. Darüber hinaus trägt die Verwendung von CO₂ als Rohstoff zur Unabhängigkeit von Importen bei (Olfe-Kraeutlein et al., 2016). Gemäß Kätelhön et al. (2019) liegt das eigentliche Potenzial von CCU im Ersatz fossiler Grundstoffe durch Produkte aus CO₂.

2.1.3 Speichermöglichkeit für erneuerbare Energien

Grundchemikalien aus CO₂ stellen eine potenzielle Möglichkeit dar, grünen Strom zu speichern, um so die naturgemäße Angebotsfluktuation von erneuerbarer Energie zu glätten (BMBF, o. J.). CCU kann daher als technische Ergänzung für die Speicherung von erneuerbaren Energien genutzt werden (Olfe-Kraeutlein et al., 2016). Der Handel mit erneuerbaren Energien über Produkte aus recyceltem CO₂ kann für dicht besiedelte Länder bzw. Länder mit wenig Potenzialen für erneuerbaren Energien, eine Option sein, den zukünftig steigenden Bedarf an erneuerbarer Energie zu decken (Edenhofer et al., 2011).

2.1.4 Etablierung eines industriellen Kohlenstoffkreislaufs

Ampelli et al. (2015) sehen den Wert von CCU in den neuartigen Verwendungsmöglichkeiten, die dadurch für erneuerbare Energien geschaffen werden. Mithilfe von CCU können erneuerbare Energien in die chemische (Bushuyev et al., 2018) und energetische Wertschöpfungskette integriert werden (Ampelli et al., 2015). Darüber hinaus bietet CCU die Chance, den anthropogenen Kohlenstoffkreislauf zu schließen, indem sämtlicher fossiler Kohlenstoff, der weiterhin in industriellen Prozessen eingesetzt werden wird, laufend wiederverwendet wird. Beispiel hierfür ist die Nutzung von CO₂ als Basis für Kunststoffe und die anschließende thermische Verwertung mit erneuter Umwandlung des dabei entstehenden Kohlenstoffdioxids zu Kunststoffprodukten.

2.2 HERAUSFORDERUNGEN

Eine große Herausforderung des CO₂-Recyclings besteht darin, dass die meisten Technologien einen niedrigen technischen Reifegrad (engl. Technical Readiness Level, TRL) besitzen (Roh et al., 2020). Weitere Schwierigkeiten werden in den folgenden Unterpunkten aufgeführt.

2.2.1 Bedarf an erneuerbarer Energie

Kohlenstoffdioxid ist ein stabiles Molekül mit sehr niedrigem Energiezustand, weshalb für die Umwandlung in Kohlenwasserstoffe oder andere Produkte große Mengen an Reduktionsenergie benötigt werden (Ramirez Ramirez et al., 2020). Die Energieaufwendung erfolgt entweder direkt oder indirekt in Form eines Aktivators, wie Wasserstoff (ebd.), Elektronen (Rheticus-Verfahren) oder durch Sonnenlicht. Die Implementierung von CCU-Technologien zum Zweck des Klimaschutzes ist dann sinnvoll, wenn die benötigte elektrische Energie aus

erneuerbaren Quellen mit geringem CO₂-Fußabdruck stammt (Ramirez Ramirez et al., 2020). Es sollte nicht mehr CO₂ emittiert werden, als durch die Verfahren gebunden wird (acatech, 2018). CCU bietet die Möglichkeit eines großen künstlichen Speichers, wenn Strom und Wasserstoff eingesetzt werden. Eine aktuelle Einschränkung für CCU-Verfahren ergibt sich aus der heutigen begrenzten Verfügbarkeit erneuerbarer Energie. Der Mehrverbrauch an erneuerbarer Energie für CCU wird nicht aus bereits bestehenden Anlagen gedeckt werden können (Ramirez Ramirez et al., 2020). Techniken zur direkten Nutzung des Sonnenlichtes über Katalysatoren befinden sich aktuell in der Grundlagenforschung. Ein Handlungsweg ist, erneuerbare Energien verstärkt auszubauen, damit die notwendige Energiemenge für CCU verfügbar ist (ebd.). Die Verfügbarkeit von klimaneutraler, elektrischer Energie und der Strompreis sind Kriterien für die Wirtschaftlichkeit von CO₂-Recycling (Majumdar & Deutch, 2018).

2.2.2 Katalysatoren

Die Verarbeitung des reaktionsträgen Moleküls CO₂ kann durch den Einsatz von Katalysatoren erleichtert und der Energiebedarf reduziert werden (Hüsing et al., 2021). Bei der Entwicklung kostengünstiger und langlebiger Katalysatoren gibt es allerdings noch viel Potenzial (ebd.). Eine Herausforderung für die CO₂-Nutzung durch chemische Katalyse stellt somit die Findung geeigneter Katalysatoren dar (Al-Mamoori et al., 2017; Bushuyev et al., 2018; Hüsing et al., 2021; Otto et al., 2015). Zukünftig könnte eine katalytische CO₂-Elektrolyse mit Licht CO₂ stofflich verwerten (Rau, 2018). Damit würde die Technik unabhängig von einer Strom- und Wasserstoffversorgung werden, indem die notwendige Energie für die Reaktion des CO₂ direkt aus dem Sonnenlicht kommt.

2.2.3 Marktpotenziale und Infrastruktur

Angesichts der enormen Menge an fossilem Kohlenstoffdioxid, die jährlich von Industriebetrieben und Energieversorgungsunternehmen emittiert wird, stellen der Aufbau von Infrastruktur für abgeschiedenes CO₂ bzw. die daraus hergestellten Produkte einen wichtigen Meilenstein auf dem Weg zur Implementierung von CCU-Technologien dar. Die hohen Bau- und Betriebskosten der Anlage müssen über den Verkauf der erzeugten Produkte gedeckt werden. Zudem können Erlöse aus CO₂-Zertifikaten die Wirtschaftlichkeit unterstützen. Klimasensible Länder wie Norwegen und Schweden würden schon heute deutlich höhere Beträge für nichtfossile bzw. klimaneutrale chemische Grundstoffe und Produkte bezahlen (R. Backes, Persönliche Mitteilung, 17. September 2020). Wird vermehrt CO₂ zu Chemikalien umgewandelt, erhöht sich zunächst deren Angebot (bis die Verwendung fossiler Grundstoffe endgültig untersagt wird), wodurch der Marktpreis unter Druck gerät.

Langfristig wird sich das Verfahren durchsetzen, welches zu den niedrigsten Kosten CO₂ vermeiden bzw. recyceln kann. Die Vermarktung der Produkte erfordert Kooperationen mit Abnehmerfirmen wie aus der chemischen oder der kunststoffverarbeitenden Industrie. Hier besteht die Chance, lokale Cluster mit Wettbewerbsvorteilen zu bilden. Die Versorgung mit günstiger grüner Energie, die für die meisten Technologien zur CO₂-Nutzung eine elementare Rolle spielt, stellt vor allem im Süden Deutschlands ein großes Problem dar (EWI, 2020). Der Mangel an erneuerbaren Energien im südlichen Teil Deutschlands kann zu einem gravierenden Standortnachteil werden.

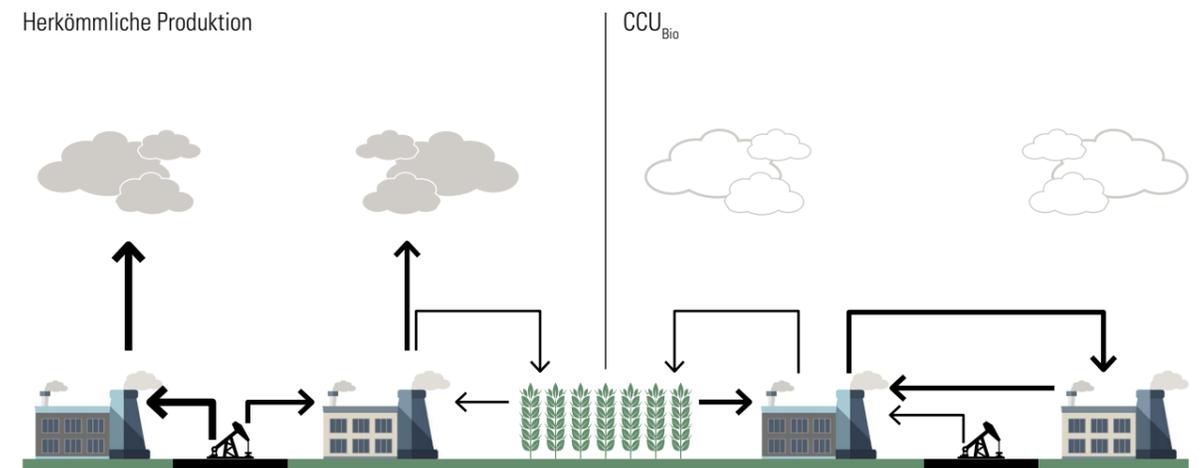
2.2.4 Bilanzierung und rechtliche/politische Rahmenbedingungen

Wenn CO₂ genutzt wird, statt in die Atmosphäre zu entweichen, ist es entscheidend, wem – Emittent oder Nutzer – die entstehende Gutschrift zugeschrieben wird (Ramirez Ramirez et al., 2020). Für die Bilanzierung steht bislang noch kein standardisiertes Vorgehen zur Verfügung (acatech, 2018; Zimmerman et al., 2018). Eine Möglichkeit besteht darin, die entstehende Gutschrift sowie die bei der Abscheidung und Umwandlung freigesetzten direkten und indirekten Emissionen der CCU-Anlage bzw. dem Emittenten zuzuordnen (Ramirez Ramirez et al., 2020). Dies würde für den Nutzer der Recyclingprodukte keinen Emissionsunterschied ergeben. Es stellt sich die Frage, ob der Industrieanlage oder dem Konsumenten des Produkts die entsprechenden Emissionen zugeschrieben werden (acatech, 2018). In jedem Fall muss verhindert werden, dass vermiedene Emissionen doppelt gutgeschrieben werden (Ramirez Ramirez et al., 2020) oder für aus CO₂ recycelte Produkte doppelt Zertifikate gekauft werden müssen. Bei einer vollständigen Gutschrift der Anlagenemissionen auf den

Emittenten ist die Verbrennung von Kraftstoff aus CCU-Technologien bilanziell genauso CO₂-intensiv, wie die herkömmlichen Kraftstoffs (acatech, 2018). Beim Einsatz des recycelten Kraftstoffs wird allerdings eine fossile Kohlenstoffquelle substituiert. Eine Speicherung des CO₂ erfolgt nur bedingt, weil Kraftstoffe und Chemikalien den Kohlenstoff nur kurzzeitig speichern (Bennett et al., 2014; Kätelhön et al., 2019; Mac Dowell et al., 2017). Das Gleiche gilt für Biogas, wo das CO₂-Recycling durch Pflanzen stattfindet, deren Biomasse (enthält das recycelte C) nach kurzer Zeit in einer Biogasanlage zu Methan und CO₂ fermentiert werden und auch die Verbrennung des Methans wiederum das zuvor recycelte CO₂ freisetzt.

Der CO₂-Emittent und -Umwandler könnte die Belastung des CO₂-Ausstoßes an den Nutzer des Produkts weitergeben; wenn das CO₂ jedoch fossilen Ursprungs ist und nach der Nutzungsphase ohne erneute Wiederverwendung emittiert wird, ist das Grundproblem der fossilen CO₂-Emissionen in die Atmosphäre nicht gelöst (Bennett et al., 2014). Da aber die Möglichkeit besteht, das bspw. bei Verbrennungsprozessen entstehende CO₂ erneut zu recyceln (Olfe-Kraeutlein et al., 2016), kann das Recycling insgesamt durchaus zu einer Verringerung der CO₂-Emissionen fossilen Kohlenstoffs führen. CCU-Technologien sind klimaneutral, wenn der Kohlenstoff aus CO₂ dauerhaft im Kreislauf geführt oder langfristig im Produkt gespeichert wird und bei der Umwandlung keine Emissionen entstehen. Sie können sogar eine negative Klimabilanz aufweisen, wenn das CO₂ aus der Atmosphäre stammt, der Kohlenstoff im Produkt gespeichert wird und dabei keine Emissionen entstehen. Grundsätzlich ist also technologiespezifisch festzustellen, ob CO₂-Emissionen verringert werden können oder nicht (von der Assen, 2015, zitiert nach Naims et al., 2015). Zudem substituiert das CO₂-Recycling anteilig die Neuförderung von C-Verbindungen aus fossilen Quellen.

Abbildung 2.1: CCU im Vergleich zur herkömmlichen Produktion.



Die Frage der Zuordnung von CO₂-Emissionen ist für eine praktische Umsetzung von CCU-Technologien entscheidend. Durch fehlende bzw. fehlleitende rechtliche bzw. politische Rahmenbedingungen (z. B. keine Klarheit über CO₂-Rechte an CCU-Produkten, rechtliche Einordnung zu blauem und türkischem Wasserstoff, Bereitstellung grüner Energie) werden derzeit Investitionen in Unternehmen verhindert und somit langfristig die Bestrebungen zum Erreichen von Klimaneutralität verlangsamt.

2.2.5 Beitrag zum Klimaschutz

Der Beitrag von CCU zum Schutz des Klimas ist von den Rahmenbedingungen abhängig. CO₂-Recycling und -Nutzung bedeuten nicht automatisch, dass dadurch Emissionen reduziert werden (Hepburn et al., 2019). CCU kann auch zu einer Erhöhung von Emissionen führen, wenn bei der Produktion mehr CO₂ ausgestoßen, als für die alternative Herstellung des Produkts benötigt wird, zum Beispiel bei Harnstoff aus CO₂ (Otto et al., 2015). Für die Bewertung des Einflusses müssen daher erst alle relevanten Faktoren wie Rohstoffquelle, Energiebedarf und Energiequelle sowie Nutzung und End-of-Life berücksichtigt werden. Da viele CCU-Technologien einen geringen technischen Reifegrad aufweisen, kann deren Vergleich mit herkömmlichen Produktionsweisen im Hinblick auf die CO₂-Einsparung zu einer Über- oder Unterschätzung des Effekts führen (Zimmerman et al., 2018). Wissenschaftler diskutieren, in welchem Ausmaß CCU einen Beitrag zum Klimaschutz leistet (Mac Dowell et al., 2017; Naims et al., 2015; Olfe-Kraeutlein et al., 2016). Produkte aus CO₂ wie Chemikalien oder Kraftstoff können zwar Emissionen reduzieren, indem fossile Primärquellen ersetzt werden; eine Entfernung aus dem Kreislauf ist

jedoch nicht möglich (Hepburn et al., 2019) bzw. nicht immer möglich. Selbst bei erneutem Recycling der Produkte wird in verschiedenen Branchen, wie bspw. der Zement- oder Glasindustrie, weiterhin mehr fossiler Kohlenstoff in den Kreislauf eingebracht. Die Etablierung neuer CO₂-Kreisläufe wird in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Durch das Fortschreiten der industriellen und gesellschaftlichen Transformation hin zu mehr Nachhaltigkeit werden zukünftig größere Mengen grüner Produkte zur Verfügung stehen. Für diese Transformation ist es entscheidend, dass bereits jetzt geeignete CCU-Technologien zur großtechnischen Umsetzung entwickelt werden und dann rechtzeitig zur Verfügung stehen. Hier muss u. U. abgewogen werden, ob für CCU-Technologien in der Entwicklungsphase eine Abweichung von den ambitionierten nationalen Nachhaltigkeits- und Klimazielen, wie die ausschließliche Verwendung von grünem Wasserstoff, toleriert werden kann. Die Verfügbarkeit grünen Wasserstoffs wird noch für einige Zeit begrenzt sein. Für die Demonstration einiger CCU-Verfahren sind große Mengen Wasserstoff erforderlich. Die Entwicklung dieser Technologien darf nicht auf die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff warten müssen. Überlegenswert wäre, andere Farben des Wasserstoffs, wie blauen oder türkisen, für die CCU-Entwicklung zuzulassen. Außerdem ist die Fertigung von Anlagenkomponenten in weiten Teilen noch nicht nachhaltig.

3

MOTIVATION FÜR BIOLOGISCHE/HYBRIDE CCU-VERFAHREN

3.1 DEFINITION UND KURZBESCHREIBUNG BIOLOGISCHER CCU-TECHNOLOGIEN

Bakterien, Archaeen oder Pflanzen nutzen biologische Stoffwechselprozesse, die CO₂ reduzieren und stellen dadurch „Grundchemikalien“ her (nova-Institut GmbH, 2013). Es gibt verschiedene Ansätze für das biotechnologische CO₂-Recycling: Ein mögliches Verfahren ist die modifizierte Fotosynthese. Dabei werden Fotosynthese betreibende Mikroorganismen eingesetzt und ggfs. gentechnisch verändert, um den Prozess zu optimieren sowie spezifische Zielprodukte herzustellen (Dau et al., 2019; Hüsing et al., 2021).

Ein weiteres biotechnologisches Verfahren ist die Gasfermentation. Hier nutzen Mikroorganismen gasförmige Kohlenstoffquellen wie CO und CO₂ und stellen daraus Chemikalien und Biokraftstoffe her (Redl et al., 2017). CO kann dabei sowohl Kohlenstoff- als auch Energiequelle sein. Für die CO₂-Umwandlung wird zusätzlich ein Elektronendonator benötigt (Redl et al., 2017). Die Gasfermentation kann sowohl unter aeroben als auch unter anaeroben Bedingungen betrieben werden (Hüsing et al., 2021).

Mithilfe des Enzyms Carboanhydrase ist eine Umwandlung von CO₂ in Hydrogencarbonat möglich (Hüsing et al., 2021). Diese Reaktion kann in verschiedenen Anwendungen zum Einsatz kommen: bei der CO₂-Abscheidung aus Gasgemischen, bei der CO₂-Absorption mit Lösungsmitteln und bei der Mineralisierung von CO₂ für eine langfristige Speicherung (Long et al., 2017).

Letztere wird auch mit der mikrobiell induzierten Calciumcarbonatfällung erzielt (Hüsing et al., 2021). Durch die Stoffwechselaktivitäten der Mikroorganismen verändert sich der pH-Wert, was eine Ausfällung von Carbonaten fördert (ebd.). Das entstehende Calciumcarbonat kann als Rohstoffsubstitution

für den Zementherstellungsprozess verwendet werden (Krajewska, 2018). Alsharif et al. (2020) untersuchten, ob die natürliche Carbonatisierung des Betons mithilfe der genannten mikrobiellen Prozesse gesteigert werden kann.

Die Elektrobiosynthese stellt ein weiteres biotechnologisches Verfahren zur CO₂-Nutzung dar. Die Zufuhr elektrischer Energie führt dazu, dass auch energetisch ungünstige Prozesse, wie die mikrobielle Reduktion von CO₂, umgesetzt werden (Hüsing et al., 2021). Die Übertragung von Elektronen von Elektrode auf Mikroorganismen erfolgt dabei entweder direkt oder indirekt, indem elektrochemische und mikrobielle Reaktionen kombiniert werden (Holtmann & Harnisch, 2019). Auch ermöglicht die C1-Fermentation als Ergänzung zu chemisch-physikalischen Technologien die Herstellung von höherwertigen Kohlenwasserstoffen aus C1-Molekülen wie z. B. Formiat (Yishai et al., 2016).

Zu erwähnen ist ebenfalls die biologische Methanisierung, d. h. die Umwandlung von Wasserstoff und CO₂ zu Methan und Wasser mithilfe von methanogenen Archaeen. Die anaerob ablaufende Methanogenese wird von Archaeen der Gattungen Methanopyrales, Methanobacteriales, Methanococcales und Methanomicrobiales durchgeführt und bislang in Kombination mit Biogas- und Kläranlagen technisch untersucht. Das derart produzierte Methan könnte im Nachgang bspw. durch methanotrophe Mikroorganismen in Biomasse oder andere mikrobiell hergestellte Produkte umgewandelt werden. Aktuell sind die damit verbundenen Techniken aber für den großtechnischen Einsatz noch nicht ausreichend entwickelt.

3.2 AKTUELLER STAND ZU FORSCHUNG, TECHNIK UND PATENTLAGE BIOLOGISCHER CCU-TECHNOLOGIEN

3.2.1 Gasfermentation (IBVT)

Auf der Basis von Peer-Review-Publikationen und erteilten Patenten wurde eine umfangreiche Literaturrecherche zur mikrobiellen Nutzung CO₂-haltiger Abgase (z. B. Synthesegas) durchgeführt. Grundlagen waren die Archive „Web of Science“ und „Google Scholar“, sortiert nach wissenschaftlicher Relevanz und Aktualität, sowie erweiterte Suchen in den Free-Access-Datenbanken „Google Patents“ und „EspaceNet“. Zunächst wurden die Patentfamilien durch die kombinierten Schlüsselwörter „Syngas/Gas“ und „Fermentation“ bestimmt. Anschließend wurde nach bekannten Produkten wie z. B. Ethanol gesucht. Neben der Patentnummer sind auch die Anmelder zu den Patenten benannt. In die Bewertung der Publikationen flossen folgende Kriterien ein: einzelner versus integrierter Prozess, Produkttyp, Mikroorganismen, Prozessbedingungen, Reaktortyp, Druck, Gasgehalt, volumetrische Produktionsrate und -ausbeute. Eine Übersicht ist in der beigefügten Tabelle 3.1 aufgeführt. Einerseits markiert sie den Status quo. Andererseits kann sie als Richtschnur für zukünftige Arbeiten verwendet werden.

Literaturübersicht:

In Tabelle 3.1 sind Ethanol, Essigsäure/Acetat, Propanol (1-Propanol/2-Propanol), Butanol, 2,3-Butandiol, Hexanol, n-Caproinsäure, Aceton, Propylen, einzelliges Protein und Lipide als potenzielle Produkte des Gasfermentationsprozesses über einzelne oder integrierte Systeme aufgeführt. Abgesehen davon werden Ethylen, Laktat, Buttersäure, Polyhydroxybutyrat, Hexanosäure, Chorismat-Abgeleitete Produkte wie Parahydroxybenzoesäure und Isopren als Produkte der Gasfermentation und verwandter Prozesse in der Literatur berichtet.

Im Sinne einer erfolgreichen Kreislaufwirtschaft sind Ethanol und Essigsäure von besonderer Bedeutung. Sie sind die natürlichen Produkte der CO- und/oder CO₂-Fermentation und werden in der chemischen, pharmazeutischen, Automobil-, Lebensmittel- und Getränkeindustrie sowie der Kosmetik- und der Haushaltsindustrie als Zwischen- oder Endprodukt weit verbreitet eingesetzt. So ist Ethanol das aktuell bedeutendste kommerzielle Produkt der mikrobiellen Gasnutzung und ein wichtiger Bestandteil von Biokraftstoffen. Essigsäure/Acetat ist ein entscheidender Vorläufer verschiedener chemischer Verbindungen wie Acetatester, Essigsäureanhydrid, Vinylacetatmonomer (VAM) und gereinigte Terephthalsäure (PTA) (Daniell et al., 2012; Teixeira et al., 2018).

Die strikt anaeroben und chemo-/autotrophen Arten Clostridien und Acetobacter sind die üblichen mikrobiellen Wirte für die Ethanol- und Essigsäureproduktion aus Synthesegas

(Syngas) oder Industrieabgasen. Diese können CO, CO₂ und H₂ sowie inerte Komponenten in unterschiedlichen volumetrischen Verhältnissen enthalten. Für die C1-Fixierung wird mikrobiell der Wood-Ljungdahl-Weg verwendet (Bengelsdorf et al., 2013). Anwendungstechnisch weit verbreitet ist der natürliche Stamm Clostridium ljungdahlii, der sich gut für die Ethanolproduktion, insbesondere aus C- und H-reichen Gasgemischen, eignet. C. autoethanogenum, C. coskatii, C. ragsdalei und C. carboxidivorans sind weitere acetogene Stämme, die von Firmen wie LanzaTech Inc. und Coskata Inc. kommerzialisiert wurden.

Literaturquellen zufolge wurde ein erheblicher Teil der Forschung zu Gasfermentationen im Labormaßstab anhand kontinuierlich betriebener Rührreaktoren (CSTR) bei atmosphärischem Druck durchgeführt. Zur Steigerung von Leistungsdaten (volumetrische Produktivität, Titer, Substratnutzung etc.) wurde der Einsatz verschiedener Bauformen wie Festbett, Tropfkörperkolonnen, Hohlfasermembranen und Blasensäulen mit bzw. ohne Zellrückhaltung unter atmosphärischen Druck oder Überdruck untersucht. In Analogie zur Herstellung von Ethanol wurden ähnliche Prozessansätze auch für die Essigsäureproduktion untersucht. Kantzow et al. (2015) berichten über die signifikante Steigerung der Raum-Zeit-Ausbeute durch Überdruck-Gasfermentationen mit Acetobacter woodii unter integrierter Zellrückhaltung.

Neben Ethanol und Acetat können auch die technisch relevanten Alkohole Butanol, 2,3-Butandiol und Hexanol mithilfe der Gasfermentation hergestellt werden. Butanol bspw. besitzt dank seiner im Vergleich zu Ethanol höheren Energiedichte und besseren Mischbarkeit mit Benzin ein erhebliches Potenzial als Biokraftstoff. Historisch geht die (heterotrophe) Aceton-Butanol-Ethanol-Bildung mit Clostridien auf den sogenannten Weizmann-Prozess (benannt nach seinem Erfinder, dem späteren israelischen Ministerpräsidenten) zurück. 2,3-Butandiol wird häufig verwendet, um industrielle Chemikalien bzw. Lösungsmittel wie Methyl-Ethylketon, Gamma-Butyrolacton und 1,3-Butadien zu synthetisieren (Dürre, 2007). Die o. g. Alkohole können von C. carboxidivorans, B. methylotrophicum, C. ljungdahlii und C. autoethanogenum aus CO-reichen Gasen hergestellt werden. Allerdings liegt die Produktivität deutlich unter denen für Ethanol und Essigsäure. Im Rahmen der Literaturrecherche standen insbesondere die natürlichen, nicht-rekombinanten Produktionsstämme im Mittelpunkt. Dies spiegelt einerseits den verhältnismäßig großen molekularbiologischen Aufwand wider, diese Stämme gezielt gentechnisch zu verändern.

Auch vereinfacht die Verwendung natürlicher Produktionsstämme deren Handhabung in industriellen Prozessen. Allerdings wurden in der Vergangenheit zahlreiche rekombinante Stämme entwickelt und patentiert, um die Effizienz des Verfahrens zu erhöhen oder neue Produkte zugänglich zu machen (Köpke et al., 2012; Simpson et al., 2008).

Darüber hinaus wurden Propanol, Propylen und Aceton, die in der chemischen, pharmazeutischen und Automobilindustrie (d. h. Gastrockner) häufig als Lösungsmittel verwendet oder als Zwischenprodukt bei der Synthese von Chemikalien verarbeitet werden, als mögliche Produkte der Gasfermentation untersucht. Die beiden Propanol-Isomere sind in Gasfermentationen durch eine Co-Kultur auch acetogenen und propionogenen Stämmen darstellbar. Alternativ kann *C. autoethanogenum* gentechnisch verändert werden, was durch Coskata Inc. bzw. LanzaTech patentiert wurde (Enzien et al., 2014; Köpke et al., 2012). Neben Propanol können Propylen und Aceton mithilfe genetischer Modifikationen an Acetogenen verwendet werden. Die Nutzung CO₂-haltiger Abgase wurde auch zur Herstellung von einzelligem Protein und Lipiden untersucht. Mikrobielle Biomasse könnte eine grüne Protein-Alternative zu pflanzlichen oder tierischen Quellen als Nahrungsergänzungsmittel bzw. für die Tierzucht sein. Zweistufige Bioprozesse, die anaerobe und aerobe Fermentation kombinieren (siehe Tabelle 3.1), stellen interessante Prozessvarianten dar. Alternativ kann auch die Biomasse von *C. autoethanogenum* direkt als Proteinquelle für Futtermittel verwendet werden, wie von LanzaTech patentiert (Molitor et al., 2019).

Patentübersicht:

Die erteilten Patente wurden in drei Kategorien eingeteilt: i) Mikroorganismen, ii) Bioreaktorsysteme und ihre Betriebsarten sowie iii) Integration anaerober Prozesse. Im Folgenden sind ausgewählte Beispiele weltweit geschützten geistigen Eigentums (world organisation of intellectual property, WIPO) und europäischer Patente (Europäisches Patentamt, EPA) aufgeführt.

i) Mikroorganismen: Anfänglich erteilte Patente auf die Verwendung einiger natürlicher Stämme von *Clostridium ljungdahlii*, z. B. *C. ljungdahlii* PETC, C-01 und O-52 (z. B. EP1177309 B1, 2004), sind mittlerweile ausgelaufen. Ein anderes Beispiel ist *Clostridium coskatii* ATCC No. PTA-10522, welcher von der Firma Coskata Inc. zur mikrobiellen Syngas-Umwandlung isoliert und patentiert wurde. Das erteilte europäische Patent (EP2547759 A4, 2013) ist aktuell „zurückgezogen“, da das Unternehmens nicht mehr am Markt tätig ist. Die Firma LanzaTech wählte *C. autoethanogenum* als ihr kommerzielles „Arbeitspferd“. Darauf basieren auch eine Reihe rekombinante Stämme zur Herstellung neuer Produkte auf Syngas-Basis. Die Patente EP2217696 B1 (2015), EP2855662 B1 (2018), EP2864470 B2 (2017) und EP2678432 B1 (2018) sind die jüngsten Beispiele.

ii) Prozesse: Zur Steigerung prozesstechnischer Leistungsdaten, d. h. zur Prozessintensivierung, wurden neuartige Reaktorsysteme entwickelt. So entwickelte die Firma Ineos Bio, die 2017 von Jupeng Bio gekauft wurde, bereits Anfang der 2010er-Jahre Multi- und Single-Reaktorsysteme bzw. -prozesse. Unter EP2852675 A2 (2018) wurde bspw. die Zugabe der Stickstoffquelle Ammoniumhydroxid und Chlorid für die effektive Syngas-basierte mikrobielle Produktion mit einem oder mehreren acetogenen Bakterien patentiert. Eine andere Erfindung (EP2726594 B1, 2017) schützt den Einsatz eines Mehrreaktorsystems, bestehend aus einem nicht-gerührten Reaktor (z. B. Blasensäule) zur Biomassegewinnung und einem gerührten Hauptreaktor zur Produktbildung. Damit wurden Raum-Zeit-Ausbeuten für Ethanol von ca. 10 g/(L*Tag) erreicht. Da der Einsatz gerührter Reaktoren im industriellen Maßstab kostenintensiv ist, konzentrieren sich Forschungs- und Patentierungsarbeiten auf alternative Aufbauten. Erst kürzlich patentierte Sekisui Chemical Co. Ltd. ein Verfahren mit einem Umlauf-Bioreaktor zur Stabilisierung der mikrobiellen Kultur (EP3272853 B1, 2020). Das Unternehmen Synata Bio, welches über das Technologie-Know-how von Coskata Inc. verfügt, erlangte einen Patentschutz für den Einsatz von „deep tank column reactor“ (z. B. Blase-nsäulenreaktoren) mit der Nummer EP3190188 B1 (2017). Um den intrinsischen Nachteilen der geringen Löslichkeit von CO und CO₂ zu begegnen, hat LanzaTech bspw. ein System zur Mikroblasenerzeugung patentieren lassen. Durch die höhere Blasenoberfläche wird der Stoffaustausch entsprechend verbessert (EP2950914 B1, 2019).

iii) Integration anaerober Prozesse: Um die Potenziale der anaeroben mikrobiellen Stoffumwandlung breiter zu nutzen, wurden Verfahren zur integrativen Verwendung patentiert. Dies schließt sowohl die Rückintegration zur Nutzung alternativer Substratquellen wie auch die Vorwärtsintegration zur Veredlung der anaeroben Produkte mit ein. So wurde bspw. kohlenstoffhaltiger Abfall organischen und anorganischen Ursprungs vergast, gereinigt und das gasförmige Substrat für die anaerobe mikrobielle Ethanolproduktion eingesetzt (EP2558555 B1, 2018). Darüber hinaus wurden integrierte Prozesse bspw. zur Herstellung von Isopren als Rohstoff für die Reifenherstellung patentiert. Der Firma Sekisui Chemical Co. Ltd. gelang kürzlich die Patentierung (EP2949456 B1, 2020) ihres Ansatzes zur Vergasung von Altreifen und der nachfolgenden Clostridien-basierten Umwandlung der Abgase zur finalen Herstellung von Isopren. Ein anderes Beispiel ist die Herstellung von Protein zur Tierernährung aus CO₂-haltigen Gasen. Auf Basis mehrerer Clostridien-Arten hat die Firma LanzaTech entsprechende Erfindungen eingereicht. In Europa ist die Anmeldung EP3297451 A1 (2016) noch ausstehend, in den USA hingegen ist sie bereits patentrechtlich geschützt. In ähnlicher Weise wurde auch die Produktion von Lipiden aus Syngas geschützt (EP2753700 B1, 2020). CO₂-haltige Restgase werden in einem ersten Schritt anaerob mit *Acetobacter woodii* zu Acetat umgesetzt, welches im Anschluss mit der ölhaltigen Hefe *Cupriavidus necator* zu lipidhaltiger Biomasse umgewandelt wird.

Tabelle 3.1: Übersicht über Produkte, Mikroorganismen, Patente, Produktivität und Reaktortyp sowie Gasgehalt

Mikroorganismus	Publikation/Patent	Produktivität/Ausbeute und Reaktortyp	Gasgehalt	
ETHANOL				
<i>Clostridium ljungdahlii</i>	C. ljungdahlii PETC (ATCC 55383/DSM 13528)	Mohammadi et al. (2012)	$P_{\text{EtOH}^+}^{\text{max}}$: 78 mg/L.h 2 L (Arbeitsvolumen)-STR	55 % CO, 20 % H ₂ , 10 % CO ₂ , 15 % Ar
		Martin et al. (2016)	$P_{\text{EtOH}^+}^{\text{max}}$: 301 mg/L.h (EtOH:Acetate=5.5) 2 L- CSTR + 6 L BCR	60 % CO, 35 % H ₂ , 5 % CO ₂
		Almeida Benalcázar et al. (2020)	$P_{\text{EtOH,max}}$: 5100 mg/L.h	75 % H ₂ , 25 % CO ₂
		Almeida Benalcázar et al. (2020)	$P_{\text{EtOH,max}}$: 4300 mg/L.h 700 m ³ Blasensäule ¹	100 % CO
		Anggraini et al. (2019)	$Y_{\text{EtOH,CO}^+}$: 0.22 mol/mol (EtOH:Acetate = 1.43) STR verbunden mit HFM, 1.5 L Arbeitsvolumen	25 % CO, 20 % CO ₂ , 15 % H ₂ , 40 % N ₂
		Hermann et al. (2020)	$Y_{\text{EtOH,CO/CO}_2}$: 0.24 C-mol/mol (EtOH:Acetate = 3.43) 3 L-STR	55 % CO, 30 % H ₂ , 5 % CO ₂ , 10 % Ar
	C. ljungdahlii ATCC 49587	Phillips et al. (1993)	$P_{\text{EtOH,max}}$: 100 mg/L.h CSTR	65 % CO, 25 % H ₂ , 10 % CO ₂
	² C. ljungdahlii C-01 (ATCC 55988)	Gaddy et al. (2001)	P_{EtOH^+} : 600-879 mg/L.h CSTR w/ Zellrückhaltung	65 % CO, 20 % H ₂ , 10 % CO ₂ , 5 % N ₂
			$P_{\text{EtOH,40psig}}$: 2500 mg/L.h CSTR w/ Zellrückhaltung	36.5 % CO, 15.8 % H ₂ , 9.3 % CO ₂ , 38.4 % N ₂
			$P_{\text{EtOH,30psig}}$: 6250 mg/L.h CSTR w/ Zellrückhaltung	31 % CO, 62 % H ₂ , 5 % C ₂ H ₆
			$P_{\text{EtOH,75psig}}$: 15375 mg/L.h CSTR w/ Zellrückhaltung	30 % CO, 55 % H ₂ , 10 % CO ₂ , 5 % CH ₄
<i>Clostridium carboxidivorans</i>	C. carboxidivorans P7 (ATCC BAA-624)	Sathish et al. (2019)	$P_{\text{EtOH,max}}$: 746 mg/L.h (EtOH:Acetate=7.6) PBR w/ BGAL Kontaktor	50 % CO, 12.5 % H ₂ , 37.5 % CO ₂
		Shen et al. (2014)	$P_{\text{EtOH,max}}$: 143 mg/L.h (EtOH:Acetate=4.8) HFM Bioreaktor; Satzreaktor	20 % CO, 5 % H ₂ , 15 % CO ₂ , 60 % N ₂

¹ simuliert

² Stamm aus INEOS Bio SA

Tabelle 3.1: Übersicht über Produkte, Mikroorganismen, Patente, Produktivität und Reaktortyp sowie Gasgehalt

Mikroorganismus	Publikation/Patent	Produktivität/Ausbeute und Reaktortyp	Gasgehalt	
ETHANOL – Fortsetzung				
Clostridium autoethanogenum	³ C. autoethanogenum DSM 10061	Thi et al. (2020)	P _{EtOH, max} : 11.2 mg/L.h 150 mL Serum Basalmedium w/0,5 g/L Pflanzenextrakt	20 % CO, 10 % H ₂ , 20 % CO ₂ , 50 % N ₂
		Valgepea et al. (2018)	P _{EtOH, max} : 807.5 mg/L.h 1.4 L- STR; kontinuierlich	2 % CO, 65 % H ₂ , 23 % CO ₂ , 10 % Ar
		Wang et al. (2013)	P _{EtOH, max} : 940 mg/L.h STR w/ 1.2 L Arbeitsvolumen	42 % CO, 20 % CO ₂ , 2 % H ₂ , 36 % N ₂
		Jang et al. (2020)	P _{EtOH, max} : 1300 mg/L.h PBR w/2 L Arbeitsvolumen	80 % CO, 20 % CO ₂
Clostridium coskatii	⁴ C. coskatii PS02 (ATCC PTA-10522)	Zahn und Saxena (2010) ⁵	P _{EtOH, max} : 247 mg/L.h	37 % CO, 35.1 % H ₂ , 21.68 % CO ₂ , 6.22 % N ₂
Clostridium ragsdalei	C. ragsdalei P11 (ATCC PTA-7826/DSM 15248)	Devarapalli et al. (2017)	P _{EtOH, max} : 158 mg/L.h TBR; Semi-kontinuierlich	38 % CO, 28.5 % H ₂ , 28.5 % CO ₂ , 5 % N ₂
		Kundiyana et al. (2010)	P _{EtOH, max} : 36 mg/L.h 100 L- STR; Semi-kontinuierlich	20 % CO, 5 % H ₂ , 15 % CO ₂ , 60 % N ₂
Alkalibaculum bacchi	A. bacchi CP15	Liu et al. (2014)	P _{EtOH, max} : 70.30 mg/L.h 7 L-STR w/ Zellrückhaltung	28 % CO, 60 % H ₂ , 12 % N ₂

³ Kommerziell von LanzaTech Inc. genutzter Stamm⁴ Stamm von COSKATA Inc.⁵ Das erteilte Patent von USPTO ist ausgelaufen wegen nicht gezahlter Patentkosten.**Tabelle 3.1:** Übersicht über Produkte, Mikroorganismen, Patente, Produktivität und Reaktortyp sowie Gasgehalt

Mikroorganismus	Publikation/Patent	Produktivität/Ausbeute und Reaktortyp	Gasgehalt	
ACETIC ACID/ACETATE				
Clostridium ljungdahlii	C. ljungdahlii ATCC 49587	Tanner et al. (1993)	Y _{Acetic acid/H₂} : 0.25, Y _{Acetic acid/CO₂} : 0.5 In sealed culture lab-tubes	80 % H ₂ , 20 % CO ₂
	C. ljungdahlii PETC (ATCC 55383/DSM 13528)	Infantes et al. (2020)	P _{Acetate, max} : 220 mg/L.h Acetate:Ethanol: 11.6 2.5 L- STR w/ modified medium	32.5 % CO, 16 % CO ₂ , 32.5 % H ₂ , 19 % N ₂
		Hermann et al. (2020)	Y _{Acetate, CO/CO₂} : 0.93 C-mol/mol 3 L-STR	47.5 % H ₂ , 47.5 % CO ₂ , 5 % Ar
Clostridium ragsdalei	C. ragsdalei ATCC-PTA-7826	Devarapalli et al. (2017)	P _{Acetic acid, max} : 68 mg/L.h 1 L-TBR	38 % CO, 28.5 % CO ₂ , 28.5 % H ₂ , 5 % N ₂
Clostridium coskatii	C. coskatii PTA-10522	Zahn und Saxena (2010) ⁶	P _{Acetic acid, max} : 225 mg/L.h	37 % CO, 35.1 % H ₂ , 21.68 % CO ₂ , 6.22 % N ₂
Clostridium autoethanogenum	C. autoethanogenum DSM 10061	Valgepea et al. (2018)	P _{Acetate, max} : 497.5 mg/L.h 1.4 L- STR; Kontinuierlich	2 % CO, 65 % H ₂ , 23 % CO ₂ , 10 % Ar
		Wang et al. (2013)	P _{Acetate, max} : 600 mg/L.h STR w/ 1.2 L of Arbeitsvolumen	42 % CO, 20 % CO ₂ , 2 % H ₂ , 36 % N ₂
		Mock et al. (2015)	P _{Acetate} : 3100 mg/L.h 2 L-CSTR verbunden mit HFM	65 % H ₂ , 23 % CO ₂ , 9.2 % N ₂
Acetobacterium woodii	⁷ A. woodii pJIR750 pta-ack	Straub et al. (2014)	P _{Acetate, max} : 1.200 mg/L.h 2 L-STR	40 % H ₂ , 16.7 % CO ₂ , 43.3 % N ₂
	A. woodii DSM 1030	Demler und Weuster-Botz (2011)	P _{OAc, max} : 308 mg/L.h 2 L-STR; Satzreaktor	H ₂ , CO ₂ und N ₂ mit 15 L/h
		Kantzow et al. (2015)	STY _{Acetate, max} : 6166.6 mg/L.h 2 L-STR w/ Zellrückhaltung	60 % H ₂ , 25 % CO ₂ , 15 % N ₂
Butyrilbacterium methylotrophicum	B. methylotrophicum ATCC 33266/ DSM 3468	Heiskanen et al. (2007)	C _{Acetic acid, max} : 1300 mg/L 117mL serum bottles	70 % CO, 30 % CO ₂
Moorella thermoacetica	M. thermoacetica ATCC 49707/DSM 6867	Hu et al. (2016)	P _{Acetic acid, max} : 900 mg/L.h BCR verbunden mit HFM (1 L Arbeitsvolumen); Kontinuierlich	1 Stufe: 80 % CO, 20 % CO ₂ , 2. Stufe: 66.6 % H ₂ , 33.3 % CO ₂

⁶ Angepasst an Wachstum auf CO

Tabelle 3.1: Übersicht über Produkte, Mikroorganismen, Patente, Produktivität und Reaktortyp sowie Gasgehalt

Mikroorganismus	Publikation/Patent	Produktivität/Ausbeute und Reaktortyp	Gasgehalt	
PROPANOL (1-PROPANOL/2-PROPANOL)				
Clostridium autoethanogenium	*C. autoethanogenium DSM 23693 (w/ vectorpMT-L83147thl-ctfAB-adc-adh2)	Köpke et al. (2012)	P _{IPA} : 29.17 mg/L.h Satzreaktor	50 % CO ₂ , 2 % H ₂ , 18 % CO ₂ , 30 % N ₂
Clostridium coskatii + Propionogen	C. coskatii + Propionogen	Enzien et al. (2014)	P _{Propanol} : 220 mg/L.h Satzreaktor + kontinuierlich	CO, CO ₂ and H ₂
BUTANOL				
Clostridium carboxidivorans	C. carboxidivorans P7/DSM 15243 (growth in modified medium)	Phillips et al. (2015)	C _{Butanol, max} : 940 mg/L 50 ml Vm; Serum bottle	70 % CO ₂ , 20 % H ₂ , 10 % CO ₂
	C. carboxidivorans P7 DSM 15243	Fernández-Naveira et al. (2016)	P' _{Butanol, max} : 70 mg/L.g of biomass (Estimated) P _{Butanol, max} : 16.1 mg/L.h 2 L- STR	100 % CO
Butyribacterium methylophilum	CO strain of B. methylophilum	Grethlein et al. (1991)	C _{Butanol, max} : 2700 mg/L 2 L-CSTR w/ Zellrückhaltung; Kontinuierlich	100 % CO
2,3-BUTANDIOL				
Clostridium ljungdahlii	C. ljungdahlii PETC (ATCC 55383/DSM 13528)	Hermann et al. (2020)	Y _{2,3-BDO, CO/CO₂} : 0.24 C-mol/mol 3 L-STR	55 % CO ₂ , 30 % H ₂ , 5 % CO ₂ , 10 % Ar
Clostridium autoethanogenum	C. autoethanogenum DSM 10061-DSM 19630	Simpson et al. (2008)	P _{2,3-BDO, max} : 62.5 mg/L.h 2 L-CSTR; Satzreaktor	47 % CO ₂ , 3 % H ₂ , 20 % CO ₂ , 30 % N ₂
			P _{2,3-BDO, max} : 50 mg/L.h 5 L-CSTR; Kontinuierlich	70% CO ₂ , 1 % H ₂ , 15 % CO ₂ , 14 % N ₂
	C. autoethanogenum DSM 23693	Simpson et al. (2014) ⁸	P _{2,3-BDO, max} : 572 mg/L.h 1.5 L-Bioreaktor	18.5 % CO ₂ , N/A % CO, N/A % N ₂

⁸ EU Patentstatus "pending"**Tabelle 3.1:** Übersicht über Produkte, Mikroorganismen, Patente, Produktivität und Reaktortyp sowie Gasgehalt

Mikroorganismus	Publikation/Patent	Produktivität/Ausbeute und Reaktortyp	Gasgehalt	
HEXANOL				
Clostridium carboxidivorans	C. carboxidivorans P7 (growth in modified medium)	Phillips et al. (2015)	C _{Hexanol, max} : 940 mg/L 50 mL Vm; Serum bottle	70 % CO ₂ , 20 % H ₂ , 10 % CO ₂
N-CAPROIN SÄURE				
Clostridium kluyveri	C. kluyveri ATCC 8527/ DSM555	Gildemyn et al. (2017)	P _{n-Caproic acid} : 191.7 mg/L.h 2.5 L-Chemostat connected to a hollow fiber unit; Kontinuierlich	20 % CO ₂ , 80 % N ₂
ACETON				
Acetobacterium woodii	⁹ A. woodii pMTL84151_act _{thIA}	Hoffmeister et al. (2016)	P _{Acetone} : 26.4 mg/L.h 2 L-STR, Satzreaktor	20 % H ₂ , 80 % CO ₂
SINGLE CELL PROTEIN (SCP)				
Clostridium ljungdahlii + Saccharomyces cerevisiae S288C (ATCC 204508)	C. ljungdahlii PETC (ATCC 55383/DSM 13528) + S. cerevisiae S288C (ATCC 204508)	Molitor et al. (2019)	P _{Acetate} : 756 mg/L.h P _{Protein, max} : 70 mg/L.h Y _{Biomass/C} : ~25 % C _{Y¹⁰} : 78.6 C _{Y¹⁰} : 29.6 1 st Stufe: 2 L-Chemostat 2 nd Stufe: 1.5 L-In situ cell culture system	80 % H ₂ , 20 % CO ₂
LIPID				
Moorella thermoacetica + Yarrowia lipolytica	M. thermoacetica ATCC 49707/ DSM 6867 *Y. lipolytica ACC-DGA	Hu et al. (2016)	P _{lipid, max} : 190 mg/L.h Integrated process unit w/ bubble column reactor and 2 L STR connected to HFM	In BCR: 1. Stufe: 80 % CO ₂ , 20 % CO ₂ 2. Stufe: 66.6 % H ₂ , 33.3 % CO ₂ In STR: Acetate enthaltende Medien
Acetobacterium woodii + Cryptococcus curvatus	A. woodii DSM 1030 C. curvatus DSM 721	Tran und Simpson (2012)	C _{lipid} : 4.88 % P _{lipid} : max: 83.3 mg/L.h Integrierter Prozess mit w/ 3 L-STR and 2 L-CSTR	20 % CO ₂ , 60 % H ₂ , 20 % N ₂

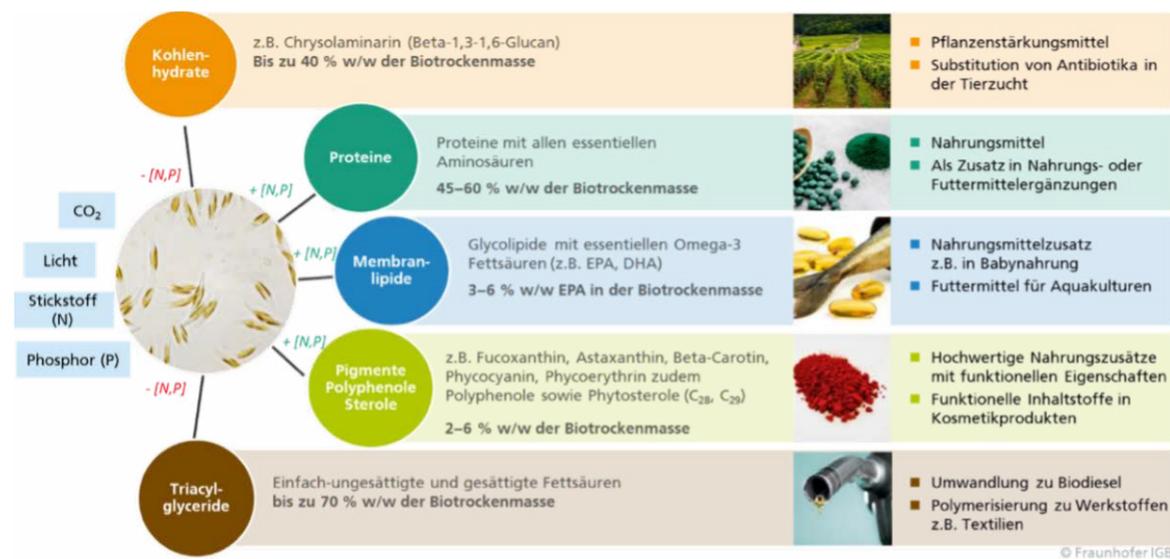
⁹ Eine Carboxylsäure mittlerer Kettenlänge wird mit Ethanol oder Acetat elongiert¹⁰ %mol-C basis

3.2.2 Algen

Mikroalgen können fotosynthetisch aus CO₂, Licht und anorganischen Nährstoffen, wie Ammonium, Phosphat und anderen, Biomasse aufbauen. Das IGB verfügt über eine über 20-jährige Erfahrung in der Kultivierung von Mikroalgen in Flachplatten-Airlift-Reaktoren (FPA-Reaktoren) mit dem Ziel, Prozesse für vielfältige Einsatzmöglichkeiten in Lebens- und Futtermitteln, Personal Care, Agrochemie sowie als Basischemikalien für neue Materialien zu entwickeln. Die Kultivierung von Mikroalgen erfolgt in geschlossenen Reaktoren oder offenen Systemen („open ponds“). Der Vorteil von geschlossenen Systemen besteht neben deutlich höheren Produkt- und Biomasse-Produktivitäten darin, die Kultivierungsbedingungen kontrollieren zu können (z. B. Temperatur, Nährstoffgehalt, Lichtmenge pro Zelle). Die Kultivierungsbedingungen spielen eine entscheidende Rolle bei der Ausprägung des Inhaltsstoffprofils der Mikroalgenbiomasse und können eingesetzt werden, um einen gewünschten Stoff zu akkumulieren.

Die Mikroalgenproduktion benötigt keine landwirtschaftlichen Nutzflächen und kann z. B. in Gewächshäusern auf brachliegenden Flächen (z. B. Flächen brachliegender Immobilien) erfolgen. Des Weiteren kann durch die Nutzung von nährstoffreichen Gärrückständen aus Biogasanlagen und Agrarabwässern für die Kultivierung von Mikroalgen die Nitratbelastung in Boden und Grundwässern gesenkt werden. Das CO₂ aus Biogasanlagen kann als Kohlenstoffquelle genutzt werden, wodurch der Ausstoß an CO₂ in die Atmosphäre gesenkt und das Klima geschützt wird. Zur Prozessintensivierung wird zukünftig die künstliche Beleuchtung mit LEDs eingesetzt, die eine witterungsunabhängige Ganzjahresproduktion bei höchsten Raum-/Zeitausbeuten ermöglicht. Den hohen Strom- und Investitionskosten für die künstliche Beleuchtung steht ein um den Faktor 8–10 höhere Biomasseproduktivität gegenüber.

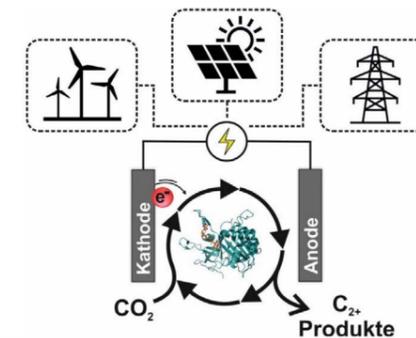
Abbildung 3.1: Algeninhaltsstoffe und Applikationsmöglichkeiten



3.2.3 Elektrobiosynthese

Die Bioelektrokatalyse eröffnet die Möglichkeit, Biokatalysatoren stromgetrieben zu nutzen und verbindet somit in exklusiver Weise den Energiesektor mit dem der Biotechnologie. Dies kann zu exzellenten nachhaltigen Prozessen führen. Die Verwendung von Enzymen (Biokatalysatoren) erlaubt es, hochselektive Reaktionen unter milden Bedingungen sehr effizient in Elektrolyten durchzuführen. Zentrale Punkte der Bioelektrokatalyse sind bspw. die funktionale Immobilisierung von Enzymen oder Enzymkaskaden auf geeigneten Elektrodenoberflächen, der effektive Elektronentransfer sowie ein guter Stoffaustausch (wie die Zugänglichkeit des Substrats zum aktiven Zentrum des Enzyms und ein ungehindertes Wegdiffundieren des Produkts). Redox-Enzyme werden meist entweder durch direkten Elektronentransfer oder durch einen Mediator-vermittelten Elektronentransfer angetrieben. Solche Mediatoren sind kleine Moleküle, die Elektronen zwischen der Elektrode und dem Enzym hin- und hertransportieren können. Abbildung 3.2 zeigt schematisch das Prinzip der Bioelektrokatalyse unter Verwendung von CO₂ als Substrat.

Abbildung 3.2: Prinzip der Bioelektrokatalyse am Beispiel der Nutzung von CO₂



Wichtige Ziele für die Bioelektrokatalyse als Querschnittstechnologie sind das Auffinden prozessstabiler Enzyme, deren Herstellung in industriell relevanten Mengen, die Hochskalierung der Prozesse und die Entwicklung von Elektrodenarchitekturen, wie durch die Verwendung von Redox-aktiven, polymeren Hydrogelen. Aktuell sind die Bio-Prozesse nur durch einen erheblichen technischen Aufwand oder gar nicht realisierbar. In der Natur können Reaktionen durch Enzyme katalysiert werden. Die Bioelektrokatalyse mit momentan noch niedrigem TRL von 1–2 kann aufgrund ihrer Modularität und der enormen Diversität an verfügbaren Enzymen eine Schlüsseldisziplin der Zukunft werden. Dies gilt sowohl für den Bereich der nachhaltigen Chemie, aber auch gleichermaßen für die Biosensorik in den Bereichen der Wasser- und Umweltanalytik sowie der Gesundheit.

3.3 VORTEILE BIOLOGISCHER CCU-TECHNOLOGIEN

3.3.1 Gegenüber der natürlichen Fotosynthese

Biologische CCU-Verfahren basieren ebenso wie die natürliche Fotosynthese auf der Fähigkeit von Mikroorganismen und Pflanzen, CO₂ mithilfe von (Sonnen-)Energie in wertvollere Stoffe umzuwandeln. Der auf natürliche Weise durch Pflanzen recycelte Kohlenstoff wird von politischer und wirtschaftlicher Seite allerdings bessergestellt als der mit biotechnischen Verfahren erschlossene. Solche Verfahren weisen gegenüber der natürlichen Fotosynthese jedoch einige Vorteile auf: Zum einen können biotechnische Lösungen einen deutlich höheren Wirkungsgrad erzielen (Carus et al., 2020). Zum anderen entstehen bei der natürlichen Fotosynthese Zielkonflikte, wie z. B. Flächen- und Wasserverbrauch sowie negative Umwelteinflüsse durch Düngung. Außerdem ist nicht automatisch anzunehmen, dass das von der Pflanze recycelte Kohlenstoffdioxid ausschließlich atmosphärischen Ursprungs ist. Pflanzen unterscheiden nicht zwischen biogenem und fossilem CO₂, sondern nehmen den in der Luft vorhandenen fossilen Kohlenstoff ebenso auf und stoßen ihn am Ende ihres Lebenszyklus als fossiles CO₂ wieder aus. Biologische Technologien können das CO₂-Recycling der Pflanzen effizienter und unter geringerem Flächenverbrauch umsetzen. Biotechnologie ermöglicht es, zukünftig große Produktmengen aus recyceltem CO₂ herzustellen.

3.3.2 Gegenüber chemisch-physikalischen Technologien

Die Inhalte des folgenden Abschnitts beruhen überwiegend auf den Ergebnissen von Hüsing et al. (2021). Biotechnologische bzw. hybride Verfahren für das CO₂-Recycling bieten gegenüber chemisch-physikalischen Technologien zahlreiche Vorteile: Zunächst weisen biotechnologische Verfahren eine Überlegenheit bei der Herstellung langkettiger, höherwertiger Kohlenstoffverbindungen auf. Des Weiteren sind biologische Systeme toleranter hinsichtlich einer variablen Gaszusammensetzung und etwaiger Verunreinigungen. Sie sind zudem zur Selbstregeneration befähigt und haben einen geringeren Bedarf an seltenen Rohstoffen (Hüsing et al., 2021) sowie geringere Anforderungen an Temperatur und Druck (Zhu, 2019). Ein weiterer Vorteil von biotechnologischen Verfahren ist, dass das CO₂ in der Abluft nicht aufkonzentriert werden muss, sondern direkt verwendet werden kann (nova-Institut GmbH, 2013; Zhu, 2019). Biologische bzw. hybride Technologien stellen somit eine wichtige Ergänzung oder Kombinationsmöglichkeit für chemisch-physikalische Systeme dar.

3.4 Herausforderungen

Biologische CCU-Technologien weisen im Vergleich zur natürlichen Fotosynthese und chemisch-physikalischen Verfahren viele Vorteile auf. Es bestehen jedoch auch einige Schwierigkeiten. Diese lassen sich in technologiebezogene sowie „organisatorische“ Schwierigkeiten einteilen und werden in den folgenden Unterkapiteln genauer beschrieben.

3.4.1 Technologische Herausforderungen

Biologische Technologien haben einen geringen Ertrag des Zielprodukts, was dessen nachfolgende Abtrennung erschwert (Yuan et al., 2016). Hinzu kommt, dass die biologische CO₂-Umwandlung häufig langsam vonstattengeht (Zhu, 2019) (die pflanzliche Fotosynthese ist im Übrigen auch eine biologische CO₂-Umwandlung). Erfolgreiche biotechnologische Verfahren benötigen daher Enzyme oder Mikroorganismen mit hoher Selektivität, hohen Erträgen und schneller Stoffwechselform (Zhu, 2019). Die Resistenz und Langlebigkeit von Enzymen ist jedoch nicht ausreichend erforscht, wodurch es unter Realbedingungen zu Vergiftungen der Biokatalysatoren kommen kann (Yuan et al., 2016).

3.4.2 „Organisatorische“ Herausforderungen

„Organisatorische“ Schwierigkeiten ergeben sich zum einen aus dem geringen Bekanntheitsgrad biotechnologischer CO₂-Recyclings und zum anderen aus fehlenden Erfolgsbeispielen (Hüsing et al., 2021). Darüber hinaus ist der technische Reifegrad (TRL) zu wenig fortgeschritten (Hüsing et al., 2021) und die Übertragbarkeit effizienter Labortechnologien auf großtechnische Anwendungen noch nicht ausreichend getestet (Yuan et al., 2016).

Eine weitere Hürde stellt die fehlende/eingeschränkte gesellschaftliche Akzeptanz gentechnisch veränderter Mikroorganismen dar (Hüsing et al., 2021), die teilweise in biotechnologischen CCU-Verfahren zur Steigerung der Effizienz zum Einsatz kommen könnten. Dennoch ließen sich diese Organismen in den geschlossenen Systemen der Biotechnologie einfacher handhaben, als gentechnisch veränderte Pflanzen.

3.5 Bedeutung des biologischen CO₂-Recyclings auf Landesebene BW

Biologisches CO₂-Recycling ist bereits in der Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie als strategischer Ansatz verankert (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg [UM] & Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg [MLR], 2019). Konkret soll mit Maßnahme 20 biologisches bzw. bioinspiriertes CO₂-Recycling in Baden-Württemberg vorangetrieben werden, um durch Kreislaufwirtschaft den Kohlenstoff in Industrie und Produkten zu halten und so zu den Klimaschutzziele beizutragen (UM & MLR, 2019). Darüber hinaus wird auch im Entwurf für das Integrierte Energie- und Klimaschutzkonzept Baden-Württemberg das biologische CO₂-Recycling explizit als strategischer Ansatz aufgeführt. Als Teil des Handlungsfelds 7.2 der Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie „Bioökonomie in industriellen und urbanen Räumen“, das insbesondere auf die Nutzung sekundärer Rohstoffquellen mithilfe der Biologie abzielt, sollen die Entwicklung von biotechnologischen CCU-Verfahren weiter vorangetrieben und außerdem die entsprechenden Akteure vernetzt werden (UM, 2019). Dadurch wird der wachsenden Bedeutung von CO₂ als Wertstoff entsprochen, denn Kohlenstoff ist für die Grundstoffindustrie unverzichtbar (UM, 2019).

4

BRANCHENANALYSE UND KONZEPTENTWICKLUNG

4.1 KONZEPTENTWICKLUNG ALLGEMEIN

In den folgenden Unterkapiteln wird das allgemeine Vorgehen zur Konzeptentwicklung unabhängig der Industriebranche erläutert.

4.1.1 Bewertungskriterien

Dringlichkeit:

Maßgebend für eine zeitnahe Umsetzung von CCU-Technologien ist eine hohe Dringlichkeit zur Emissionsreduktion. Angewiesen wird diese durch den Gesetzgeber, insbesondere durch strengere Grenzwerte der Abgasströme sowie eine Bepreisung für den Ausstoß von Kohlenstoffdioxid. CO₂-Zertifikate werden sowohl im nationalen als auch im europäischen Emissionshandelssystem stetig teurer. Aufgrund internationaler Bestrebungen gegen den Klimawandel geraten große Kohlenstoffemittenten in den Fokus der Öffentlichkeit. Auch Anteilseigner und Kreditinstitute sehen zunehmend ihre langfristigen Investitionen in Gefahr. Im Zuge dessen sind die Unternehmen bestrebt, vorgeschriebene aber auch selbst gesteckte Nachhaltigkeits- und Klimaschutzziele schnell umzusetzen. Unternehmen haben sich schon zur klimaneutralen Zielen verpflichtet, zum Beispiel in der Initiative Science Based Targets oder dem Klimabündnis BW.

Motivation für CCU:

Die Motivation für den Einsatz innovativer Technologien zur Minimierung des Treibhausgasausstoßes, wie bspw. CCU, liegt zunächst in dem Bestreben zur Existenzsicherung in einem zukünftig klimaneutralen Markt. Weiterhin können die ökonomische Wertschöpfung von Syntheseprodukten sowie die Möglichkeit einer vergleichsweise einfachen, technischen Umsetzung am Standort Motivationstreiber sein. Sofern der Erlös durch produzierte Basischemikalien, wie bspw. Ethanol oder Acetat, die Energie und Betriebskosten einer biotechnologischen Anlage decken oder übersteigen, wird Emissions-

minderung sogar wirtschaftlich attraktiv für das Unternehmen. Dies hängt vor allem von der Art der Abgasströme sowie der Verfügbarkeit von kostengünstigem Strom ab. Bewertet werden auch die Einsparungen durch den Emissionshandel. Nachhaltige Produktionsverfahren sind zudem Teil der öffentlichen Wahrnehmung geworden und stellen nach wie vor einen Imagegewinn auf dem Kapitalmarkt dar. Toxisches Kohlenstoffmonoxid (CO) muss bislang aufwendig in einer Abgasnachbehandlung entfernt werden. Da dies jedoch ein wertvoller Rohstoff für die Synthesegasfermentation ist, kann es hierbei gleichzeitig entfernt und verwertet werden.

Notwendigkeit zur Integration des Kohlenstoffs in einen industriellen C-Kreislauf:

Der Klimawandel resultiert vorrangig aus der energetischen Nutzung von fossilem Kohlenstoff und der Freisetzung des entstehenden CO₂. Für Unternehmen, die prozessbedingt große Mengen an fossilem CO₂ emittieren und diese nicht oder nur schwer reduzieren können, ist die Notwendigkeit für CCU zur Integration des fossilen Kohlenstoffs in einen (neuen) industriellen C-Kreislauf besonders hoch.

Potenzial der Gasqualität für eine mikrobielle Nutzung (O₂-Konzentration):

Die verwendeten Mikroorganismen für die anaerobe Synthesegasfermentation sind unempfindlicher gegenüber Verunreinigungen durch Stickoxide, Schwefeloxide, Schwermetallen oder Kohlenwasserstoffe als z. B. Heterogenkatalysatoren. Dennoch kann es bei kritischen Konzentrationen dieser Inhaltstoffe zu Inhibierungen des Wachstums kommen. Schlussendlich können nur Vorab-Experimente mit realen Gaszusammensetzungen konkrete Aussagen über mögliche Wechselwirkungen mit der mikrobiellen Stoffwechselleistung geben. Es existiert eine Vielzahl acetogener Bakterien (Takors et al., 2018). Allen gemein ist jedoch ihre Sensitivität gegenüber Sauerstoff, weshalb dieser aus dem Gasstrom entfernt werden muss. Daneben gibt es O₂-tolerante Stämme

der Gattungen Oligotropha, Bradyrhizobium, Mesorhizobium, Hydrogenophaga, Burkholderia, Mycobacterium und Pseudomonas. Allerdings erfordert deren mikrobielle CO₂-Fixierung die gleichzeitige Verwendung von Wasserstoff und Sauerstoff, was im industriellen Maßstab signifikante sicherheitstechnische Anforderungen mit sich bringt. Im Folgenden wurden diese Mikroorganismen daher nicht weiter berücksichtigt. Für die eventuell erforderliche Reduktion des O₂-Gehalts werden nachfolgend mögliche technische Umsetzungen vorgestellt. Die präsentierten Fermentationsanlagen sollen alle kontinuierlich betrieben werden. Prinzipiell sind starke Schwankungen in der Abgaszusammensetzung nicht günstig. Anteile an Feststoffpartikeln oder zu hohe Gastemperaturen verringern ebenfalls die Gasqualität für die mikrobielle Umsetzung.

Einfachheit der praktischen Umsetzung (Einordnung in den vorhandenen Betrieb).

Bei den Betrieben muss die Bereitschaft für Investitionen in den Bau einer Produktionsanlage mit meist nicht vertrauter Technologie vorhanden sein. Am Standort müssen ausreichend Freiflächen neben der Abgasanlage bestehen, um die zusätzliche Infrastruktur installieren zu können. Entscheidend ist die Verfügbarkeit von kostengünstigem Wasserstoff bzw. Strom für dessen Synthese. Für die Abnahme und Aufbereitung der Basischemikalien müssen geeignete Partner gefunden werden. Synergie ergibt sich aus einer Kooperation mit Chemiekonzernen für die Bereitstellung von Energie und den Ankauf der Produkte.

Energie im Gas vorhanden:

Energetisch bevorzugt werden hohe CO- oder H₂-Gehalte im Abgasstrom. Ohne diese muss ausreichend preiswerter Strom oder Wasserstoff am Produktionsstandort vorhanden sein. Beide Faktoren sind die Grundvoraussetzung zur Reduktion von CO₂ für die Bildung von Produkten. Neben der Strom/H₂-Bereitstellung ist der notwendige Energieaufwand für den Betrieb der Anlage (Gaskompression vor Einleitung in den Bioreaktor, Betrieb der Produktaufarbeitung) zu beachten. Dieser wird in der nachfolgenden Betrachtung nicht explizit berücksichtigt, da u. U. Möglichkeiten zur Abwärmenutzung der meist hoch temperierten Abgase vor Ort individuell ausgenutzt werden können.

4.1.2 Möglichkeiten zur Sauerstoffentfernung

Grundsätzlich ist bei Prozessen mit strikt anaeroben Stämmen die Toxizität von Sauerstoff zu beachten. In Gegenwart von O₂ sind einzelne acetogene Isolate bestenfalls tolerant, zeigen aber in der Regel kein Wachstum auf CO₂ und H₂. Dies steht im Gegensatz zu aeroben carboxidotrophen Stämmen der Gattungen Oligotropha, Bradyrhizobium, Mesorhizobium, Hydrogenophaga, Burkholderia, Mycobacterium und Pseudomonas.

Abhängig von der Art der CO₂-Punktquelle können Sauerstoffkonzentrationen im Abgas bis zu 10 Vol.-% erreicht werden. Daher werden einige technische Möglichkeiten der Sauerstoffentfernung vorgeschlagen.

A) Partielle Oxidation in Abgasströmen mit relativ hohen O₂-Gehalten

Nach Zugabe von Methan wird in einer partiellen Oxidation (POX) dieses unterstöchiometrisch in dem Methan-Sauerstoff-Gemisch nur teilweise oxidiert, sodass neben Kohlenstoffmonoxid auch Wasserstoff entsteht (Reformer-Prozess). Es wird zwischen thermischer oder katalytischer Umsetzung unterschieden. Bei thermisch aktivierter POX laufen die Reaktionen bei 1.200 °C und höher ab. Bei katalytischer POX liegt die Temperatur bei 800 bis 900 °C. Katalysatoren können meist nur eingesetzt werden, wenn der Schwefelanteil unter 50 ppm liegt. Die POX Produkte CO und H₂ könnten theoretisch zur Kupfer/Zinkoxid/Aluminiumoxid-katalysierten Herstellung von Methanol verwendet werden. Alternativ kann das CO+H₂-Gemisch direkt dem O₂-abgereicherten Abgasstrom beigemischt werden, um die anaerobe CO₂-Umsetzung zu unterstützen. Die Firma Air Liquide¹¹ bspw. vertreibt POX Anlagen für Volumenströme von 250 m³/h bis über 100.000 m³/h. Hierbei müsste jedoch geklärt werden, welcher Methaneinsatz und welche Betriebstemperaturen (als Kostenfaktor) erforderlich wären, um die erforderliche Sauerstofffreiheit zu gewährleisten.

B) Sauerstoffentfernung im Abgas von Biogasanlagen

Um das Abgas aus Biogas-Anlagen in das Erdgasnetz einspeisen zu können, müssen Verunreinigungen inklusive Restsauerstoffgehalte eliminiert werden. Zur Entfernung der vergleichsweise geringen O₂-Gehalte eignet sich bspw. die Chemisorption oder die katalytische Sauerstoffentfernung. Eine Übersicht über verwendete Technologien ist in einer Studie des Fraunhofer-Instituts¹² gegeben. Diese Techniken könnten auch in anderen Abgasströmen eingesetzt werden.

B.1) Chemisorption am Kupferkontakt

Das Chemisorptionsverfahren wird zur Entfernung von Sauerstoff aus Gasen eingesetzt. Der im Prozessgas enthaltene Sauerstoff wird dabei an einem Kupferkontakt gebunden. Nach der Beladung muss der Kupferkontakt durch Spülung wieder mit Wasserstoff regeneriert werden. Ein kontinuierlicher Betrieb wird durch den Einsatz von zwei Reaktoren gewährleistet.

B.2) Katalytische Sauerstoffentfernung mittels Knallgas

Mithilfe von Pa- oder Pt-Katalysatoren wird die Knallgasreaktion kontrolliert durchgeführt, um mit dem hinzugegebenen Wasserstoff und dem enthaltenen Sauerstoff Wasser zu erzeugen. Ein Vorteil des Verfahrens ist die geringe erforderliche Temperatur. Das Verfahren ist allerdings sehr sensibel gegenüber Schwefelverunreinigungen.

4.2 FIRMENLISTE/BRANCHEN (IBVT)

Als mögliche Interessenten für die biobasierte CO₂-Fixierung wurden die nachfolgend aufgelisteten Akteure und Industrien in Baden-Württemberg ausgemacht. Es wurden sowohl energieintensive Prozesse mit fossil befeuerten Kraftwerken hervorgehoben, als auch Produktionsvorgänge, in denen Emissionen als Nebenprodukt von Syntheseprozessen auftreten. Als Teil eines Wertschöpfungskreises werden Unternehmen aus der chemischen Industrie ergänzend aufgeführt, welche die biotechnisch hergestellten Produkte abnehmen könnten. Die Firmen wurden hinsichtlich verschiedener Branchen eingeteilt. Wirtschaftlich bevorzugt ist ein CO-Abgasstrom oder die Verfügbarkeit von preiswertem Wasserstoff/Strom zur mikrobiellen CO₂-Reduktion. Neben Art und Menge des Abgasstroms erfolgte eine Bewertung auch hinsichtlich der Größe des Unternehmens, der lokalen Energieversorgung sowie etwaig formulierten Bestrebungen zur Reduktion von Emissionen. Nach einer Priorisierung der Firmen in den jeweiligen Branchen konnten die aussichtsreichsten Kandidaten ausgemacht werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgte eine

weitere Evaluation durch Kontaktaufnahme und Rücksprache mit diesen Betrieben.

Automobilzulieferer:

Baden-Württemberg weist eine besondere Stärke in der Automobilproduktion sowie den entsprechenden Zulieferbetrieben auf. Die Robert Bosch GmbH mit Hauptsitz in Stuttgart ist der weltweit größte Automobilzulieferer (Berylls Strategy Advisors, 2020). Durch energieeffiziente Systeme und regenerative Eigenenergieerzeugung konnte bereits 2020 die vollständige CO₂-Neutralstellung aller Standorte erreicht werden. Die Robert Bosch GmbH investiert auch zukünftig in die Förderung einer nachhaltigen Produktion (Robert Bosch GmbH, 2021). Ein weiterer motivierter Automobilzulieferer, der aber auch Produkte in anderen Industrieenanwendungen anbietet, ist die ZF Friedrichshafen AG. ZF möchte bis 2030 80 % seiner CO₂-Emissionen reduzieren. Unternehmen, die ebenfalls als Automobilzulieferer agieren, sind Mahle mit Sitz in Stuttgart sowie die Eberspächer Gruppe in Esslingen am Neckar.

Tabelle 4.1: Automobilzulieferer in Baden-Württemberg

Betrieb	Standort	Umsatz (in Mio. EUR)	Mitarbeiter*innen	Bemerkungen
ALLGAIER Werke GmbH	Uhingen	478	1.921	
Eberspächer Gruppe	Esslingen	4.700	weltweit 9.928	
ElringKlinger AG	Dettingen an der Erms	1.480	9.724	
IMS Gear SE & Co. KGaA	Donaueschingen	441	weltweit 3.116	
Mahle GmbH	Stuttgart	12.050	77.015	
Robert Bosch GmbH	Stuttgart	77.700	weltweit 394.500	
ZF Friedrichshafen AG	Friedrichshafen	32.600	weltweit 153.500	

¹¹ <https://industrie.airliquide.de/wasserstoffanlagen>

¹² <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-94887.html>

Kraftwerke:

Baden-Württemberg ist das Bundesland mit der zweithöchsten installierten Steinkohlekraftwerksleistung. In Ulm, Stuttgart und Mannheim sind zugleich thermische Abfallbehandlungsanlagen (TAB) angegliedert. Neben dem kennzeichnend hohen CO₂-Abgasstrom kann hier auch die Verwertbarkeit von CO geprüft werden. Die MVV Energie mit Sitz in Mannheim ist im Strom-, Wärme-, Gas- und Wassermarkt tätig. Durch den Bau und Betrieb von Windenergie und Biogasanlagen in ganz Deutschland ist bei MVV auch die Expertise für preiswerte

Wasserstoffsynthese gegeben. Zusätzlich wurde hier bereits eine Klimaschutzvereinbarung mit dem Land Baden-Württemberg unterzeichnet (MVV Energie AG, 2021). Als Teil des Mercedes-Benz-Werks in Sindelfingen liefert auch das Daimler-Heizkraftwerk elektrische Energie und Fernwärme. Betrieben wird dieses ausschließlich mit Erdgas. Jährlich werden ca. 256.000 t CO₂ und 45 t CO ausgestoßen (Stapmanns & Schuhl, 2019).

Tabelle 4.2: Kraftwerke in Baden-Württemberg

Betrieb	Standort	Umsatz (in Mio. EUR)	Mitarbeiter*innen	Bemerkungen
Daimler-Heizkraftwerk Sindelfingen	Sindelfingen	170.000	k. A.	256.100 t CO ₂ , 45 t CO
Grosskraftwerk Mannheim Aktiengesellschaft	Mannheim	750		
Heizkraftwerk Altbach/Deizisau	Altbach/Deizisau	(EnBW) 15.500	23.000	2,2 Mio. t CO ₂
Heizkraftwerk Pforzheim	Pforzheim	k. A.	k. A.	
Heizkraftwerk Ulm-Söflingen	Ulm	(Stadtwerke Ulm) 500	k. A.	
Heizkraftwerk West (Karlsruhe)	Karlsruhe	(Stadtwerke Karlsruhe) 600	k. A.	
Kraftwerk Heilbronn	Heilbronn	(EnBW) 15.500	23.000	3,4 Mio t CO ₂
Kraftwerk Marbach	Marbach a. N.	(EnBW) 15.500	23.000	Teil der EnBW
Kraftwerk Stuttgart-Münster	Stuttgart	(EnBW) 15.500	23.000	Teil der EnBW
Kraftwerk Walheim	Walheim	(EnBW) 15.500	23.000	Teil der EnBW
Müllheizkraftwerk Ulm-Donautal	Ulm	< 10	k. A.	TAB
MVV Energie AG	Mannheim	3.900	k. A.	TAB
Rheinhafen-Dampfkraftwerk Karlsruhe	Karlsruhe	(EnBW) 15.500	23.000	2,5 Mio t CO ₂
Wärmeverbundkraftwerk Freiburg (Cerdia)	Freiburg	(Cerdia) 550	800	0,1 Mio t CO ₂

Zementindustrie:

In der Zementindustrie besteht ein beträchtliches Potenzial für die Verwertbarkeit von Kohlenstoffdioxid: 2 % der deutschen und 8 % der globalen Treibhausgasemissionen werden durch die Zementherstellung verursacht (WWF Deutschland, 2019). Calciumoxid (CaO) wird aus Kalkstein gewonnen, der im Wesentlichen aus Calciumkarbonat (CaCO₃) besteht. Dieser wird gebrannt, wodurch CO₂ frei wird und das CaO übrigbleibt. Die Energie für die Entsäuerung wird zum Teil durch Kohle bereitgestellt (Verein Deutscher Zementwerke e. V. [VDZ], 2020a). In Baden-Württemberg werden Produktionsstandorte

von vier verschiedenen Herstellern betrieben. Einer davon, Heidelberg-Cement, zählt weltweit zu den größten Baustoffunternehmen. Mit einem Jahresumsatz von 830 Mio. EUR ist auch das familiengeführte Unternehmen SCHWENK Zement KG, mit Sitz und Produktion in Ulm, zu nennen. Die Verwertung von CO₂ könnte einen beträchtlichen Anteil leisten, um die selbst gesteckten Nachhaltigkeitsziele zu erreichen (SCHWENK Zement KG, 2021). Um den im Abluftstrom von Zementanlagen charakteristisch hohen Sauerstoffanteil zu reduzieren, sind technische Lösungen gefordert.

Tabelle 4.3: Zementindustrie in Baden-Württemberg

Betrieb	Standort	Umsatz (in Mio. EUR)	Mitarbeiter*innen	Bemerkungen
HeidelbergCement AG	Heidelberg	18.900	54.000	
LafargeHolcim Ltd.	Dotternhausen	25.000	73.000	
Märker Zement GmbH/ Märker Kalk GmbH	Lauffen/Blaustein	> 100	< 1.000	
Opterra (CRH-Tochter)	Karlsruhe	25.100	(CRH) 80.000	
SCHWENK Zement KG	Mergelstetten und Allmendingen	830	3.500	

Zellstoff-, Papier- und Kartonagenproduktion:

In Baden-Württemberg gibt es zahlreiche Unternehmen zur Zellstoff-, Papier- und Kartonagenproduktion. Neben namhaften großen Unternehmen gibt es eine Vielzahl kleiner und lokaler Betriebe. Am Standort Ehningen ist mit Sappi Limited mit Hauptsitz in Johannesburg ein international agierendes Großunternehmen vertreten. Das Werk in Ehningen mit 520

Mitarbeitenden produziert jährlich rund 280.000 t Papier. Die Energieversorgung ist durch ein eigenes Kraftwerk gegeben. Bereits jetzt stammt diese zu 86 % aus erneuerbaren Energieträgern. Mit rund 65 t CO Ausstoß jährlich kann dessen Wertbarkeit ebenfalls geprüft werden (Sappi Ehningen GmbH, 2020).

Tabelle 4.4: Zellstoffindustrie in Baden-Württemberg

Betrieb	Standort	Umsatz (in Mio. EUR)	Mitarbeiter*innen	Bemerkungen
Albert Köhler GmbH & Co. KG	Gengenbach	k. A.	95	Biomassekraftwerk
Edelmann Group	Heidenheim an der Brenz, Weilheim, Lindau	306	2.758	
Glatfelter Gernsbach GmbH & Co. KG	Gernsbach	866	650, (weltweit) 2.600	
Haisch Straub GmbH	Göppingen	k. A.	k. A.	
Rettenmaier & Söhne GmbH + Co. KG	Rosenberg	k. A.	(weltweit) 3.500	
JELU-Werk Josef Ehrler GmbH & Co. KG	Rosenberg	k. A.	k. A.	
Karl Kurz GmbH & Co. KG	Rosengarten	k. A.	k. A.	Erdgaskraftwerk
Koehler Kehl GmbH	Kehl	743	1.748	
Mayr-Melnhof Karton AG	Baiersbronn	2.300	2.337, (weltweit) 10.000	
Munksjö Dettingen GmbH	Dettingen an der Erms	k. A.	220	
Papierfabrik Carl Lenz GmbH & Co.	Wehr	k. A.	k. A.	
Sappi Ehningen GmbH	Ehningen	5.400	12.800	Gaskraftwerke; 315.100 t CO ₂ , 65 t CO
SCA Hygiene Products GmbH	Mannheim	(in Deutschland) 1.310	2.000, (weltweit) 3.600	
Smurfit Kappa Baden Board GmbH	Gernsbach	k. A.	k. A.	
Stora Enso Maxau GmbH	Karlsruhe	10.500	420, (weltweit) 26.151	Biomassekraftwerk
Texon Möckmühl GmbH	Möckmühl	k. A.	k. A.	

Glasherstellung:

Die Glasherstellung zählt zu den energieintensiven Produktionsverfahren. Die Energie, die für die Aufschmelzung von Recyclingglas und primären Rohstoffen notwendig ist, wird in den Glasschmelzwanen durch fossile Brennstoffe, überwiegend Erdgas und Strom bereitgestellt.

Die Verallia Deutschland AG, mit Hauptstandort Bad Wurzach, betreibt vier Standorte in Deutschland.

Zur Senkung von Emissionen wurde bereits vor mehreren Jahren von der Nutzung von schwerem Heizöl abgesehen und Wärmerückgewinnungsanlagen in Betrieb genommen.

Mit ihrem Standort Mannheim ist die SAINT-GOBAIN GLASS Deutschland GmbH als Repräsentant für den Bereich Building Glas (Herstellung von Flachglas) vertreten. Sie gehört zum internationalen Saint-Gobain Konzern mit Hauptsitz Paris.

Tabelle 4.5: Glasherstellung in Baden-Württemberg

Betrieb	Standort	Umsatz (in Mio. EUR)	Mitarbeiter*innen	Bemerkungen
J. WECK GmbH u. Co. KG	Wehr-Öflingen	39,5	k. A.	
SAINT-GOBAIN GLASS Deutschland GmbH	Mannheim	41.000	180.000	
Schuller GmbH	Wertheim	124	619	
Verallia Deutschland AG	Bad Wurzach	570	3.066	

Baumaterialien:

Die Bauindustrie emittiert jährlich enorme Mengen an Treibhausgasen. Vor allem die Herstellung von Baukalk und Ziegelsteinen ist sehr energieintensiv. Der Grundstoff dieser Produktionsverfahren ist Calciumcarbonat. Dies muss bei Temperaturen von 900 bis 1.200 °C gebrannt werden.

Abgasströme entfallen sowohl durch Befuerung der Hochöfen als auch während der chemischen Umwandlung durch Nebenprodukte. Zu den größten Vertretern gehört die Rheinkalk GmbH. Neben zahlreichen Standorten in ganz Deutschland wird auch in Efringen-Kirchen produziert.

Tabelle 4.6: Hersteller von Baumaterialien in Baden-Württemberg

Betrieb	Standort	Umsatz (in Mio. EUR)	Mitarbeiter*innen	Bemerkungen
Hans G. Hauri KG Mineralstoffwerke	Merdingen	k. A.	< 1.000	
Rheinkalk GmbH	Efringen-Kirchen	400	1.200	
Ziegelwerk Deisendorf GmbH	Überlingen	< 10	50	
Ziegelwerk Schmid GmbH & Co.	Bönnigheim	< 10	50	

Metallverarbeitende Betriebe:

Mit der Autoindustrie als Hauptabnehmer sind an verschiedenen Standorten in Baden-Württemberg auch metallverarbeitende Betriebe angesiedelt. Durch den Betrieb von Schmelzöfen sind Abgasströme dort lokal fokussiert. Genannt werden kann bspw. Constellium Singen GmbH. Als Produzent von Sekundär-Aluminium werden Walzerzeugnisse, Strangpressprodukte und Strukturbauteile hergestellt

(Constellium Singen GmbH, 2021). Für die Herstellung von Stahl wird in Baden-Württemberg kein Roheisen verwendet. Für die Schmelze von Sekundärmetallen werden Lichtbogenöfen eingesetzt. Größte Vertreter sind die Badischen Stahlwerke in Kehl sowie die Fondium Singen GmbH. Dabei wird Altschrott für die Produkte umgesetzt (Badische Stahlwerke GmbH, 2020).

Tabelle 4.7: Metallverarbeitende Industrie in Baden-Württemberg

Betrieb	Standort	Umsatz (in Mio. EUR)	Mitarbeiter*innen	Bemerkungen
Badische Stahlwerke GmbH; Daimler AG	Kehl	1.000	851	Lichtbogenofen
BEW Umformtechnik GmbH	Rosengarten	k. A.	200	
Constellium Singen GmbH	Singen (Hohentwiel)	5.700	1.500, (weltweit) 13.000	
Eisengiesserei Hans Dhonau e.K.	Triberg-Schonach	k. A.	k. A.	
Eisenmann Druckguss GmbH	Villingen-Schwenningen	k. A.	220	
Eisenwerk Würth GmbH	Bad Friedrichshall	k. A.	k. A.	
Fondium Singen GmbH	Singen (Hohentwiel)	4.570	950, (weltweit) 14.678	Lichtbogenofen
Heidelberg Manufacturing Deutschland GmbH	Amstetten	2.300	11.316	
KARCHER GUSS GmbH	Offenburg	4.600	35	
Karl Casper GmbH & Co. KG	Remchingen	k. A.	100	
MEIKO Eisengießerei GmbH	Ettenheim	k. A.	60	
Metallschmelzwerk Ulm GmbH	Ulm	k. A.	48	
Metalltechnik Schmidt GmbH & Co. KG	Filderstadt	k. A.	k. A.	
Moneva GmbH + Co. KG	Winterbach	k. A.	k. A.	
Novelis Inc.	Vogt	9.800	11.410	
SLR Giesserei St. Leon-Rot GmbH	St. Leon-Rot	k. A.	k. A.	

Chemische Industrie:

Vertreter der chemischen Industrie bewegen sich in ressourcenintensiven Feldern und können zugleich als Technologiepartner Fachwissen zu bioverfahrenstechnischen Anlagen sowie zur Abgasnachbehandlung bereitstellen. Zusätzlich sind sie Abnehmer und Verwerter von Basischemikalien. Evonik Industries AG produziert in Rheinfelden Chemikalien für Isolierschäume, Kieselsäuren, Lacke usw. Evonik nutzt sowohl biokatalytische wie auch fermentative Herstellungsprozesse. Im Bereich der chemischen Industrie ist die Firma BASF in

Ludwigshafen Weltmarktführer. Als eines der größten internationalen Chemieunternehmen wird hier zukünftig Infrastruktur zur Wasserstoffsynthese bereitgestellt. Die Firma Air Liquide in Grenzach-Wyhlen wiederum ist führend im Anlagenbau und besitzt Technologien für die Umsetzung von toxischem Sauerstoff im Abgasstrom. Cerdia Produktions GmbH und TIB Chemicals sind Abnehmer für Acetat. Als Ausgangsstoff für Ethylchlorid und Essigsäure wird Ethanol bei TIB Chemicals, der Brüggemann-Gruppe und Borregaard umgesetzt.

Tabelle 4.8: Chemische Industrie in Baden-Württemberg

Betrieb	Standort	Umsatz (in Mio. EUR)	Mitarbeiter*innen	Bemerkungen
Air Liquide S.A.	Grenzach-Wyhlen	22.000	66.000	Eigenes Kraftwerk
BASF SE	Ludwigshafen am Rhein	k. A.	k. A.	
Borregaard Deutschland GmbH	Karlsruhe	480	k. A.	Ethanolproduktion
Brüggemann-Gruppe	Heilbronn	120	220	
Cerdia	Freiburg	550	800	Direkte Acetat-weiterverarbeitung
DSM Nutritional Products GmbH (Koninklijke DSM N.V.)	Grenzach	10.000	23.000	Eigenes Erdgaskraftwerk
Evonik Industries AG	Rheinfelden (Baden)	k. A.	k. A.	
Fuchs Petrolub	Mannheim	2.600	k. A.	
Georg Oest Mineralölwerk GmbH & Co. KG	Freudenstadt	300	300	
Mineraloelraffinerie Oberrhein GmbH & Co. KG	Karlsruhe	4.500	5.500	
Sauerstoffwerk Friedrichshafen GmbH	Friedrichshafen	50	80	
Solvay Acetow GmbH (mittlerweile Cerdia)	Freiburg	550	800	
TIB Chemicals	Mannheim	120	500	

4.2.1 Zementindustrie

4.2.1.1 Motivation zur Emissionsminderung

Die Zementindustrie ist für 6 bis 7 % der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich (VDZ, 2020b). Allein in Deutschland wurden bei der Zementherstellung im Jahre 2019 20 Mio. t CO₂ freigesetzt (Deutsche Emissionshandelsstelle [DEHSt], 2020). Die Zementindustrie ist am europäischen Emissionshandel beteiligt (VDZ, 2020a). Zwar sind die spezifischen Emissionen pro Tonne Zement von ca. 580 kg CO₂ in den letzten Jahren leicht gesunken (VDZ, 2020a), allerdings steigen die Preise für CO₂-Zertifikate, wodurch sich der Druck zur Emissionsminderung erhöht. Hinzu kommt, dass im Rahmen des Bundes-Klimaschutzgesetzes vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513) eine Reduktion der CO₂-Emissionen von 186 in 2020 auf 140 Mio. t im Jahre 2030 vorgegeben ist. Auf diese Weise soll die Industrie ihren Beitrag zur Klimaneutralität Deutschlands leisten, die bis 2050 angestrebt wird (Arbeitsgruppe IK III 1, 2019). Die Motivation zur Emissionsminderung ist in der Zementindustrie hoch, denn 60 % ihrer CO₂-Emissionen sind rohstoffbedingt (VDZ, 2020a). Diese Emissionen können somit nicht durch energiebezogene Maßnahmen reduziert werden. Für die Emissionen aus der Energiebereitstellung ist das Potenzial zur Emissionseinsparung gering, da die erreichten thermischen Effizienzgrade zwischen 70 und 80 % (VDZ, 2019) bereits sehr hoch sind (VDZ, 2020b). Der elektrische Energiebedarf wiederum entspricht lediglich 10 bis 15 % (VDZ, 2019) und die mögliche Emissionseinsparung ist hier somit ebenfalls gering. Es müssen langfristige Lösungsansätze für eine Reduktion der rohstoffbedingten Emissionen entwickelt werden, denn diese setzen der gesamten CO₂-Minderung Grenzen (VDZ, 2019).

4.2.1.2 Möglichkeiten der Einsparung

Es gibt verschiedene Ansatzpunkte, um bei der Zementherstellung Emissionen einzusparen. Der effiziente Einsatz von Klinker und Zement entlang der Wertschöpfungskette ist essenziell (VDZ, 2020b). Eine Möglichkeit stellt hierbei die Verringerung der Kalkstein-Menge im Klinker dar, denn während des Brennprozesses reagiert der Kalkstein (CaCO₃) zu gebranntem Kalk (CaO) und CO₂ und setzt somit Emissionen frei (L. Müller et al., 2020). Der Einsatz alternativer Rohstoffe, die bereits entsäuert sind, kann die CO₂-Bilanz verbessern (VDZ, 2020b). Eine weitere Option zur Emissionsminderung stellt der reduzierte Einsatz von Klinker im Zement dar, wobei durch den Ersatz von Klinker durch alternative Stoffe der Ausstoß von CO₂ verringert werden kann (VDZ, 2019). Um die brennstoffbezogenen Emissionen zu senken, ist eine weitgehende Substitution von Primärbrennstoffen durch alternative Brennstoffe, wie bspw. Klärschlamm oder Kunststoffabfälle (VDZ, 2019). Dabei ist neben der energetischen auch eine werkstoffliche Verwertung möglich (L. Müller et al., 2020). Im Jahre 2019 lag der Anteil der alternativen Brennstoffe in der Zementindustrie bereits bei

rund 70 % (VDZ, 2020a). Um die Energieeffizienz zu steigern, bietet sich die Nutzung anfallender Abwärme an. Dies wird in der Zementindustrie bereits im Rahmen einer Abwärmenutzung zur Trocknung alternativer Roh- und Brennstoffe sowie zum Vorwärmen der Verbrennungsluft umgesetzt (VDZ, 2020b). Gemäß VDZ (2020b) werden weitergehende Maßnahmen wie der Einsatz von CCU-Technologien zukünftig eine entscheidende Rolle zur Minderung von CO₂-Emissionen spielen, zuerst sollen aber herkömmliche Potenziale und Verfahren ausgenutzt werden.

4.2.1.3 Bestehende Forschungsvorhaben zum Klimaschutz

Zusätzlich zur Substitution von Primärbrennstoffen durch alternative Brennstoffe, die bereits seit Jahrzehnten betrieben wird (VDZ, 2019), zielt die Zementindustrie durch verschiedene weitere Vorhaben auf die Reduktion der CO₂-Emissionen ab. Bereits im Jahre 2002 wurde die Nachhaltigkeitsinitiative „Zement verbindet nachhaltig“ gegründet, die auch eine Senkung der CO₂-Emissionen beabsichtigt (VDZ, 2019). Dies kann mit CO₂-effizienteren Zementen gelingen, die eine Reduzierung des Klinker-Zement-Faktors von derzeit 71 % auf 53 % in 2050 bewirken (VDZ, 2020b). Der Zementhersteller CEMEX Deutschland AG bringt derweil Betone auf den Markt, die einen deutlich geringeren CO₂-Fußabdruck als herkömmlicher Beton haben (Cemex, 2020).

Da 60 % der Emissionen rohstoffbedingt sind und deren Reduktion beschränkt ist, forscht die Zementindustrie seit Langem an Möglichkeiten zur CO₂-Abscheidung mit dem Ziel der langfristigen Speicherung (CCS) oder Verwertung (CCU) (VDZ, 2020b). Dabei gibt es verschiedene Verfahren für die Abscheidung von Kohlenstoffdioxid aus dem Produktionsprozess: Der Oxyfuel-Prozess nutzt für den Verbrennungsprozess statt Luft reinen Sauerstoff, wodurch die Konzentration von CO₂ im Abgas deutlich steigt (Hoenig et al., 2012). Der Aufwand zur weiteren Aufkonzentrierung und Abscheidung ist dadurch gering (ebd.). Das Produkt kann direkt weiterverwendet oder gespeichert werden (VDZ, 2020b). Die Sauerstoffherstellung in Luftzerlegungsanlagen führt jedoch zu einem höheren Bedarf an elektrischer Energie (ebd.). Nichtsdestotrotz stellt der Oxyfuel-Prozess einen Meilenstein auf dem Weg zur CO₂-freien Zementherstellung dar, weswegen seine praktische Umsetzung bereits initialisiert wurde: Das Joint Venture Cement Innovation for Climate (CI4C), bestehend aus vier Zementherstellern, baut derzeit einen Ofen im industriellen Maßstab, der das Oxyfuel-Verfahren einsetzt (L. Müller et al., 2020).

Die Post-Combustion-Technologie greift im Gegensatz zum Oxyfuel-Verfahren nicht in den Verbrennungsprozess ein, sondern scheidet das CO₂ aus dem Abgasstrom ab (VDZ, 2020b). Aufgrund des hohen Volumenstroms und der geringen

Konzentration an CO₂ sind hohe Investitions- und Betriebskosten erforderlich (L. Müller et al., 2020). Bestehende Öfen können konstruktiv nicht zum Oxyfuel-Verfahren umgebaut werden. Für dieses Verfahren muss Stand heute ein neuer Ofen gebaut werden.

Ein weiteres Verfahren zur Abscheidung von CO₂ aus Abgasen ist das sogenannte Calcium-Looping, bei dem Branntkalk (CaO) als Sorptionsmittel verwendet wird (Dean et al., 2011). Er wird durch die Erhitzung von Kalkstein (CaCO₃) in einem separaten Ofen erzeugt (VDZ, 2020b). Der Branntkalk wird dann in den Drehrohrofen eingebracht und absorbiert dort CO₂ (ebd.). Durch die Karbonatisierung entsteht aus CaO und CO₂ wieder Kalkstein (CaCO₃) (Blamey et al., 2010); der Loop ist geschlossen.

Eine weitere, kleinskalige Lösung zur Reduktion von CO₂-Emissionen bei der Zementherstellung ist der Ersatz von Portlandzementklinker durch alternative Bindemittelsysteme (z. B. Celiment®) (VDZ, 2020b). Im Vergleich zu herkömmlichem Portlandzementklinker können dabei mindestens 30 % der CO₂-Emissionen eingespart werden (L. Müller et al., 2020; VDZ, 2020b). Verantwortlich für die Minimierung der CO₂-Emissionen ist der geringere Kalksteinverbrauch (L. Müller et al., 2020).

4.2.2 Thermische Abfallbehandlung

4.2.2.1 Motivation zur Emissionsreduzierung

Thermische Abfallbehandlungsanlagen sind wichtige Einrichtungen unserer Zivilisation (Stöckmann & Bertau, 2020). Im Jahre 2017 wurden rund 48 Mio. t Abfall thermisch verwertet, davon etwa 52 % in thermischen Abfallbehandlungsanlagen (Statistikportal, 2020). Dabei wird thermische und elektrische Energie bereitgestellt: 9,5 TWh Fernwärme und 10,1 TWh Strom im Jahre 2019 (Franken & Weller, 2020). Ein typischer Siedlungsabfall enthält je zur Hälfte biogenen und fossilen Kohlenstoff (Huneke et al., 2017; Stöckmann & Bertau, 2020; Strogies & Gniffke, 2020), bei dessen Verbrennung insgesamt eine Tonne CO₂ entsteht (Interessensgemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e. V. [ITAD] & Verband kommunaler Unternehmen e. V. [VKU], 2020). Dieser Emissionsfaktor deckt sich mit den Ergebnissen einer Literaturstudie von dem United Nations Environment Programme (2019), der zufolge 250 bis 600 kg fossiles CO₂ pro Tonne verbrannten Abfalls freigesetzt werden. Mit Bezug auf die gewonnene Energie werden bei der thermischen Abfallbehandlung 288 g fossiles CO₂ pro kWh freigesetzt (LfU Brandenburg, 2018). Da 50 % des Abfalls biologisch abbaubar sind, gilt der entsprechende Teil der Energie als erneuerbar; die gesamte erzeugte Energie wird als CO₂-neutral gehandhabt, da die entstehenden Emissionen dem Produkt zugeschrieben werden (Huneke et al., 2017). Dem ungeachtet wurden im Jahre 2018 in Deutschland 9,4 Mio. t CO₂-eq von thermischen Abfallbehandlungsanlagen freigesetzt (Deutscher Bundestag,

2020). Diese werden bisher weder vom europäischen (EU ETS) noch vom nationalen Emissionshandelssystem (nEHS) erfasst, denn bei der thermischen Abfallbehandlung steht nicht die Energiegewinnung im Vordergrund; vielmehr handelt es sich dabei um eine effiziente Behandlungsmethode für Siedlungsabfälle. Abfälle sind daher keine Brennstoffe im Sinne des Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG) (ITAD & Bundesverband Deutscher Sonderabfallverbrennungsanlagen e. V. [BDSAV], 2021). Eine Aufnahme in das nEHS wird jedoch diskutiert (Euwid, 2020). Die Emissionen aus thermischen Abfallbehandlungsanlagen werden im nationalen Inventarbericht zum deutschen Treibhausgasinventar im Sektor Energie ausgewiesen (Strogies & Gniffke, 2020). Der Naturschutzbund Deutschland e. V. (NABU) sowie der Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V. (bsve) sprechen sich für die Aufnahme von thermischen Abfallbehandlungsanlagen in den nationalen Emissionshandel aus (Jedelhauser & Roth, 2020; Rehbock & Habel, 2020). Als positiver Effekt wird eine ökologische Lenkungswirkung durch höhere Verbrennungspreise erwartet und daraus resultierend ein stärkeres Bestreben, den Abfall möglichst weitgehend zu recyceln (Rehbock & Habel, 2020; Schröder, 2021). Die Bepreisung von CO₂-Emissionen von thermischen Abfallbehandlungsanlagen wird von verschiedenen Stellen auch deshalb als sinnvoll erachtet, da sie eine End-of-Pipe-Lösung darstellt: Die Zahl der Anlagen ist überschaubar und die Umsetzung dort deutlich einfacher, als am Produkt anzusetzen, dessen Verwertungsweg noch unbekannt ist (Rehbock & Habel, 2020; Schröder, 2021). Die ITAD, der Bundesverband Deutscher Sonderabfallverbrennungsanlagen e. V. sowie der Verband kommunaler Unternehmen e. V. (VKU) hingegen kommen zu dem Schluss, dass die Bepreisung der thermischen Abfallbehandlung keine Lenkungswirkung hinsichtlich eines veränderten Verbraucher- bzw. Verursacherverhaltens für stärkere Abfallvermeidung erziele (ITAD & BDSAV, 2021; ITAD & VKU, 2020). Außerdem würde sich das für die Minderung von Treibhausgasemissionen wichtige Recycling durch die Aufnahme von TABs in das BEHG stark verteuern (ITAD & VKU, 2020). Auch vor rechtlichem Hintergrund wird die vollständige Einbeziehung der thermischen Abfallbehandlung in das BEHG als fragwürdig erachtet (Treder & Gehring, 2020).

4.2.2.2 Möglichkeiten der Einsparung

Laut Franken und Weller (2019) ist die unmittelbare Verringerung des Ausstoßes von Treibhausgasen bei der thermischen Abfallbehandlung kaum möglich. Da der Kohlenstoff im thermisch behandelten Abfall zu 50 % aus fossilen Quellen stammt (Stöckmann & Bertau, 2020), könnte eine direkte Einsparung lediglich durch eine Reduktion der Abfallvolumina oder durch eine Beendigung der Nutzung fossilen Kohlenstoffs in vorgelagerten Produkten realisiert werden. Aber auch die Verbrennung der im Abfall enthaltenen Biomasse trägt zum CO₂-Ausstoß bei. Da die Höhe der Emissionen vor allem vom

Anteil des Kunststoffes im Abfall abhängt, würde der Ersatz petrochemischer Rohstoffe durch biogene und/oder recycelte (CCU) Kohlenstoffquellen zur Klimaneutralität der thermischen Abfallbehandlung führen (ITAD, 2020). Indirekt ist eine Emissionsminderung durch Maßnahmen zur Effizienzsteigerung möglich (Franken & Weller, 2019). Dazu können technische Maßnahmen bei der Verbrennung, bei der Dampferzeugung und -nutzung sowie bei der Gasreinigung umgesetzt werden (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2007).

4.2.2.3 Bestehende Forschungsvorhaben zum Klimaschutz

Thermische Abfallbehandlungsanlagen wurden über Jahrzehnte hinweg laufend optimiert, um so strengsten Anforderungen an den Umweltschutz gerecht zu werden (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2007). Darüber hinaus werden inzwischen auch Lösungen zur CO₂-Abscheidung mit anschließender Nutzung (CCU) umgesetzt, bspw. zur Herstellung von Methanol an der thermischen Abfallbehandlungsanlage Zella-Mehlis (Franken & Weller, 2019; MDR Thüringen, 2020). Des Weiteren besteht die Möglichkeit, bei geringer Nachfrage den erzeugten Strom zur Herstellung von Wasserstoff zu nutzen (Franken & Weller, 2020), wie das bei der von der Abfallwirtschaftsgesellschaft Wuppertal betriebene thermische Abfallbehandlungsanlage bereits der Fall ist (Franken & Weller, 2019). Bei der Nutzung von Wasserstoff in Fahrzeugen können herkömmliche Kraftstoffe ersetzt werden. Die Interessensgemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland (ITAD) betreibt ihre Geschäftsstelle seit 2014 klimaneutral und setzt sich mit den Themen CO₂-Abscheidung (ITAD, 2019) und -Kompensation (KlimaManufaktur, 2019) auseinander. Darüber hinaus unterstützt sie seit 2019 die Stiftung Allianz für Entwicklung und Klima und hat den Verein Klimaschutz durch Kreislaufwirtschaft gegründet (ITAD, 2019).

4.2.3 Automobilindustrie

4.2.3.1 Motivation zur Emissionsreduzierung

Auf die Automobilindustrie als Schnittstelle zwischen Industrie und Verkehr kommen mit Blick auf die angestrebte Klimaneutralität bis 2050 große Herausforderungen zu. Gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513) müssen beide Sektoren ihre Emissionen bis zum Jahre 2030 deutlich reduzieren. Die Automobilindustrie nimmt im Kontext der in dieser Studie betrachteten Industriebranchen eine Sonderstellung ein, da ein Großteil der Emissionen während der Nutzungsphase des Produkts freigesetzt wird. So entstehen bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor nur 15 bis 20 % der Gesamtemissionen bei der Produktion (Brüninghaus, 2012; VCÖ, o. J.). Für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEV) liegen diese mit 27 bis 77 % beträchtlich höher,

wie eine Literaturstudie von Agora Verkehrswende (2019) ergab. Auch absolut sind die Kohlenstoffdioxidemissionen bei der Herstellung und Entsorgung von Elektroautos höher als die herkömmlicher Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren; so ermittelten Kreck et al. (2019) unter Realbedingungen einen mehr als doppelt so hohen CO₂-Ausstoß bei der Produktion und Entsorgung von Elektroautos im Vergleich zu Pkw mit Verbrennungsmotoren. Die Gesamtemissionen von Elektrofahrzeugen hängen jedoch vom CO₂-Fußabdruck des eingesetzten Strommixes ab, sodass bei der Verwendung von Strom aus 100 % erneuerbaren Energien eine deutliche Reduktion der Klimawirkung erzielt werden kann. Für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren besteht diese Option zumindest für die Nutzungsphase nicht, da bei der Verbrennung fossiler Kraftstoffe klimaschädliches CO₂ freigesetzt wird. Um den Einfluss auf das Klima dennoch zu begrenzen, gelten seit Jahren EU-weite Flottenziele; für 2020 lag dieses bei 95 g/km und soll in den kommenden Jahren weiter verschärft werden (Europäische Union, 2019). Hinzu kommt, dass seit 2021 unter anderem die Brennstoffe Benzin und Diesel dem nationalen Emissionshandel unterliegen und somit eine CO₂-Abgabe fällig wird, was sich wiederum auf die Preise der Brennstoffe auswirkt (Bolay et al., 2020). Schärfere Emissionsgrenzwerte und steigende CO₂-Preise sorgen dafür, dass Verbrennungsmotoren auch für Hersteller zunehmend unattraktiver werden (Ulrich, 2020) und vermehrt über ein entsprechendes Verbot diskutiert wird.

4.2.3.2 Möglichkeiten der Einsparung

Der Druck zur Einsparung von Emissionen in der Automobilindustrie beschränkt sich nicht allein auf die Hersteller. Vielmehr werden auch Zulieferer zunehmend in die Pflicht genommen (Stich, 2020). Möglichkeiten stellen die Steigerung der Energieeffizienz sowie der Ersatz fossiler durch biogene Brennstoffe bzw. die bevorzugte Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien dar. Für die Hersteller selbst ist eine Reduktion der Emissionen aus der nachgelagerten Nutzungsphase entscheidend. Dabei wäre neben dem Einsatz synthetischer Brennstoffe auch ein vollständiger Umstieg auf Elektrofahrzeuge ein möglicher Lösungsansatz, wenn der dafür benötigte Strom aus erneuerbaren Energien stammt.

4.2.3.3 Bestehende Forschungsvorhaben zum Klimaschutz

Einige Automobilhersteller wie Volkswagen und Audi haben angekündigt, bis 2050 klimaneutral agieren zu wollen (Audi AG, 2020; Volkswagen AG, 2019). Automobilzulieferer Bosch konnte sich mithilfe von Kompensationen bereits 2020 klimaneutral stellen, will diese jedoch zugunsten einer tatsächlichen Einsparung durch mehr Energieeffizienz und den Einsatz von erneuerbaren Energien verringern

(Robert Bosch GmbH, 2021). Auch Continental, ein weiterer großer Automobilzulieferer, hat es sich zum Ziel gesetzt, bis 2050 Klimaneutralität für die gesamte Wertschöpfungskette zu erreichen (Continental, 2020). Zusätzlich kommen immer mehr neue BEV-Modelle auf den Markt (Hahn, 2020). Auch der Verband der Automobilindustrie (VDA), dem zahlreiche Unternehmen aus der Automobilbranche angehören, reagiert auf den zunehmenden Druck hin zu mehr Klimaschutz. So soll die Mobilität in Deutschland laut Präsidentin Hildegard Müller bis spätestens 2050 klimaneutral sein (Verband der Automobilindustrie [VDA], 2020). Zu diesem Zweck wird die VDA-Klimastrategie 2050 ausgearbeitet (ebd.).

4.2.4 Glasindustrie

4.2.4.1 Motivation zur Emissionsreduzierung

Die Glasherstellung ist sehr energieintensiv (Leisin, 2019). Der Großteil des Energiebedarfs ist auf die Prozesswärme zurückzuführen (Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft [FfE], 2018; Guminski et al., 2019), die hauptsächlich durch Erdgas bereitgestellt wird (Leisin, 2019). Insgesamt wurden bei der Glasherstellung im Jahr 2015 in Deutschland rund 5 Mio. t CO₂ freigesetzt (Leisin, 2019). Diese Emissionen sind überwiegend energiebedingt: je nach Art des Glases sind bei Gesamtemissionen zwischen 440 und 850 kg CO₂ pro Tonne Glas 71 % bis 92 % auf die Verbrennung von Energieträgern zurückzuführen (Schmitz et al., 2011). Allen Glassorten ist aber gemein, dass die Emissionen vor allem durch den Schmelzvorgang verursacht werden (Leisin, 2019). Prozessbedingte Emissionen entstehen durch die Zersetzung der Carbonate (Schaeffer & Langfeld, 2020). Glasherstellende Betriebe werden vom europäischen Emissionshandel erfasst (Europäische Kommission, 2016) und sind demnach zum Kauf von CO₂-Zertifikaten verpflichtet. Da die Preise für CO₂-Zertifikate immer weiter steigen und mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513) auch national der Druck zur Senkung von Treibhausgasemissionen weiter erhöht wird, steigt auch die Motivation zur Emissionsreduzierung.

4.2.4.2 Möglichkeiten der Einsparung

Aufgrund des hohen Anteils energiebedingter Emissionen zielen bisherige Maßnahmen vor allem darauf ab, die Energieeffizienz zu verbessern, um so Energie einsparen und Emissionen reduzieren zu können. Guminski et al. (2019) nennen hierzu verschiedene Möglichkeiten, wie bspw. die Gemenge- und Scherbenvorwärmung sowie ein optimiertes Brennerdesign. Des Weiteren führt auch das Glasrecycling bzw. der Einsatz von Sekundärrohstoffen zu einer Reduktion des Energiebedarfs beim Schmelzen und damit der Emissionen (Schaeffer & Langfeld, 2020). Der Anteil von recycelten Scherben bei der Glasherstellung ist jedoch von den Qualitätsanforderungen und somit von der Glassorte abhängig: Flachglas hat höhere

Qualitätsanforderungen als bspw. Behälterglas, weshalb ein geringerer Recyclinganteil an Scherben eingesetzt werden kann (Guminski et al., 2019). Weitere Möglichkeiten zur Minimierung der energiebedingten Emissionen sind der Einsatz von erneuerbarer elektrischer Energie sowie von synthetischen oder biogenen Gasen statt Erdgas zur Bereitstellung der thermischen Energie (Leisin, 2019). Letztere Maßnahme hat zudem den Vorteil einer größeren Unabhängigkeit vom Import fossiler Energieträger (ebd.). Der Einsatz alternativer Energieträger bietet jedoch neben Chancen zur Emissionsreduktion auch einige Herausforderungen. Zum einen kann die Gasqualität von biogenen Brenngasen oftmals nicht gewährleistet werden, was Probleme bei der Glasschmelze verursachen kann (Leisin, 2019). Zum anderen sind mit dem Einsatz alternativer Energieträger höhere Betriebskosten verbunden, wodurch die Wettbewerbsfähigkeit der Branche beeinträchtigt und möglicherweise mehr Glas aus Ländern mit geringeren Umweltstandards importiert wird (ebd.). Als End-of-Pipe-Lösungen zur Emissionsreduktion führt (Leisin, 2019) mit Hinblick auf die prozessbedingten Emissionen bei der Glasherstellung das CO₂-Recycling (CCU) sowie die CO₂-Speicherung (CCS) auf.

4.2.4.3 Bestehende Vorhaben zum Klimaschutz

Der spezifische CO₂-Fußabdruck von Glas konnte in den letzten Jahrzehnten bereits signifikant gesenkt werden (Schaeffer & Langfeld, 2020). Der Recyclinganteil im Bereich Behälterglas, der nahezu 60 % der gesamten produzierten Glasmenge im Jahre 2015 ausmachte, ist bereits jetzt sehr hoch und liegt zwischen 65 % und 90 % des Gemenges (Leisin, 2019). Der Bundesverband Glasindustrie e. V. (BV Glas), der beinahe alle Behälter- und Flachglashersteller in Deutschland vertritt (Strogies & Gniffke, 2020), nahm am Dialogforum „Wirtschaft macht Klimaschutz“ teil. Darüber hinaus konnte er durchsetzen, dass die Glasindustrie als eine von acht Fokusbranchen im Vorhaben „Energiewende in der Industrie – Potenziale, Kosten und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie ausgewählt wurde (Bundesverband Glasindustrie e. V. [BV Glas], 2020). Im Rahmen dieses Vorhabens sollen industriespezifische Konzepte für die weitgehende Dekarbonisierung der Industrie bis 2050 erarbeitet werden (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi], 2019). Gemeinsam mit dem Gas- und Wärme-Institut (GWI) Essen untersucht der BV Glas im Projekt „HyGlass“ außerdem die Möglichkeit zur Nutzung grünen Wasserstoffs als Brennstoff für die Glasherstellung (IN4climate.NRW GmbH, o. J.). Dadurch könnten deutschlandweit über 3 Mio. t CO₂ eingespart werden (ebd.).

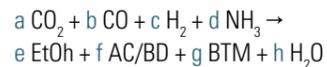
4.3 WIRTSCHAFTLICH-TECHNISCHE RAHMENBEDINGUNGEN

Die wirtschaftlich-technischen Rahmenbedingungen werden nur für die Gasfermentation und Algentechnologie ermittelt, da der TRL für diese größer und die Technologien somit näher an der praktischen Umsetzung sind als die Elektrosynthese.

4.3.1 Gasfermentation (IBVT)

Im Folgenden wird eine Abschätzung der aufzuwendenden Kosten sowie der erwartbaren Erlöse gegeben. Die Kosten werden im Wesentlichen durch den Einsatz von Wasserstoff als Edukt bestimmt, wohingegen Erlöse durch den Verkauf der Produkte erzielt werden. Die Kosteneinsparung, die sich aus dem geringeren Bedarf an CO₂-Zertifikaten ergibt, wird ebenfalls berücksichtigt. Die Kalkulation wird für Ethanol (EtOH) sowie Acetat (AC) oder 2,3-Butandiol (BD) als Hauptprodukte durchgeführt. Weiterhin wird auch Biomasse (BTM) durch den Eduktverbrauch synthetisiert.

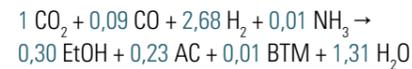
Grundlegend wird eine stöchiometrische Bilanz aufgestellt, welche die wesentlichen Edukte und Produkte in ein Verhältnis setzt:



Die benötigten Koeffizienten werden durch weitere Gleichungen wie Elementebilanz und Reduktionsgrad sowie durch in Fachartikeln (Heffernan et al., 2020; Hermann et al., 2020) veröffentlichte Werte für Biomasse- und Produktausbeuten bestimmt. Konkrete Daten wurden für drei unterschiedliche Szenarien der Gaszusammensetzung bzw. Produzentenstämme ermittelt.

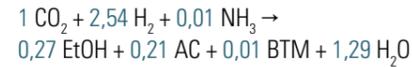
Gasmix a):

CO₂ + H₂ + Spuren CO; C. autoethanogenum heff (Heffernan et al., 2020)



Gasmix b):

CO₂ + H₂; C. autoethanogenum (Heffernan et al., 2020)



Gasmix c):

30 % CO₂ + 5 % H₂ + 55 % CO + 10 % Argon; C. ljungdahlii (Hermann et al., 2020)



Hieraus ergeben sich die in Tabelle 4.9 dargestellten C-mol Ausbeuten für die drei Fälle.

Tabelle 4.9: Produktausbeuten für verschiedene Gasfermentationen

Szenarien	Y _{H₂/C} (mol/mol)	Y _{EtOH/C} (C-mol/C-mol)	Y _{AC,BD/C} (C-mol/C-mol)	Y _{Produkt/C-mol} (C-mol/C-mol)
Fall a)		2,68	0,60	0,46 (durch CO-Aufnahme) 1,06
Fall b)		2,54	0,54	0,42 0,96
Fall c)		0,19	0,26	0,12 0,38

Als weiterer Schritt werden die Kosten für die benötigten Mengen an Wasserstoff basierend auf der Stöchiometrie abgeschätzt. Die Kostenberechnung für die Bereitstellung von Wasserstoff unterliegt dabei folgenden Annahmen:

- > Die Synthese erfolgt durch Elektrolyse, wobei flüssiges Wasser zugeführt wird. Der entstehende Wasserstoff wird gasförmig dem nachgeschalteten Bioprozess zugeführt. Die erforderliche Reaktionsenthalpie für die Spaltung des flüssigen Wassers und zur Überführung in gasförmigen Wasserstoff entspricht dabei gerade dem Brennwert von Wasserstoff, HHV (Smolinka et al., 2011). Hierfür gilt der Zusammenhang

$$\epsilon = \frac{n \cdot \text{HHV}}{P_{\text{el}}}$$

wobei ϵ den Wirkungsgrad, P_{el} die zugeführte elektrische Leistung und n den resultierenden Wasserstoffmengenstrom beschreibt. Der Brennwert von Wasserstoff beträgt 78,8 kWh pro kmol (H₂) (Bertuccioli et al., 2014).

- > Es wird ein Wirkungsgrad von 90 % angenommen. Dementsprechend werden 90 % der zugeführten elektrischen Energie genutzt, um flüssiges Wasser zu spalten und in gasförmigen Wasserstoff zu überführen.
- > Die gesamte erforderliche Energie wird durch elektrische Energie bereitgestellt.
- > Stromkosten werden mit einer Preisspanne von 0,03–0,1 EUR/kWh zu Grunde gelegt.

- > Zusätzliche Prozesskosten werden in zwei Szenarien in Höhe von 30 bzw. 70 %, bezogen auf die Stromkosten, berücksichtigt. Diese Zuschlagskalkulation ist motiviert durch eine ähnliche Vorgehensweise für die mikrobielle Herstellung zuckerbasierter Grundstoffe. Dort kann für die Abschätzung der Herstellkosten derartiger Commodities der Faktor 2 basierend auf den Substratkosten angenommen werden. Da es sich hierbei um aufwendigere aerobe Prozesse handelt, wurde für die apparativ und technisch einfacheren anaeroben Prozesse der Faktorbereich 1,3–1,7 untersucht. 1,3 repräsentiert dabei sicherlich eine Best-case-Annahme. Implizit wurde auch davon ausgegangen, dass die zu verwertenden Abgase eine hohe Temperatur >100 °C aufweisen. Diese Wärme könnte gut genutzt werden, um die Produkte Ethanol und Acetat über thermische Trennprozesse, wie z. B. Rektifikation, aus der Suspension abzutrennen. Dadurch ergibt sich eine Kostenreduktion im Downstream-Bereich der Anlage.

Die so kalkulierten Kosten für Wasserstoff belaufen sich für die angegebene Spanne der Stromkosten auf 3,41 bis 11,36 EUR/kmol H₂ bzw. 4,46 bis 14,86 EUR/kmol H₂. Einsparungen, die sich durch die Reduktion der CO₂-Emissionen ergeben, werden mit einem Preiskorridor von 25 bis 55 EUR pro Tonne CO₂ berücksichtigt.

Die hier betrachteten Industriezweige unterliegen dem europäischen Emissionshandelssystem. Der CO₂-Preis lag im November 2020 bei 25 EUR pro Tonne CO₂ und markiert eine untere Schranke. Für die weitere Entwicklung des Preises wurde als Orientierung die Preisfestlegung des nationalen Emissionshandels angesetzt, welche 2025 bei 55 EUR pro Tonne CO₂ liegen soll. Der Erlös durch Produktverkauf basiert auf Rohstoffpreisen für industrielle Basischemikalien. Ethanol (0,4 EUR/L, Stand 10.3.2021) wird direkt an der Börse gehandelt und liefert einen einfach zugänglichen Preis. Für Acetat (0,58 EUR/L) und 2,3-Butandiol (16,55 EUR/L) werden Preise der Onlineplattform Alibaba.com herangezogen.

Die beiden ersten Fälle unterschiedlicher Gaszusammensetzungen (CO₂ + CO + H₂ und CO₂ + H₂) zeigen eine ähnliche Kostenrechnung. Die leicht höheren Ausbeuten in Fall a) für Ethanol und Acetat gehen mit höherem Wasserstoffbedarf einher. Grundsätzlich ist zur Reduktion von CO₂ die 2,5 bis 2,8-fache Menge an Wasserstoff nötig. Tabelle 4.10 zeigt entsprechende Break-even-Stromkosten für verschiedene Szenarien. Die kalkulative Abschätzung ist sehr sensitiv gegenüber den Stromkosten, welche die Einsparungen durch CO₂-Zertifikate deutlich übersteigen. Abgesehen von dem best case-Szenario (30 % Zuschlag) sollten gemäß der Annahme einer 70%igen Zuschlagskalkulation die Stromkosten für einen Break-even im Bereich von 3,5–4,2 ct/kWh liegen.

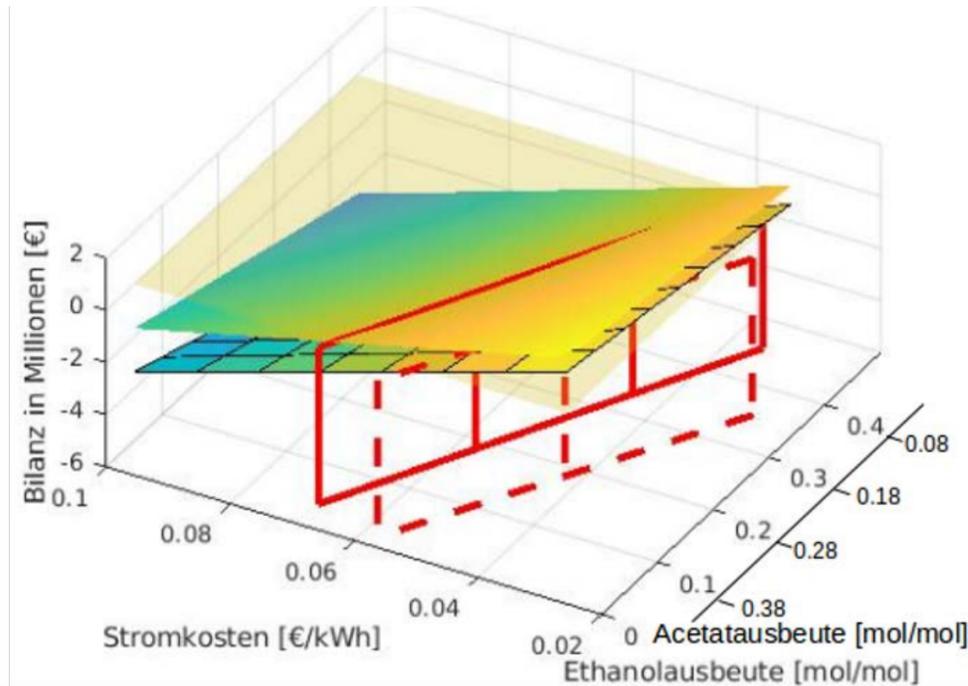
Tabelle 4.10: Break-even Stromkosten für Gasmix a) und b) mit den oben erwähnten Stöchiometrien

Szenarien	Break-even Strompreis 2021 [ct/kWh]	Break-even Strompreis 2025 [ct/kWh]
Fall a) 30 % Zuschlag	5,00	5,10
Fall a) 70 % Zuschlag	3,50	3,90
Fall b) 30 % Zuschlag	5,10	5,50
Fall b) 70 % Zuschlag	3,90	4,20

Anwendungsfall mit 10.000 Jahrestonnen CO₂

In Abbildung 4.1 ist ein Anwendungsfall mit 10.000 Jahrestonnen CO₂ (Fall b) für unterschiedliche Ausbeuten an Acetat, Ethanol sowie Stromkosten (inkl. 30 % bzw. 70 % Zuschlag) dargestellt. Es zeigt sich, dass in diesem Fall die Break-even-Kosten (dargestellt in rot) durch das Verhältnis an Acetat und Ethanol beeinflusst werden. Da Acetat mit höherem Preis veranschlagt ist und der Kohlenstoff in Ethanol stärker reduziert vorliegt, ist eine Verschiebung hin zu höheren Acetatausbeuten ökonomisch attraktiv. Bei dominanter Acetatproduktion könnten Stromkosten von 6–7 ct/kWh (30 %) bzw. 5–6 ct/kWh (70 %) akzeptiert werden. Bei dominanter Ethanolproduktion hingegen nur ca. 3,5 ct/kWh bzw. 3 ct/kWh.

Abbildung 4.1: Vergleichende Darstellung verschiedener Acetat- und Ethanolausbeuten für einen Anwendungsfall von 10.000 Jahrestonnen CO₂ bei unterschiedlichen Stromkosten inkl. 30 % Zuschlag (durchgezogen) sowie 70 % Zuschlag (gestrichelt) im Jahr 2021

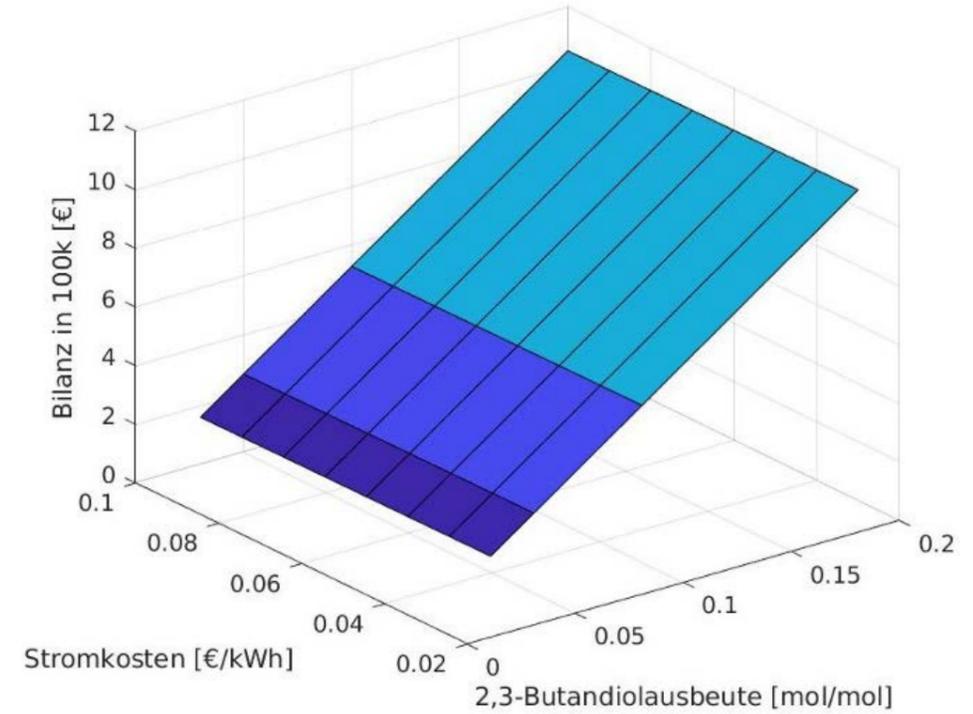


Spezialfall: Synthese von höherwertigem Produkt

Fall c) beschreibt exemplarisch einen Prozess, dessen Produkt mit einem deutlich höheren Preis veranschlagt ist. In diesem Szenario wird ebenfalls CO als Substrat genutzt. Durch die hohen umgesetzten CO-Mengen wird wenig Wasserstoff benötigt und die Bilanz ist unabhängig von den Strom- und Zuschlagskosten positiv. Darüber hinaus liegt der Marktpreis für das synthetisierte 2,3-Butandiol deutlich über dem der anderen Produkte. Im Gegensatz zu den anderen Varianten

wird jedoch bei der Fermentation CO₂ erzeugt, sodass sich der Zertifikatpreis als Kostenpunkt widerspiegelt. Dieser wird in Zukunft steigen, macht sich allerdings im Moment noch nicht stark bemerkbar. In Abbildung 4.2 ist ein Anwendungsfall mit 65 t/a CO sowie 70 % Zuschlagskosten dargestellt. Wirtschaftliche Attraktivität ist in diesem Szenario grundsätzlich gegeben, insbesondere falls sich durch verbesserte Produzentstämme die 2,3-Butandiol-Ausbeute steigern lässt.

Abbildung 4.2: Kostenrechnung für Fall c) mit verschiedenen 2,3-Butandiol-Ausbeuten sowie Stromkosten inkl. 70 % Zuschlag

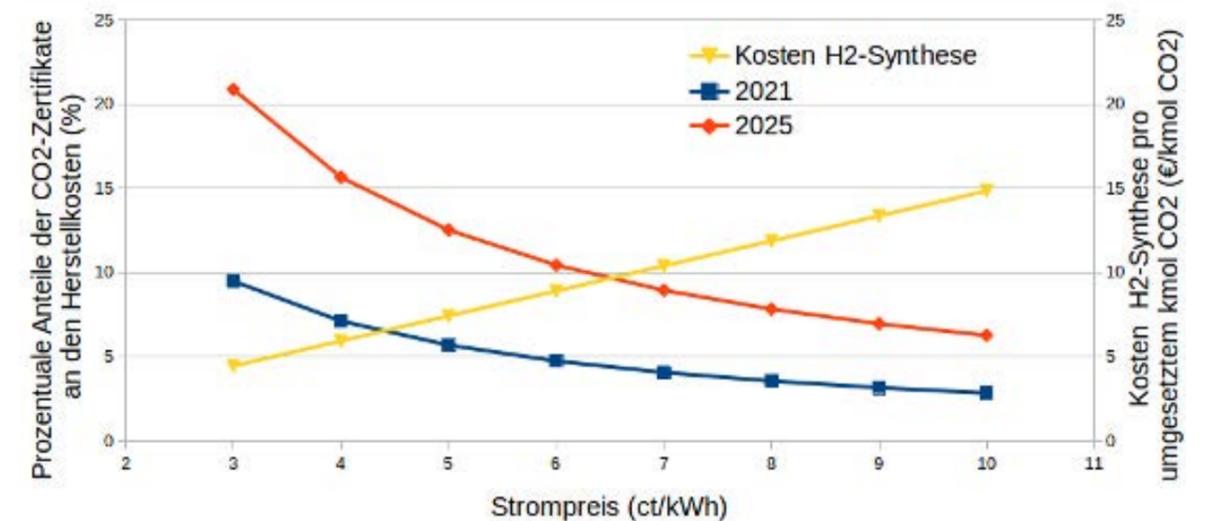


Einfluss des CO₂-Zertifikatpreises auf die Kostenrechnung

Die Einsparungen, welche sich durch die Reduzierung des CO₂-Ausstoßes ergeben, werden mit einem Preiskorridor von 25,00–55,00 EUR/t bzw. 1,10–2,42 EUR/kmol berücksichtigt. Aus der Stöchiometrie ergibt sich, dass zur biochemischen Umsetzung eines CO₂-Moleküls die ca. 2,5- bis 2,8-fache Menge an H₂ benötigt wird. Die theoretischen Synthesekosten

für Wasserstoff bewegen sich zwischen 4,46 EUR/kmol bis 14,86 EUR/kmol. Es lässt sich erkennen, dass der Einfluss der CO₂-Zertifikate im Verhältnis zu den Synthesekosten des aufzuwendenden Wasserstoffs klein ist und erst bei geringen Stromkosten von 6 ct/kWh und dem voraussichtlichen Zertifikatpreis von 2025 über 10 % beträgt.

Abbildung 4.3: Verhältnis der Einsparung durch CO₂-Zertifikate zu Kosten (inkl. 70 % Zuschlag)



Abschließende Bemerkung:

Mit Ethanol und Acetat wurden zwei Produkte untersucht, die zum natürlichen Spektrum von Acetogenen gehören und gleichzeitig höchste Ansprüche an die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens stellen. Würden rekombinante, d. h. gentechnisch veränderte Mikroorganismen eingesetzt, ist es sehr gut möglich, dass auch höherwertige Produkte (z. B. längerkettige organische Säuren oder Alkohole) hergestellt werden. Auch können die prozesstechnischen Leistungsdaten der Mikroorganismen gesteigert werden. Ferner ist zu beachten, dass die Prozessierung der Produkte zu deren weiteren Veredlung führen, deren Marktpreis erhöhen und deren Nutzung in anderen Märkten ermöglichen kann. Ist einmal die Infrastruktur für die Gasfermentation vor Ort installiert, so können in der Folgezeit durchaus andere Mikroorganismen dort eingesetzt werden. Sicherlich würde dies Änderungen im Downstream, d. h. der Produktaufarbeitung, mit sich bringen. Doch haben einige der oben aufgeführten Produkte ähnliche Stoffeigenschaften, sodass etwaige Umbaumaßnahmen durchaus überschaubar erscheinen.

Generell muss beachtet werden, dass die oben vorgestellte Zuschlagskostenkalkulation nur eine sehr grobe Abschätzung der Herstellkosten erlaubt. Für den konkreten Anwendungsfall ist eine detaillierte Analyse der OPEX und CAPEX unumgänglich! Darin einfließen müssen auch integrative Konzepte für die Verwendung der hergestellten Biotech-Produkte als Drop-in-Chemikalien in existierende Prozessketten und Märkte.

4.3.2 Algen

Heutzutage werden Algen kommerziell angebaut, kultiviert und für zahlreiche Anwendungen eingesetzt, die von Lebensmitteln bis hin zu Pharmazeutika reichen. Die Wirtschaftlichkeit ist derzeit nahezu ausschließlich für geschlossene Fotobioreaktoren zur Herstellung von Hochwertprodukten gegeben. Dies ist jedoch auch standortabhängig. Offene Teichsysteme sind wirtschaftlich attraktiv, aber Schwankungen in der Sonneneinstrahlung, Temperatur und mögliche Verunreinigungen durch unerwünschte Organismen sowie der große Flächenbedarf reduzieren die Ausbeute an Nutz-/Zielprodukten für technische Anwendungen erheblich. Ein kontrollierter Prozess im Sinne der industriellen Biotechnologie ist dadurch nicht möglich.

Unschärfen bei der Berechnung der Wirtschaftlichkeit der Mikroalgenproduktion in geschlossenen Fotobioreaktoren ergeben sich immer noch aufgrund der Verwendung einer Vielzahl nicht standardisierter Berechnungsmethoden, fehlender Daten und mangelnder Transparenz über den kommerziellen Anbau. Eines ist jedoch sicher: Algen haben ein immenses Potenzial als nachhaltige Ressource, wenn sie wirtschaftlich skaliert werden. Neuere Entwicklungen von geschlossenen

Fotobioreaktoren greifen dieses Problem auf und zeichnen sich durch eine bessere Lichtausnutzung und eine erheblich gesteigerte Effizienz der Biomasseproduktivität aus. Nachfolgende Abschätzungen berücksichtigen bereits diese Entwicklungen.

Nährstoffbedarf:

Bezogen auf die CO₂-Verwertung benötigen Mikroalgenkulturen rund 2 kg CO₂, um 1 kg Biomasse zu bilden. Die Mikroalgenkultur wird dazu kontinuierlich von einem Luft-/CO₂-Gemisch durchströmt. Dabei löst sich ein Teil des CO₂ im Kulturmedium und wird von den Algen aufgenommen und fotosynthetisch fixiert. Um eine möglichst große Menge an CO₂ für die Biomassebildung zu nutzen, sollte das CO₂ jedoch im Kreis geführt werden. Neben CO₂ werden anorganische Salze benötigt, die auch aus Reststoffströmen wie Flüssiggärrest oder industrielle salzhaltige Nebenströme stammen können.

Wasser- und Flächenbedarf:

Der Proteingehalt von Soja und Algenbiomasse ist annähernd gleich. Der Wasserbedarf um beispielsweise 1 t Soja zu produzieren beträgt 2.500 m³. Demgegenüber beträgt der Wasserbedarf für 1 t Algenbiomasse 75 m³ ohne Wasserwiederverwendung und 8 m³ mit Wasserwiederverwendung. Bezogen auf den notwendigen Flächenbedarf für den Anbau bzw. die Produktion gleicher Biomassemengen werden für Soja 2.500 m² pro Tonne benötigt, für Algen in kompakten Fotobioreaktoren hingegen nur 5 m².

Strombedarf für die Beleuchtung:

Der Strombedarf für die Beleuchtung stellt den größten Anteil bei der Kultivierung dar. Bei den Betriebskosten (OPEX) entsprechen sie ca. 95 % der Gesamtsumme. Tabelle 4.11 zeigt die anfallenden Stromkosten für unterschiedliche Biomasseproduktivitäten in Abhängigkeit verschiedener Stromkostensätze.

Tabelle 4.11: Stromkosten für unterschiedliche Biomasseproduktivitäten in Abhängigkeit verschiedener Stromkostensätze bei einem 24/7-Betrieb.

Biomasse-Produktivität [g TS/L*d]	Stromkosten [EUR/kWh]	Stromkosten Beleuchtung [EUR/kg TS]	Stromkosten Beleuchtung für 1 t TS [EUR/t]
1,5	0,03	8,30	8.300
2,0	0,03	5,53	5.530
1,5	0,05	13,20	13.200
2,0	0,05	9,20	9.200
1,5	0,1	27,65	27.650
2,0	0,1	18,40	18.400
2,0	0,12	22,20	22.200

In aktuellen Ansätzen ist das Optimierungsziel auf eine Erhöhung der volumetrischen Biomasseproduktivität fokussiert, da sie einen großen Einfluss auf die Kostenstruktur hat. Je höher die Stromkosten sind, desto wichtiger wird die Lichtausbeute, also wie gut Licht in Biomasse umgesetzt wird (g TS/mol Photonen oder g TS/Watt).

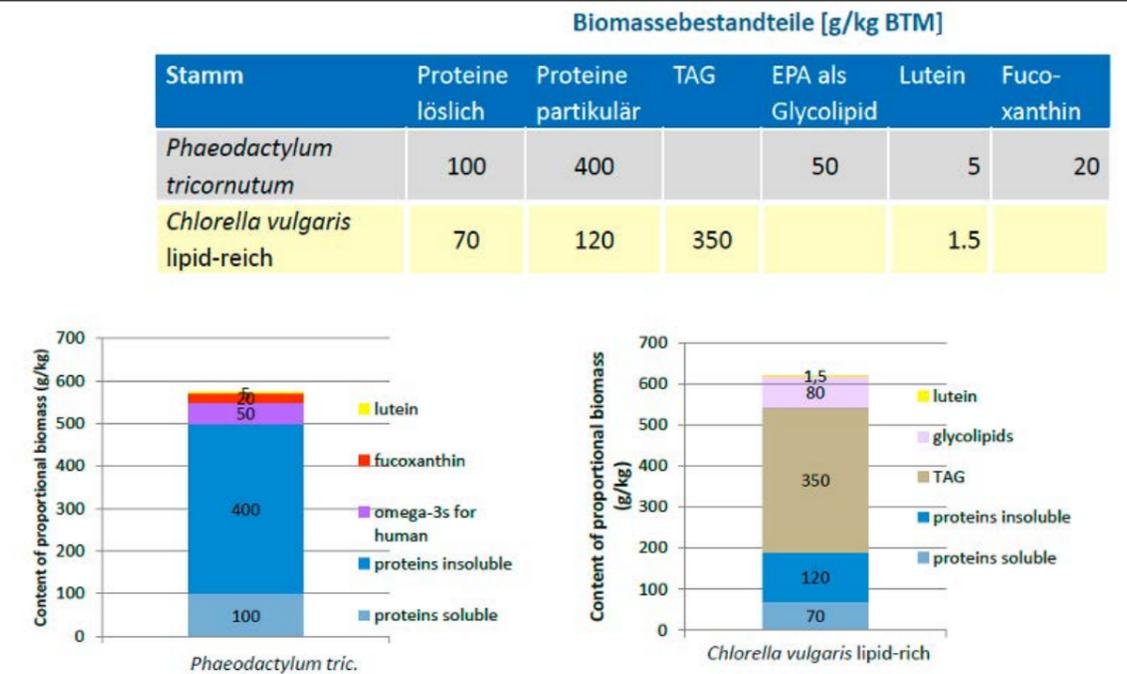
Eine weitere Reduktion der Kosten ist nur durch die oben beschriebene Effizienzsteigerung bezüglich Biomasseproduktivität und Lichtausbeute möglich. Dazu finden aktuell vielversprechende Entwicklungen im Bereich der verwendeten Fotobioreaktormaterialien, der Reaktorgeometrie über beispielsweise eine Reduktion der Schichtdicke (Reaktordurchmesser), eine verbesserte Durchmischung und hinsichtlich der eingesetzten LEDs und deren Anordnung (z. B. beidseitig) statt,

um eine möglichst gleichmäßige Lichtverteilung auf alle Zellen im Reaktor zu erhalten. Steuerung, Regelung und Automatisierung sind weitere Bausteine, um beispielsweise mit dem Anstieg der Biomassekonzentration im Reaktor automatisch die Lichtintensität anzupassen.

Beispiele für die Verteilung von Inhaltsstoffen in Algenkulturen als zusätzliche wertschöpfende Komponente:

Abhängig von den ausgewählten Algenstämmen und den Kultivierungsbedingungen enthält die Algenbiomasse verschiedenste Inhaltsstoffe in unterschiedlichen Anteilen, mit denen die Höhe der Wertschöpfung aktiv beeinflusst werden kann (siehe Abbildung 4.4).

Abbildung 4.4: Algeninhaltsstoffe in Abhängigkeit von eingesetztem Algenstamm und den Kultivierungsbedingungen am Beispiel *Phaeodactylum tricornutum* und Fettsäure-reicher *Chlorella vulgaris*.



Die Erlösspanne pro Kilogramm Produkt variiert zwischen 0,5 und > 3.000 EUR. Die Nachfrage nach den beispielhaft ausgeführten hochpreisigen Algenprodukten kommt vorrangig aus Asien und den USA, da diese Produkte dort eine Zulassung für den Lebensmittelbereich haben. Aktuell beläuft sich die Nachfragemenge nach z. B. Fucoxanthin weltweit auf rund 600 t. Bisher stammen diese Mengen vorwiegend aus Makroalgen. Derzeit gibt es zwei Unternehmen im europäischen Raum, die Fucoxanthin aus Mikroalgen anbieten, allerdings,

je nach Reinheitsgrad, zum etwa dreifachen Preis. Deren Produktionskapazitäten decken jedoch nur einen Bruchteil der gesamten Nachfragemenge ab. Aus Preis und Gehalt ergibt sich ein Erlös von bis zu 320 EUR pro Kilogramm Algenbiomasse alleine für einen Fucoxanthingehalt von 2 %. Die Kosten für die Aufbereitung der Algeninhaltsstoffe haben nur einen Anteil von ca. 10 % an den Gesamtproduktionskosten in geschlossenen Fotobioreaktoren.

Tabelle 4.12: Spannweite von Marktpreisen für Algenbiomassen und Inhaltsstoffe, ausgewählter Preis für die Kalkulation der potenziellen Wertschöpfung

Algenprodukte	Marktpreis [EUR/kg]	Preis verwendet für Kalkulation der Wertschöpfung [EUR/kg]	Informationsquelle
Chlorella vulgaris, proteinreiches Mehl (60 % Protein, heterotroph)	9,80–15,00		von Roquette /F; Inof DIL/D und Universität Hohenheim
Lösliche Proteine (aus Algen)	6,00	6,00	Wijffels et al (2010)
Partikuläre Proteine	1,50	1,50	Wijffels et al (2010)
Proteine für Lebensmittel	5,00–10,00	5,00	Recherche AERTOs Team
Proteine für Futtermittel	0,50–2,00	1,50	Recherche AERTOs Team
Fischöl (3,5 % EPA + 5,5 % DHA)	2,50–3,00		https://www.undercurrentnews.com/2014/10/16/fish-oil-availability-not-price-will-be-the-problem/
EPA-Glycolipide	100,00	100,00	AERTOs Workshop; Benemann (USA), ALGAE EUROPE 2015, Präsentation
Triacylglyceride TAG	0,30	0,30	
Fucocanthin 1 % Gehalt	300,00–3.000,00	1.400,00	AERTOs Workshop, CEVA SeAgriculture 2015, Präsentation
Lutein	1.000,00	1.000,00	AERTOs Workshop
β-Carotin		1.000,00	

Beispielrechnung für die Verwertung von 1.000 t CO₂ mittels Algen:

Aus 1.000 t CO₂ pro Jahr könnten bei einem Frischwasserverbrauch von minimal 4.000 m³ ca. 500 t Algenbiomasse produziert werden. Der maximale Erlös bei hochwertigen Inhaltsstoffen würde bei ca. 160 Mio. EUR liegen. Demgegenüber stehen Produktionskosten (nur OPEX) bei einer Biomasseproduktivität von 1,5 g/L*d von ca. 4,5 Mio. EUR (bei 0,03 EUR/kWh) bis ca. 14,5 Mio. EUR (bei 0,1 EUR/kWh). Die CAPEX sind dabei noch nicht berücksichtigt, da diese je nach Reaktorbauart und LED-Typen (Wellenlängenspektrum, Lumen, Wirkungsgrad etc.) variieren. Der Flächenbedarf einer kompakten Fotobioreaktoranlage der neuesten Generation würde je nach Anordnung der Module etwa 0,2–0,5 ha betragen.

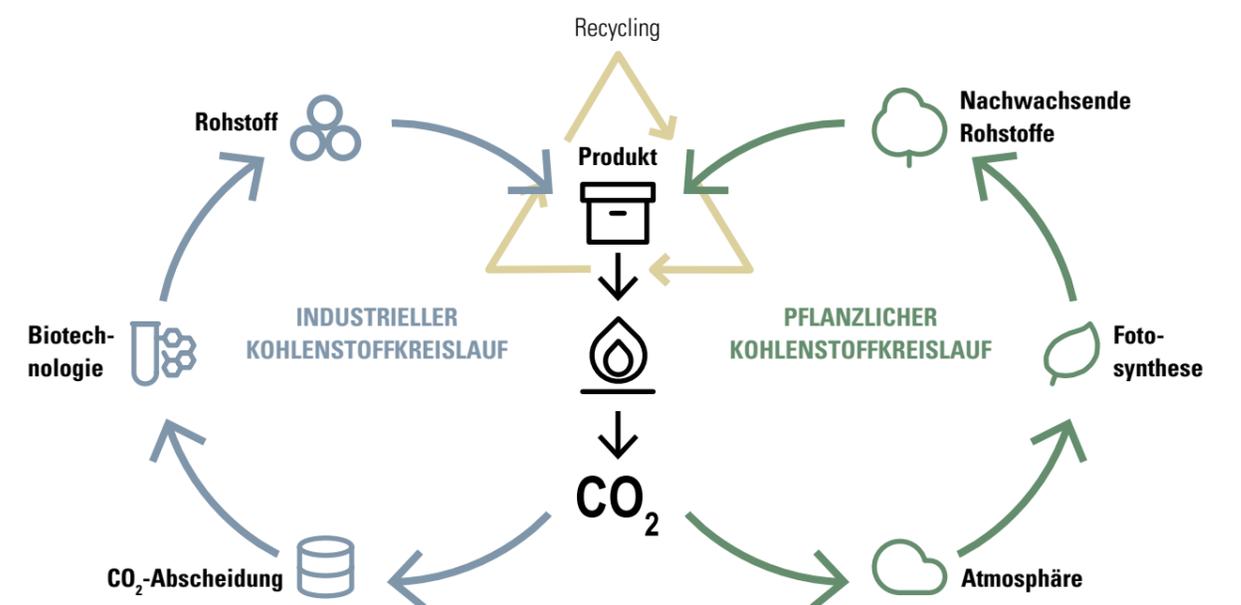
— 5 —

FAZIT UND AUSBLICK

5.1 FAZIT

Die für unser Erdklima so wichtige Reduktion treibhaus-schädlicher Gase stellt die Industrie vor immense Herausforderungen. Mitentscheidend für das wirtschaftliche und zivilisatorische Wachstum der letzten Jahrzehnte war die unlimitierte Nutzung gespeicherten Kohlenstoffs in Form fossiler Energieressourcen. Ein Barrel Öl (159 Liter) besitzt die gleiche Energie wie zwölf Jahre menschlicher Arbeitskraft¹³. Die Entdeckung fossiler Energiequellen hat die gesellschaftliche Entwicklung der letzten 150 Jahre geprägt. Die heutige Wirtschafts- und Lebensweise basiert noch immer vorrangig auf der Energie des fossilen Kohlenstoffs, mit beachtlichen

Auswirkungen auf unsere direkte Umwelt und das Klima. Mit dem Ziel, bis 2045 eine klimaneutrale Wirtschaft zu erreichen, ist eine Transformation der Energieversorgung und des Kohlenstoffkreislaufes unumgänglich. Ein elementarer Bestandteil dieser Transformation ist der Kreislaufgedanke: Kohlenstoff als Rohstoff- und Energiequelle muss zukünftig in einem neuen industriellen Kohlenstoffkreislauf gehalten werden. Somit sind vor allem diejenigen Industriebranchen gefordert, deren Produkte einen großen fossilen CO₂-Fußabdruck haben. Entscheidend ist dabei nicht die Defossilisierung, sondern die konsequente Kreislaufführung sämtlichen Kohlenstoffs aus fossilen Quellen (siehe Abbildung 5.1).

Abbildung 5.1: Industrieller vs. pflanzlicher Kohlenstoffkreislauf¹³ <https://www.bdwi.de/forum/archiv/uebersicht/5445484.html>

CO₂-Recycling stellt hierbei einen elementaren Baustein dar, denn es bietet Industriebranchen mit wenig Möglichkeiten zur Reduktion fossiler CO₂-Emissionen die Chance, ihre Produktion in einen industriellen C-Kreislauf zu integrieren. Abhängig von der Verfügbarkeit günstigen Stroms stellt CCU ein wirtschaftliches Zukunftsmodell dar. Dabei sind biologische und hybride Technologien besonders interessant, da sie eine höhere Robustheit gegenüber chemisch-physikalischen Technologien aufweisen. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit zur Synthese höherwertiger, langkettiger Kohlenstoffverbindungen, die zu besseren Preisen verkauft werden können als C1-Verbindungen wie Methan.

5.2 Ausblick

Die Implementierung von biologischen CCU in Produktionsprozessen steht noch am Anfang. Für die erfolgreiche Installation eines geschlossenen industriellen Kohlenstoffkreislaufes mit Hilfe von CCU sind auf technischer, politischer und marktwirtschaftlicher Ebene entscheidende Entwicklungen notwendig. Viele Technologien sind Stand heute nicht ausgereift genug, um sie großtechnisch einzusetzen. Außerdem ist die regulatorische Einordnung der entstehenden Produkte hinsichtlich ihres Effekts auf die Treibhausgasbilanz von Unternehmen nicht endgültig geklärt. Daher müssen CCU-Erzeugnisse einer standardisierten Betrachtung bezüglich der eingesparten und freigesetzten Emissionen im Vergleich zu herkömmlichen Produkten unterzogen werden, um so ihre Wirkung auf das Klima bewerten zu können. Durch den noch niedrigen technischen Reifegrad sind die Rahmenbedingungen für ein Life Cycle Assessment erschwert.

Für Industriezweige mit hohen prozessbedingten Emissionen ist die CO₂-Nutzung eine der wenigen Möglichkeiten, langfristig klimaneutral zu werden. Allerdings würde zusätzlich zur Kreislaufführung (egal, ob über Pflanzen oder biotechnische Methoden) mittelfristig weiterhin Kohlenstoff aus fossilen Quellen in den C-Kreislauf eingebracht. Es stellt sich daher die Frage, wie zukünftig mit nicht vermeidbaren prozessbedingten CO₂-Emissionen verfahren wird. Hinsichtlich der gesetzlichen Bestimmungen sowie der Versorgung mit ausreichend „regenerativer“ Energie, Flächen und Wasser muss die Politik einen festen Handlungsrahmen vorgeben. Denn je nach Verfahren kann CO₂-Recycling große Mengen an Strom oder Wasserstoff benötigen, der aus zusätzlich installierter erneuerbarer Energie produziert werden muss. Um die chemische Industrie zukünftig mit C-Produkten aus CO₂ beliefern zu können, müssen Unternehmenskooperationen entlang der Prozesskette und sich ergänzendes Know-how gebildet werden. CCU-Anlagen sind sehr kapitalintensive Investitionen. In der Grundstoffherstellung werden Anlagen mit einer Laufzeit von über 30

Betriebsjahren geplant und realisiert. Für die zukünftig großen Mengen an grüner Chemie wird daher ein sicherer Absatzmarkt benötigt. Diese Produkte können ökonomisch gesehen nicht mit fossilen Produkten konkurrieren, solange dort die Umweltkosten nicht eingerechnet werden. Ein verlässlicher, den Klimafolgekosten entsprechender CO₂-Preis, würde für Entscheidungssicherheit und Wirtschaftlichkeit sorgen. Es bedarf somit eines zuverlässigen Rahmens, der Innovationen und Investitionen ermöglicht.

Die frühe Installation günstiger und effizienter klimaneutraler CCU-Anlagen könnte in den kommenden Jahren den entscheidenden Marktvorteil und Technologieführerschaft erbringen. Aktive Weichenstellung und Unterstützung der Industrie bei der Transformation hin zu klimaneutralem Wirtschaften sollten vom Land Baden-Württemberg in Zukunft gestärkt werden. Das frühe Erreichen von Klimaneutralität in Industrieprozessen ist für den Industriestandort Baden-Württemberg von entscheidender Bedeutung. Zudem eröffnen sich mit der Technologieführerschaft weltweite Marktpotenziale für die Produktions-Technologien und deren Produkte.

Die Aufgabe sollten schnellstmöglich und von Wirtschaft und Politik gemeinsam angegangen werden, denn die Zeit drängt, um das Ziel des Pariser Klimaabkommens einhalten zu können und im Wettbewerb um die günstigsten und besten Technologien vorne mit dabei zu sein. Das Thema der Klimaneutralität ist so groß und umfänglich, dass es nur durch ein Miteinander aller Stakeholder gelingen wird.

5.3 Förderprogramme

Es gibt sowohl deutschlandweit als auch auf EU-Ebene verschiedene Möglichkeiten zur Förderung von Projekten im Bereich CO₂-Recycling. Die aktuell laufenden Förderprogramme werden in nachfolgenden Unterkapiteln vorgestellt.

5.3.1 Deutschland

5.3.1.1 Umweltinnovationsprogramm¹⁴

Im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms (UIP) unterstützt das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) bereits seit mehr als 40 Jahren Unternehmen dabei, innovative, Umwelt-positive Technologien in die Praxis umzusetzen. Gefördert werden großtechnische Demonstrationsanlagen, die neue Technik zum ersten Mal in Deutschland umsetzen oder bereits bekannte Techniken neu kombinieren. Das Förderprogramm steht jedem offen, allerdings werden kleine und mittelständische Unternehmen bevorzugt. Es kann entweder ein Investitionszuschuss oder ein

Zinszuschuss zur Verbilligung eines Kredits der KfW beantragt werden. Projektskizzen können jederzeit eingereicht werden. Im zweiten Schritt folgt bei positivem Kurzvotum die formale Antragsstellung.

5.3.1.2 Dekarbonisierung in der Industrie¹⁵

Mit dem Förderprogramm Dekarbonisierung in der Industrie unterstützt das BMU energieintensive Industriebranchen dabei, Treibhausgasneutralität zu erreichen. Dabei sollen Projekte gefördert werden, mithilfe derer nicht oder schwer vermeidbare prozessbedingte Treibhausgasemissionen reduziert werden können. Die Förderung beinhaltet Forschung und Entwicklung ab TRL 4, Erprobungen in Versuchs- bzw. Pilotanlagen sowie Investitionen in Anlagen im industriellen Maßstab. Der Fokus liegt dabei unter anderem auf Brückentechnologien für wesentliche Schritte hin zur Treibhausgasneutralität, treibhausgasarmen bzw. -neutralen Herstellungsverfahren sowie integrierten Produktionsverfahren und innovativen Verfahrenskombinationen. Die Förderung erfolgt im Rahmen eines Investitionszuschusses. Das Antragsverfahren läuft in zwei Stufen ab: Im ersten Schritt wird die Projektskizze eingereicht. Die Einreichung ist jederzeit möglich; nach Auswertung und positiver Bewertung folgt die formale Antragstellung.

5.3.1.3 Industrielle Bioökonomie¹⁶

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unterstützt mit dem Förderprogramm Industrielle Bioökonomie den Übergang bioökonomischer Produkte und Verfahren in die industrielle Praxis. Gefördert wird die Skalierung innovativer Prozesse innerhalb zweier Fördermodule:

In Modul A wird die Nutzung existierender Anlagen in Deutschland und Europa zur Erprobung und Weiterentwicklung eigener Verfahren mit Bezug auf die industrielle Bioökonomie gefördert. Dieses Modul spricht vorrangig Start-ups sowie KMU bis 1.000 Mitarbeiter*innen an.

Modul B fördert vorbereitende Tätigkeiten für die Errichtung unternehmenseigener Demonstrationsanlagen der industriellen Bioökonomie. Dazu gehören Durchführbarkeitsstudien und Vorbereitungen zur Markteinführung mit dem Ziel, Leuchtturmprojekte aufzubauen. Gewerbliche Unternehmen jeder Größe können in Modul B gefördert werden.

Für beide Module müssen Kriterien zur Nachhaltigkeit erfüllt werden wie z. B. die quantifizierbare Minderung von Treibhausgasemissionen. Eingesetzte Verfahren müssen einen Technologiereifegrad von mindestens sechs aufweisen. Die Förderung erfolgt auf Basis der Allgemeinen Gruppenfreistellungsverordnung (AGVO). Die zweite Ausschreibungsrunde startete für beide Module am 26. Mai 2021. Projektskizzen konnten dann bis zum 30. Juni 2021 eingereicht werden.

5.3.2 Europäische Union

Der Innovation Fund¹⁷ der EU fördert innovative Technologien mit Demonstrationscharakter sowie Leuchtturmprojekte, die auf eine wesentliche Reduktion der Treibhausgasemissionen abzielen. Der Fokus liegt unter anderem auf Carbon Capture and Utilisation (CCU). Gefördert werden zudem Projekte an der Schnittstelle verschiedener Sektoren. Die finanziellen Mittel des Förderprogramms stammen aus dem europäischen Emissionshandelssystem (EU ETS). In Abhängigkeit der Investitionssumme gibt es zwei Ausschreibungen: Die große Ausschreibung adressiert Projekte mit Kapitalaufwendungen über 7,5 Mio. Euro. Die Frist für den ersten Förderaufruf für Großprojekte endete im Oktober 2020. Es wird jedoch im Laufe des Förderprogramms weitere Ausschreibungen geben. Das Antragsverfahren ist zweistufig. Für Projekte unter 7,5 Mio. Euro Investitionssumme gibt es eine separate Ausschreibung; die Frist zur Antragseinreichung für den ersten Förderaufruf endete am 10. März 2021. Hier wurde das Antragsverfahren vereinfacht und umfasst nur eine Stufe mit direkter Antragstellung.

¹⁴ <https://www.umweltinnovationsprogramm.de/>

¹⁵ <https://www.klimaschutz-industrie.de/foerderung/>

¹⁶ <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/industrielle-biooekonomie.html>

¹⁷ https://ec.europa.eu/clima/policies/innovation-fund_en#tab-0-0

LITERATURVERZEICHNIS

Abanades, J. C., Rubin, E. S., Mazzotti, M. & Herzog, H. J. (2017). On the climate change mitigation potential of CO₂ conversion to fuels. *Energy & Environmental Science*, 10(12), 2491–2499. <https://doi.org/10.1039/c7ee02819a>

acatech (2018). CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie. acatech POSITION. München. acatech. <https://www.acatech.de/publikation/ccu-und-ccs-bausteine-fuer-den-klimaschutz-in-der-industrie-analyse-handlungsoptionen-und-empfehlungen/download-pdf?lang=de>

ADAC (2020). Synthetische Kraftstoffe – Energieträger der Zukunft? <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/>

Agora Verkehrswende (April 2019). Klimabilanz von Elektroautos: Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf

Al-Mamoori, A., Krishnamurthy, A., Rownaghi, A. A. & Rezaei, F. (2017). Carbon Capture and Utilization update. *Energy Technology*, 5(6), 834–849. <https://doi.org/10.1002/ente.201600747>

Almeida Benalcázar, E., Noorman, H., Maciel Filho, R. & Posada, J. A. (2020). Modeling ethanol production through gas fermentation: a biothermodynamics and mass transfer-based hybrid model for microbial growth in a large-scale bubble column bioreactor. *Biotechnology for biofuels*, 13, Artikel 59. <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01695-y>

Alshalif, A. F., Irwan, J. M., Othman, N., Al-Gheethi, A. A. & Shamsudin, S. (2020). A systematic review on bio-sequestration of carbon dioxide in bio-concrete systems: a future direction. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1–20. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1713899>

Ampelli, C., Perathoner, S. & Centi, G. (2015). CO₂ utilization: an enabling element to move to a resource- and energy-efficient chemical and fuel production. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 373(2037). <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0177>

Anggraini, I. D., Keryanti, K., Kresnowati, M. T. A. P., Purwadi, R., Noda, R., Watanabe, T. & Setiadi, T. (2019). Bioethanol production via syngas fermentation of *Clostridium ljungdahlii* in a hollow fiber membrane supported bioreactor. *International Journal of Technology*, 10(3), 481–490. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v10i3.2913>

Arbeitsgruppe IK III 1 (Oktober 2019). Klimaschutzprogramm 2030: Maßnahmen zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutzprogramm_2030_bf.pdf

Badische Stahlwerke GmbH (2020). Home. Badische Stahlwerke. <https://www.bsw-kehl.de/>

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2007). Abfallwirtschaft und Klimaschutz: Fachtagung am 08. Februar 2007. LfU.

Bazzanella, A. M. & Ausfelder, F. (Juni 2017). Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry. Technology study. Frankfurt am Main. DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V. (DECHEMA). https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Technology_study_Low_carbon_energy_and_feedstock_for_the_European_chemical_industry.pdf

Bengelsdorf, F. R., Straub, M. & Dürre, P. (2013). Bacterial synthesis gas (syngas) fermentation. *Environmental technology*, 34(13-16), 1639–1651. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.827747>

Bennett, S. J., Schroeder, D. J. & McCoy, S. T. (2014). Towards a framework for discussing and assessing CO₂ utilisation in a climate context. *Energy Procedia*, 63, 7976–7992. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.835>

Bergins, C., Fox, E. L., Tran, K. C. & Wuebben, P. (2016). Kommerzialisierung von Methanol mit niedriger CO₂-Intensität. *ATZextra*, 21(S11), 22–25. <https://doi.org/10.1007/s35778-015-0110-1>

Bertuccioli, L., Chan, A., Hart, D., Lehner, F., Madden, B. & Standen, E. (Februar 2014). Development of water electrolysis in the European Union. Final report. E4tech Sàrl; Element Energy Ltd. https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/study%20electrolyser_0-Logos_0_0.pdf

Berylls Strategy Advisors. (Juli 2020). Die weltweit 100 größten Automobilzulieferer. Berylls. https://www.all-electronics.de/wp-content/uploads/2020/07/BERYLLS_Global-TOP-100_Tabelle.pdf

Blamey, J., Anthony, E. J., Wang, J. & Fennell, P. S. [P. S.] (2010). The calcium looping cycle for large-scale CO₂ capture. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(2), 260–279. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.10.001>

Bolay, S., Bullmann, T., Flechtner, J., Gollnick, C. & Schorpp, J. (März 2020). Brennstoffemissionshandelsgesetz: DIHK-Merkblatt zum BEHG. Berlin. Deutscher Industrie- und Handelskammertag e. V. (DIHK). <https://www.dihk.de/resource/blob/19512/8a03955209ed045fb4870917da6a225c/dihk-merkblatt-brennstoffemissionshandelsgesetz-data.pdf>

Brüninglinghaus, C. (2012). Ressourceneffizienz in der Produktion. Springer Professional. <https://www.springerprofessional.de/automobilproduktion/emissionen/ressourceneffizienz-in-der-produktion/6559260>

Bundesministerium für Bildung und Forschung (o. J.). Kohlendioxid als Rohstoff. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). <https://www.bmbf.de/de/kohlendioxid-als-rohstoff-9284.html>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Juni 2019). Energiewende in der Industrie: Potenziale, Kosten und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-flyer.pdf?__blob=publicationFile&v=14

Bundesverband Glasindustrie e. V. (August 2020). Jahresbericht 2019. Düsseldorf. https://www.bvglas.de/media/BV_Glas/Jahresbericht_2019.pdf

Bushuyev, O. S., Luna, P. de, Dinh, C. T., Tao, L., Saur, G., van de Lagemaat, J., Kelley, S. O. & Sargent, E. H. (2018). What should we make with CO₂ and how can we make it? *Joule*, 2(5), 825–832. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.09.003>

nova-Institut GmbH (20. November 2013). CO₂ is ready to go as a fuel and chemical feedstock: Dynamic technological developments – Investors await market incentives [Press release]. Hürth. https://news.bio-based.eu/media/2013/11/13-11-20_pr_ccu_nova.pdf

Carus, M., Dammer, L., Raschka, A., Skoczinski, P. & Berg, C. vom. (September 2020). Renewable carbon – Key to a sustainable and future-oriented chemical and plastic industry: Definition, strategy, measures and potential. Background paper of the Renewable Carbon Initiative (RCI), launched September 2020. Hürth. nova-Institut GmbH. <https://renewable-carbon.eu/publications/product/nova-paper-12-renewable-carbon-key-to-a-sustainable-and-future-oriented-chemical-and-plastic-industry-%e2%88%92-full-version/>

Cemex (29. Oktober 2020). CEMEX Deutschland führt CO₂-reduzierte und CarbonNeutral® Betonfamilie ein: Vertua® macht das Bauen klimafreundlicher [Press release]. <https://www.cemex.de/-/cemex-deutschland-fuehrt-co2-reduzierte-und-carbonneutral-betonfamilie-ein-vertua-macht-das-bauen-klimafreundlicher>

Constellium Singen GmbH (2021). Singen, Germany - Aluminium Manufacturing Plant | Constellium. Constellium. <https://www.constellium.com/singen-germany-aluminium-manufacturing-plant-constellium>

Daniell, J., Köpke, M. & Simpson, S. D. (2012). Commercial biomass syngas fermentation. *Energies*, 5(12), 5372–5417. <https://doi.org/10.3390/en5125372>

Dau, H., Kurz, P. & Weitze, M.-D. (2019). Künstliche Photosynthese: Besser als die Natur? Technik im Fokus. Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55718-1>

Dean, C. C., Blamey, J., Florin, N. H., Al-Jeboori, M. J. & Fennell, P. S [P. S.] (2011). The calcium looping cycle for CO₂ capture from power generation, cement manufacture and hydrogen production. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(6), 836–855. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.10.013>

Demler, M. & Weuster-Botz, D. (2011). Reaction engineering analysis of hydrogenotrophic production of acetic acid by *Acetobacterium woodii*. *Biotechnology and bioengineering*, 108(2), 470–474. <https://doi.org/10.1002/bit.22935>

Deutsche Emissionshandelsstelle (Mai 2020). Treibhausgasemissionen 2019: Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2019). Berlin. Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt). https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=4

Deutscher Bundestag (April 2020). Antwortder Bundesregierungauf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Dr. Bettina Hoffmann, Dr. Julia Verlinden, Christian Kühn (Tübingen), weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Rolle der Abfallverbrennung für Kreislaufwirtschaft und Umweltschutz in Deutschland. <https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/186/1918606.pdf>

Devarapalli, M., Lewis, R. & Atiyeh, H. (2017). Continuous ethanol production from synthesis gas by *Clostridium ragsdalei* in a trickle-bed reactor. *Fermentation*, 3(2), Artikel 23. <https://doi.org/10.3390/fermentation3020023>

Dürre, P. (2007). Biobutanol: an attractive biofuel. *Biotechnology journal*, 2(12), 1525–1534. <https://doi.org/10.1002/biot.200700168>

Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S. & Stechow, C. von (Hrsg.). (2011). Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN_Full_Report-1.pdf

EWI (8. Dezember 2020). Grüner Wasserstoff: Weltweit große Kostenunterschiede und hohe Transportkosten [Press release]. Köln. <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/news/policy-brief-h2-kosten/>

Enzien, M., Hickey, R., Levinson, W. & Vermeiren, W. (2014). Method for production of n-propanol and/or ethanol by fermentation of multiple substrates in a symbiotic manner(WO2014/140340A1). <https://patentimages.storage.googleapis.com/07/79/aa/51c1c172c9f170/WO2014140340A1.pdf>

Europäische Kommission (2016). The EU Emissions Trading System (EU ETS). https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/factsheet_ets_en.pdf

Europäische Union (2019). Verordnung (EU) 2019/631 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. April 2019 zur Festsetzung von CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 und (EU) Nr. 510/2011. In Europäische Union (Hrsg.), L 111. Amtsblatt der Europäischen Union (ABI) (S. 13–53). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0631&from=de>

Euwid (2020). CO₂-Preis für die Müllverbrennung? Weiterhin unterschiedliche Ansichten in der Entsorgungswirtschaft. EUWID Recycling und Entsorgung. <https://www.euwid-recycling.de/news/politik/einzelansicht/Artikel/co2-preis-fuer-die-muellverbrennung-weiterhin-unterschiedliche-ansichten-in-der-entsorgungswirtschafta.html>

Fernández-Naveira, Á., Abubackar, H. N., Veiga, M. C. & Kennes, C. (2016). Efficient butanol-ethanol (B-E) production from carbon monoxide fermentation by *Clostridium carboxidivorans*. *Applied microbiology and biotechnology*, 100(7), 3361–3370. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-7238-1>

Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (Januar 2018). CO₂-Verminderung in der Hohlglasherstellung. Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FFe). https://www.ffegmbh.de/images/stories/veroeffentlichungen/720_Energiewende_in_der_Industrie/CO2-Verminderung_in_der_Hohlglasherstellung.pdf

Franken, M. & Weller, K. (2019). Jahresbericht 2018. Interessensgemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e. V. (ITAD). <https://www.itad.de/ueber-uns/mehr/jahresbericht/itad-jahresbericht-2018.pdf>

Franken, M. & Weller, K. (2020). Jahresbericht 2019. Interessensgemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e. V. (ITAD). <https://www.itad.de/service/downloads/itad-jahresbericht-2019-webformat.pdf>

Gaddy, J. L [James L.], Arora, D. K., Ko, C.-W., Phillips, J. R., Basu, R., Wikstrom, C. V. & Clausen, E. (2001). Methods for increasing the production of ethanol from microbial fermentation(WO 02/08438 A2). <https://patentimages.storage.googleapis.com/0a/46/6b/21885febcc77d7/WO2002008438A2.pdf>

Gildemyn, S., Molitor, B., Usack, J. G., Nguyen, M., Rabaey, K. & Angenent, L. T. (2017). Upgrading syngas fermentation effluent using *Clostridium kluyveri* in a continuous fermentation. *Biotechnology for biofuels*, 10, Artikel 83. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0764-6>

Grethlein, A. J., Worden, R., Jain, M. K. & Datta, R. (1991). Evidence for production of n-butanol from carbon monoxide by *Butyribacterium methylotrophicum*. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 72(1), 58–60. [https://doi.org/10.1016/0922-338X\(91\)90147-9](https://doi.org/10.1016/0922-338X(91)90147-9)

Guminski, A., Rouyre, E. & Wiener, M. (November 2019). CO₂-Verminderung in der Flachglasherstellung. Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FFe). https://www.ffegmbh.de/images/stories/Berichte/924_Dynamis_Steckbriefe/CO2-Verminderung_in_der_Flachglasherstellung.pdf

Hahn, V. (2020). Immer mehr Elektroautos: Neue Modelle 2021. kfz-betrieb. <https://www.kfz-betrieb.vogel.de/immer-mehr-elektroautos-a-989160/>

Audi AG (29. Januar 2020). CO₂ ist die Währung der Zukunft [Press release]. Brüssel. <https://www.audi.com/de/company/sustainability/core-topics/operations-and-integrity/brussels-co2-the-currency-of-the-future.html>

Heffernan, J. K., Valgepea, K., Souza Pinto Lemgruber, R. de, Casini, I., Plan, M., Tappel, R., Simpson, S. D., Köpke, M., Nielsen, L. K [Lars K.] & Marcellin, E. (2020). Enhancing CO₂-valorization using *Clostridium autoethanogenum* for sustainable fuel and chemicals production. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 8, 204. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00204>

Heiskanen, H., Virkajärvi, I. & Viikari, L. (2007). The effect of syngas composition on the growth and product formation of *Butyribacterium methylotrophicum*. *Enzyme and Microbial Technology*, 41(3), 362–367. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2007.03.004>

Hepburn, C., Adlen, E., Beddington, J., Carter, E. A., Fuss, S., Mac Dowell, N., Minx, J. C., Smith, P. & Williams, C. K. (2019). The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal. *Nature*, 575(7781), 87–97. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1681-6>

Hermann, M., Teleki, A., Weitz, S., Niess, A., Freund, A., Bengelsdorf, F. R. & Takors, R. (2020). Electron availability in CO₂ CO and H₂ mixtures constrains flux distribution, energy management and product formation in *Clostridium ljungdahlii*. *Microbial biotechnology*, 13(6), 1831–1846. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13625>

Hoenic, V., Hoppe, H., Koring, K. & Lemke, J. (März 2012). ECRA CCS Project – Report on Phase III. Technical Report TR-ECRA-119/2012. European Cement Research Academy (ECRA). https://ecra-online.org/fileadmin/redaktion/files/pdf/ECRA_Technical_Report_CCS_Phase_III.pdf

Hoffmeister, S., Gerdom, M., Bengelsdorf, F. R., Linder, S., Flüchter, S., Öztürk, H., Blümke, W., May, A., Fischer, R.-J., Bahl, H. & Dürre, P. (2016). Acetone production with metabolically engineered strains of *Acetobacterium woodii*. *Metabolic engineering*, 36, 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2016.03.001>

Holtmann, D. & Harnisch, F. (September 2019). Die Bioelektrosynthese als essentieller Baustein der Bioökonomie. Frankfurt am Main. DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V. (DECHEMA). https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/2019_Bioelektrosynthese.pdf

Hu, P., Chakraborty, S., Kumar, A., Woolston, B., Liu, H., Emerson, D. & Stephanopoulos, G. (2016). Integrated bioprocess for conversion of gaseous substrates to liquids. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(14), 3773–3778. <https://doi.org/10.1073/pnas.1516867113>

Huneke, F., Perez Linkenheil, C., Lenck, T. & Heddrich, M.-L. (Februar 2017). Beitrag thermischer Abfallbehandlungsanlagen zur Energiewende. Berlin. Energy Brainpool GmbH & Co. KG. https://www.energybrainpool.com/fileadmin/download/Studien/Studie_2017-02-09_ITAD_Beitrag-TAB-zur-Energiewende_Energy-Brainpool.pdf

Hüsing, B., Aichinger, H., Marscheider-Wiedemann, F., Moll, C. & Wietschel, M. (2021). Technologie- und Marktstudie: Übersicht über Technologien zur bioinspirierten CO₂-Fixierung und -Nutzung sowie der Akteure in Baden-Württemberg. Forschungsbericht BWPLUS. Förderkennzeichen: BWCO219001. Karlsruhe. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI).

IN4climate.NRW GmbH (o. J.). Best Practice – Hyglass. <https://www.in4climate.nrw/best-practice/2020/hyglass/>

Infantes, A., Kugel, M. & Neumann, A. (2020). Evaluation of media components and process parameters in a sensitive and robust fed-batch syngas fermentation system with *Clostridium ljungdahlii*. *Fermentation*, 6(2), Artikel 61. <https://doi.org/10.3390/FERMENTATION6020061>

Interessensgemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e. V. (Juni 2019). ITAD-Nachhaltigkeitsstrategie. <https://www.itad.de/ueber-uns/mehr/itad-nachhaltigkeitsstrategie-27-juni-2019.pdf>

Interessensgemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e. V. (Mai 2020). Das Brennstoff-Emissionshandelsgesetz (BEHG) – Mögliche Kostenauswirkungen der Einbeziehung der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen (TAB) in den nationalen Emissionshandel auf Bürger, Gewerbe und Industrie und die Abfallwirtschaft. <https://www.itad.de/wissen/faktenblaetter/hintergrundinformationen-nach-behg>

Interessensgemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e. V. & Bundesverband Deutscher Sonderabfallverarbeitungsanlagen e. V. (2021). Stellungnahme der Verbände BDSAV und ITAD zur Verordnung über Maßnahmen zur Vermeidung von Carbon-Leakage durch den nationalen Brennstoffemissionshandel (BEHG-Carbon-Leakage-Verordnung – BECV) [Entwurf vom 11.02.2021]. https://www.itad.de/service/mitgliederinfos/oeffentliche-anhaenge/2021-02-25-_bdsav-itad-stellungnahme-carbon-leakage.pdf

Interessensgemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e. V. & Verband kommunaler Unternehmen e. V. (2020). Abfallverbrennung gehört nicht in den Emissionshandel. https://www.vku.de/fileadmin/user_upload/Verbandsseite/Themen/Infrastruktur_und_Dienstleistungen/200615_itad_vku_PP_BEHG.pdf

Jang, N., Yasin, M., Lee, M [Mungyu], Kang, H. & Chang, I. S. (2020). Gas circulation rate and medium exchange ratio as influential factors affecting ethanol production in carbon monoxide fermentation using a packed-bed reactor. *Sustainable Energy & Fuels*, 4(4), 1963–1973. <https://doi.org/10.1039/c9se00943d>

Jedelhauser, M. & Roth, S. (2020). CO₂-Preis für Verbrennung von Abfällen ist notwendig und wirksam: BEHG: Abfallverbrennung darf nicht vom Emissionshandel freigestellt werden. Naturschutzbund Deutschland e. V. (NABU). https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/konsumressourcenmuell/200629_nabu_behg_final.pdf

Kantzow, C., Mayer, A. & Weuster-Botz, D. (2015). Continuous gas fermentation by *Acetobacterium woodii* in a submerged membrane reactor with full cell retention. *Journal of biotechnology*, 212, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2015.07.020>

Kätelhön, A., Meys, R., Deutz, S., Suh, S. & Bardow, A. (2019). Climate change mitigation potential of carbon capture and utilization in the chemical industry. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(23), 11187–11194. <https://doi.org/10.1073/pnas.1821029116>

KlimaManufaktur (2019). Urkunde CO₂-Kompensation: Firma ITAD e. V. <https://www.itad.de/service/downloads/20201124-urkunde-co2-kompensation-fuer-2020.pdf>

Köpke, M., Simpson, S. D., Liew, F. & Chen, W. (2012). Fermentation process for producing isopropanol using a recombinant microorganism (US 2012/0252083 A1). US. <https://patentimages.storage.googleapis.com/4d/4c/68/f8e7f0ad8dff9e/US20120252083A1.pdf>

Krajewska, B. (2018). Urease-aided calcium carbonate mineralization for engineering applications: A review. *Journal of advanced research*, 13, 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2017.10.009>

Kreck, A., Maibach, M., Nillmaier, J.-S., Schulz-Nigmann, W. & Weber, L. (2019). Elektroauto gleich „Nullemissionsauto“? Eine Bewertung des CO₂-Ausstoßes von Elektrofahrzeugen unter realen Bedingungen. WI-Report Nr. 005. Friedberg. Technische Hochschule Mittelhessen (THM). http://digdok.bib.thm.de/volltexte/2019/5291/pdf/WI_Report_005_Kreck_Maibach_Nillmaier_Schulz_Nigmann_Weber_Elektroauto_gleich_Nullemissionsauto_v1_2019.pdf

Kundiayana, D. K., Huhnke, R. L. & Wilkins, M. R. (2010). Syngas fermentation in a 100-L pilot scale fermentor: design and process considerations. *Journal of bioscience and bioengineering*, 109(5), 492–498. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2009.10.022>

Leisin, M. (August 2019). Energiewende in der Industrie – Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor: Branchensteckbrief der Glasindustrie. Bericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER); Navigant Energy Germany GmbH; Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (fFE); BGG und Partner. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-glas.pdf?__blob=publicationFile&v=4

LfU Brandenburg. (2018) CO₂-Emissionsfaktoren nach Energieträgern. https://lfu.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.3310.de/emissionsfaktoren_co2_2017.pdf

Liu, K., Atiyeh, H. K., Stevenson, B. S., Tanner, R. S [Ralph S.], Wilkins, M. R. & Huhnke, R. L. (2014). Continuous syngas fermentation for the production of ethanol, n-propanol and n-butanol. *Bioresource technology*, 151, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.059>

Long, N., Lee, J., Koo, K.-K., Luis, P. & Lee, M [Moonyong] (2017). Recent progress and novel applications in enzymatic conversion of carbon dioxide. *Energies*, 10(4), Artikel 473. <https://doi.org/10.3390/en10040473>

Mac Dowell, N., Fennell, P. S [Paul S.], Shah, N. & Maitland, G. C. (2017). The role of CO₂ capture and utilization in mitigating climate change. *Nature Climate Change*, 7(4), 243–249. <https://doi.org/10.1038/nclimate3231>

Majumdar, A. & Deutch, J. (2018). Research opportunities for CO₂ utilization and negative emissions at the gigatonne scale. *Joule*, 2(5), 805–809. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.04.018>

Martin, M. E., Richter, H., Saha, S. & Angenent, L. T. (2016). Traits of selected *Clostridium* strains for syngas fermentation to ethanol. *Biotechnology and bioengineering*, 113(3), 531–539. <https://doi.org/10.1002/bit.25827>

MDR Thüringen (2020). Müllverbrennungsanlage in Zella-Mehlis soll Methanol-Treibstoff herstellen. Mitteldeutscher Rundfunk (MDR). <https://www.mdr.de/nachrichten/thueringen/sued-thueringen/schmalkalden-meinigen/muellverbrennung-methanol-treibstoff-abfall-100.html>

Verband der Automobilindustrie (28. Oktober 2020). Wir sind bereit: Die deutsche Automobilindustrie will klimaneutrale Mobilität spätestens 2050. Dazu werden alle Technologien gebraucht [Press release]. Berlin. <https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/201028-Wir-sind-bereit.html>

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Dezember 2019). Integriertes Energie- und Klimaschutzkonzept Baden-Württemberg. Entwurf. Stuttgart. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM). https://beteiligungsportal.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/beteiligungsportal/UM/IEKK/Dateien/Entwurf_Massnahmenkatalog_IEKK.pdf

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg & Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg. (Juni 2019). Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg. Stuttgart. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM); Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (MLR).

Mock, J., Zheng, Y., Mueller, A. P., Ly, S., Tran, L., Segovia, S., Nagaraju, S., Köpke, M., Dürre, P. & Thauer, R. K. (2015). Energy conservation associated with ethanol formation from H₂ and CO₂ in *Clostridium autoethanogenum* involving electron bifurcation. *Journal of bacteriology*, 197(18), 2965–2980. <https://doi.org/10.1128/JB.00399-15>

Mohammadi, M., Younesi, H., Najafpour, G. & Mohamed, A. R. (2012). Sustainable ethanol fermentation from synthesis gas by *Clostridium ljungdahlii* in a continuous stirred tank bioreactor. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 87(6), 837–843. <https://doi.org/10.1002/jctb.3712>

Molitor, B., Mishra, A. & Angenent, L. T. (2019). Power-to-protein: converting renewable electric power and carbon dioxide into single cell protein with a two-stage bioprocess. *Energy & Environmental Science*, 12(12), 3515–3521. <https://doi.org/10.1039/c9ee02381j>

Müller, L [Laura], Spannagl, T., Möller, H., Schauer, M., Schleicher, E. & Schmitt, M. (Juni 2020). Nachhaltigkeit bei Schwenk: Informationen zur ökonomischen, ökologischen und sozialen Welt unserer Baustoffe. Ulm. SCHWENK Zement KG.

Müller, T. E., Leitner, W., Markewitz, P. & Kuckshinrichs, W. (2015). Opportunities for utilizing and recycling CO₂. In W. Kuckshinrichs & J.-F. Hake (Hrsg.), *Carbon Capture, Storage and Use: Technical, Economic, Environmental and Societal Perspectives* (S. 67–100). Springer International Publishing.

MVV Energie AG. (2021). Klimaschutz und Nachhaltigkeit sind zentrale Bausteine der DNA unseres Unternehmens. MVV Energie AG. <https://www.mvv.de/de/ueber-uns/nachhaltigkeit/klimaschutz-und-nachhaltigkeit>

Naims, H., Olfe-Kräutlein, B., Lorente Lafuente, A. M. & Bruhn, T. (Dezember 2015). CO₂-Recycling – Option für Politik und Gesellschaft? Zwölf Thesen zur gesellschaftlichen und politischen Bedeutung von Carbon Capture and Utilisation (CCU)-Technologien. Potsdam. Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS). <https://doi.org/10.2312/iass.2015.034>

Olfe-Kraeutlein, B., Naims, H., Bruhn, T. & Lorente Lafuente, A. M. (November 2016). CO₂ als Wertstoff: Herausforderungen und Potenziale für die Gesellschaft. Potsdam. Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS). https://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/iass_study_nov2016_de_co2-als-wertstoff.pdf <https://doi.org/10.2312/iass.2016.025>

Otto, A., Grube, T., Schiebahn, S. & Stolten, D. (2015). Closing the loop: captured CO₂ as a feedstock in the chemical industry. *Energy & Environmental Science*, 8(11), 3283–3297. <https://doi.org/10.1039/c5ee02591e>

Phillips, J. R., Atiyeh, H. K., Tanner, R. S [Ralph S.], Torres, J. R., Saxena, J., Wilkins, M. R. & Huhnke, R. L. (2015). Butanol and hexanol production in *Clostridium carboxidivorans* syngas fermentation: Medium development and culture techniques. *Bioresource technology*, 190, 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.043>

Phillips, J. R., Klasson, K. T., Clausen, E. C. & Gaddy, J. L [J. L.] (1993). Biological production of ethanol from coal synthesis gas. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 39-40(1), 559–571. <https://doi.org/10.1007/BF02919018>

Continental. (4. Dezember 2020). Mehr Nachhaltigkeit für emissionsfreie Fahrzeuge: Continental ist Wegbereiter für neuen Industriemaßstab [Press release]. Hannover. <https://www.continental.com/de/presse/pressemitteilungen/nachhaltigkeit-fuer-emissionsfreie-fahrzeuge-242244>

Ramirez Ramirez, A., El Khamlichi, A., Markowz, G., Rettenmaier, N., Baitz, M., Jungmeier, G. & Bradley, T. (März 2020). LCA4CCU – Guidelines for Life Cycle Assessment of Carbon Capture and Utilisation. Document reference: LCA4CCU001. Generaldirektion Energie (DG ENER). <https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/LCA4CCU-March-2020-Release-v1-0.pdf>

Redl, S., Diender, M., Jensen, T. Ø., Sousa, D. Z. & Nielsen, A. T. (2017). Exploiting the potential of gas fermentation. *Industrial Crops and Products*, 106, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.11.015>

Rehbock, E. & Habel, A. (September 2020). Stellungnahme des bvse zum Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Brennstoffemissionshandelsgesetzes anlässlich der öffentlichen Anhörung am 16.09.2020. Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V. (bvse). <https://www.bundestag.de/resource/blob/791920/8ec03bbdb02c8934ccecd57b35c91e64/bvse-Eric-Rehbock-data.pdf>

Robert Bosch GmbH. (2021). Bosch stellt sich ab 2020 klimaneutral. <https://www.bosch.com/de/unternehmen/nachhaltigkeit/umwelt/>

Roh, K., Bardow, A., Bongartz, D., Burre, J., Chung, W., Deutz, S., Han, D., Heßelmann, M., Kohlhaas, Y., König, A., Lee, J. S., Meys, R., Völker, S., Wessling, M., Lee, J. H. & Mitsos, A. (2020). Early-stage evaluation of emerging CO₂ utilization technologies at low technology readiness levels. *Green Chemistry*, 22(12), 3842–3859. <https://doi.org/10.1039/c9gc04440j>

Sappi Ehningen GmbH. (Mai 2020). Umwelterklärung 2019: Sappi Europe. Werk Ehningen. Sappi. <https://cdn-s3.sappi.com/s3fs-public/EMAS%20Umwelterklaerung%20Sappi%20Ehningen%202019.pdf>

Sathish, A., Sharma, A., Gable, P., Skiadas, I., Brown, R. & Wen, Z. (2019). A novel bulk-gas-to-atomized-liquid reactor for enhanced mass transfer efficiency and its application to syngas fermentation. *Chemical Engineering Journal*, 370, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.183>

Schaeffer, H. A. & Langfeld, R. (2020). Werkstoff Glas: Alter Werkstoff mit großer Zukunft (2. Aufl.). Technik im Fokus. Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-60260-7>

Schmitz, A., Kami ski, J., Maria Scalet, B. & Soria, A. (2011). Energy consumption and CO₂ emissions of the European glass industry. *Energy Policy*, 39(1), 142–155. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.09.022>

Schröder, M. (2021). Keine fossile Verbrennung ohne CO₂-Preis – wie wirkt das BEHG? recyclingnews. https://www.recyclingnews.de/politik_und_recht/keine-fossile-verbrennung-ohne-co2-preis-wie-wirkt-das-behg/

SCHWENK Zement KG (2021). Nachhaltigkeit. SCHWENK Zement KG. <https://www.schwenk.de/unternehmen/nachhaltigkeit/>

Shen, Y., Brown, R. & Wen, Z. (2014). Syngas fermentation of Clostridium carboxidivoran P7 in a hollow fiber membrane biofilm reactor: Evaluating the mass transfer coefficient and ethanol production performance. *Biochemical Engineering Journal*, 85, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2014.01.010>

Simpson, S. D., Köpke, M., Smart, K. F., Tran, L. P. & Sechrist, P. (2014). A system and method for controlling metabolite production in a microbial fermentation(WO2014/151158A1). US. <https://patentimages.storage.googleapis.com/bc/64/9f/18d10c103a7919/WO2014151158A1.pdf>

Simpson, S. D., Tran, L. P., Michalcea, C. D., Fung, J. M. Y. & Liew, F. (2008). Production of butanediol by anaerobic microbial fermentation(WO 2009/151342 A1). <https://patentimages.storage.googleapis.com/cf/23/ab/d9ad1e3700a88f/WO2009151342A1.pdf>

Smolinka, T., Günther, M. & Garche, J. (Juli 2011). Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien. Kurzfassung des Abschlussberichts. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE); FUEL CELL and BATTERY CONSULTING (FCBAT). <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A872387518/Stand-und-Entwicklungspotenzial-der-Wasserelektrolyse/>

Stapmanns, C. & Schuhl, K. (2019). Aktualisierte Umwelterklärung 2019. Mercedes Benz AG. Standort Sindelfingen. Daimler AG. https://www.emas.de/fileadmin/user_upload/ue/reg/DE-175-00005_daimler_Sindelfingen.pdf

Statistikportal (2020). Entsorgung von Abfällen nach Art der Entsorgung. Statistische Ämter des Bundes und der Länder. <https://www.statistikportal.de/de/entsorgung-von-abfaellen-nach-art-der-entsorgung>

Sternberg, A., Jens, C. M. & Bardow, A. (2017). Life cycle assessment of CO₂-based C1-chemicals. *Green Chemistry*, 19(9), 2244–2259. <https://doi.org/10.1039/c6gc02852g>

Stich, S. (2020). Die Automobilindustrie auf ihrem Weg zur Klimaneutralität. DFG - Institute for Energy, Ecology and Economy. <https://dfge.de/die-automobilindustrie-auf-ihrem-weg-zur-klimaneutralitaet/>

Stöckmann, M. & Bertau, M. (2020). Kohlenstoff Recycling aus Abfallbehandlungsanlagen – Baustein für eine biobasierte Industrie? *Chemie Ingenieur Technik*, 92(11), 1700–1710. <https://doi.org/10.1002/cite.202000069>

Straub, M., Demler, M., Weuster-Botz, D. & Dürre, P. (2014). Selective enhancement of autotrophic acetate production with genetically modified *Acetobacterium woodii*. *Journal of biotechnology*, 178, 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2014.03.005>

Strogies, M. & Gniffke, P. (Juli 2020). Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2020: Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2018. Dessau-Roßlau. Umweltbundesamt (UBA). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-15-climate-change_22-2020_nir_2020_de.pdf

Tanner, R. S [R. S.], Miller, L. M. & Yang, D. (1993). Clostridium ljungdahlii sp. nov., an acetogenic species in clostridial rRNA homology group I. *International journal of systematic bacteriology*, 43(2), 232–236. <https://doi.org/10.1099/00207713-43-2-232>

Teixeira, L. V., Moutinho, L. F. & Romão-Dumaresq, A. S. (2018). Gas fermentation of C1 feedstocks: commercialization status and future prospects. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 12(6), 1103–1117. <https://doi.org/10.1002/bbb.1912>

Thi, H. N., Park, S., Li, H. & Kim, Y.-K. (2020). Medium compositions for the improvement of productivity in syngas fermentation with *Clostridium autoethanogenum*. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 25(3), 493–501. <https://doi.org/10.1007/s12257-019-0428-4>

Tran, L. P. & Simpson, S. D. (2012). A fermentation process(WO2013/036147A2). <https://patentimages.storage.googleapis.com/a3/15/51/a2af9a99d24f45/WO2013036147A2.pdf>

Treder, M. & Gehring, M. (2020). Abfallwirtschaft durch Brennstoffemissionshandel – Teil 2: Kosten und Lenkungswirkung. *Müll und Abfall*(12), 615–622. <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2020.12.05>

Ulrich, K. (2020). Dem Verbrennungsmotor geht es an den Kragen. Deutsche Welle. <https://www.dw.com/de/dem-verbrennungsmotor-geht-es-an-den-kragen/a-55662723>

United Nations Environment Programme (2019). Waste-to-energy: Considerations for informed decision-making. <http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28413/WTEfull.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Valgepea, K., Souza Pinto Lemgruber, R. de, Abdalla, T., Binos, S., Takemori, N., Takemori, A., Tanaka, Y., Tappel, R., Köpke, M., Simpson, S. D., Nielsen, L. K [Lars Keld] & Marcellin, E. (2018). H₂ drives metabolic rearrangements in gas-fermenting *Clostridium autoethanogenum*. *Biotechnology for biofuels*, 11, Artikel 55. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1052-9>

VCÖ (o. J.). Wie viele Ressourcen werden bei der Pkw-Produktion verbraucht? <https://www.vcoe.at/service/fragen-und-antworten/wie-viele-ressourcen-werden-bei-der-pkw-produktion-verbraucht>

Verein Deutscher Zementwerke e. V. (2019). Zementindustrie im Überblick 2019/2020. Berlin. <https://www.vdz-online.de/publikationen/zementindustrie-im-ueberblick/>

Verein Deutscher Zementwerke e. V. (Juli 2020a). Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2019. Düsseldorf. https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/umweltschutz/Umweltdaten/VDZ_Umweltdaten_Environmental_Data_2019.pdf

Verein Deutscher Zementwerke e. V. (November, 2020b). Dekarbonisierung von Zement und Beton - Minderungspfade und Handlungsstrategien. Düsseldorf. <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/dekarbonisierung-von-zement-und-beton-minderungspfade-und-handlungsstrategien>

Volkswagen AG (2019). Borneo, Grünstrom & Co.: Das tut Volkswagen für das Klima. <https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2019/12/what-volkswagen-is-doing-for-the-environment.html>

Wang, S., Huang, H., Kahnt, J., Mueller, A. P., Köpke, M. & Thauer, R. K. (2013). NADP-specific electron-bifurcating FeFe-hydrogenase in a functional complex with formate dehydrogenase in *Clostridium autoethanogenum* grown on CO. *Journal of bacteriology*, 195(19), 4373–4386. <https://doi.org/10.1128/JB.00678-13>

WWF Deutschland (Februar 2019). Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie: Hintergrund und Handlungsoptionen. WWF. https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Klimaschutz_in_der_Beton-_und_Zementindustrie_WEB.pdf

Yishai, O., Lindner, S. N., La Gonzalez de Cruz, J., Tenenboim, H. & Bar-Even, A. (2016). The formate bio-economy. *Current opinion in chemical biology*, 35, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2016.07.005>

Yuan, Z., Eden, M. R. & Gani, R. (2016). Toward the development and deployment of large-scale carbon dioxide capture and conversion processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(12), 3383–3419. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b03277>

Zahn, J. A. & Saxena, J. (2010). A novel ethanologenic *Clostridium* species, *Clostridium coskatii*(WO 2011/116124 A2). <https://patentimages.storage.googleapis.com/dc/de/cf/70b210c7ddf1d7/WO2011116124A2.pdf>

Zhu, Q. (2019). Developments on CO₂-utilization technologies. *Clean Energy*, 3(2), 85–100. <https://doi.org/10.1093/ce/zkz008>

Zimmerman, A., Wunderlich, J., Buchner, G., Müller, L [Leonard], Armstrong, K., Michailos, S., Marxen, A., Naims, H., Mason, F., Stokes, G. & Williams, E. (2018). Techno-economic assessment & Life Cycle Assessment guidelines for CO₂ utilization. <https://doi.org/10.3998/2027.42/145436>

ERSTELLT VON



STAND

Oktober 2021

Fordern Sie gleich ein PDF
oder ein gedrucktes Exemplar
der Endversion an:



GEFÖRDERT UND BEGLEITET DURCH DAS



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT