Fraunhofer ISI

Technologie- und Marktstudie:

Übersicht über Technologien zur bioinspirierten CO_2-Fixierung und -Nutzung sowie der Akteure in Baden-Württemberg

Bärbel Hüsing, Heike Aichinger, Cornelius Moll, Frank Marscheider-Weidemann, Martin Wietschel



FORSCHUNGSBERICHT BWPLUS

Autorinnen und Autoren der Studie

Bärbel Hüsing (Projektleitung)
Heike Aichinger
Cornelius Moll
Frank Marscheider-Weidemann
Martin Wietschel

unter Mitarbeit von

Ulrich Schmoch (Patent- und publikationsstatistische Analysen)
Silke Just (Assistenz)
Jeanette Braun, Sabine Wurst (Grafische Gestaltung)

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
https://www.isi.fraunhofer.de

Dieser Bericht ist auch über den Publikationsdienst der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (https://pudi.lubw.de/) verfügbar. Weiterer Bestandteil des Vorhabens ist die Broschüre „CO_2 und Sonnenenergie – Potenziale für die Bioökonomie“. Sie ist als Download verfügbar: https://s.fhg.de/xrA

Bildnachweis

Cover: Rémi Walle für Unsplash

Das Vorhaben wurde gefördert durch das Umweltministerium Baden-Württemberg, im Programm BWPLUS „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ im Kontext der Landesstrategie „Nachhaltige Bioökonomie für Baden-Württemberg“.
Förderkennzeichen: BWCO2-19001

Wir danken Frau Dr. Elisabeth Saken-Braunstein, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, für ihre aktive Unterstützung durch vielfältige Hinweise und Kommentare, die zum Gelingen des Vorhabens beigetragen haben.

Bioökonomie Baden-Württemberg

BWPLUS

Baden-Württemberg
MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Karlsruhe, August 2020, Überarbeitung im März 2021

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis ..... **v**

Abbildungsverzeichnis ..... **vii**

Abkürzungsverzeichnis ..... **viii**

Zusammenfassung ..... **I**

1 Motivation und Hintergründe des Vorhabens **1**

2 Zielsetzung **3**

3 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde **4**

4 Vorgehensweise und Methodik **7**

4.1 Informationsrecherchen 7

4.2 Patent- und publikationsstatistische Analysen 7

4.3 Interviews und Validierungsworkshop 8

5 Ergebnisse des Technologiescreenings **10**

5.1 Screeningkonzept 10

5.2 Übersicht über biologische und biotechnische Technologien und Prozessmodule 11

5.2.1 CO_2-Nutzung in Land- und Forstwirtschaft 11

5.2.2 CO_2-Nutzung durch natürlich vorkommende Mikroorganismen, Enzyme und Stoffwechselwege 12

5.2.2.1 Modifizierte Photosynthese 15

5.2.2.2 Gasfermentationen 16

5.2.3 CO_2-Nutzung durch das Design nicht-natürlicher Stoffwechselwege 16

5.2.4 Carboanhydrase-katalysierte Konversion von CO_2 zu HCO_3^- 17

5.2.5 Mikrobiell induzierte Calciumcarbonatfällung 18

5.2.6 Biophotovoltaik 19

5.2.7 Biologische Wasserstoffgewinnung 21
5.2.8 Elektrobiosynthese 24
5.2.9 C_1-Fermentationen 24
5.2.10 Publikations- und patentstatistische Analyse des Technologiefeldes 26
5.3 Übersicht über physikalisch-chemische Technologien 32
5.3.1 Photovoltaik 32
5.3.2 Power-to-X 32
5.3.2.1 Wasserelektrolyse 34
5.3.2.2 Elektrochemische Reduktion von CO_2 35
5.3.3 Direct Air Capture 36
5.3.4 Chemische Katalyse 36
5.3.5 Photokatalytische Reduktion von CO_2 37
5.3.6 Künstliche Photosynthese 38
5.4 Einbettung der Technologien in ein künftiges Wirtschaftssystem 39
5.4.1 Hintergrund, Ausgangslage 39
5.4.2 Erwartete Entwicklungen und Implikationen für CCU-Technologien 39
5.4.2.1 Energiebedarf und -produktion in Deutschland 39
5.4.2.2 Verfügbarkeit von CO_2-Quellen 40
5.4.2.3 Verfügbarkeit von Wasserstoff 41
5.4.2.4 Bedeutung von CCU-Standorten 42
5.4.2.5 Regulatorische Einordnung von CO_2-basierten Produkten 42
5.4.3 Implikationen für die Technologiebewertung 42
5.5 Fazit des Screenings: Definition und Abgrenzung des Vertiefungsgegenstandes 43

6 Modifizierte Photosynthese 46
6.1 Biologischer Hintergrund 46
6.2 Technische Nutzung und industrieller Einsatz 49

7 Gasfermentationen 52
7.1 Anaerobe Gasfermentation 52
7.1.1 Biologischer Hintergrund 52
7.1.2 Technische Nutzung und industrieller Einsatz 53
7.1.2.1 LanzaTech 53

7.1.2.2 Rheticus-Projekt 54
7.2 Aerobe Gasfermentation 55
7.3 Biologische Methanisierung 56

8 Elektrobiosynthesen 58
8.1 Biologischer Hintergrund 58
8.2 Technische Nutzung und industrieller Einsatz 59

9 Vergleichende Bewertung der Verfahren 60
9.1 Zielsetzung und Auswahl der Technologien 60
9.2 Vergleich der biotechnischen Verfahren untereinander 60
9.2.1 Integrationsgrad der Prozesse 60
9.2.2 Vergleich nach technologischer Reife 62
9.2.3 Multikriterielle Bewertung der biotechnischen Verfahren untereinander 64
9.2.3.1 Bewertung auf Basis theoretischer Werte aus der Literatur 65
9.2.3.2 Stand und Perspektiven von Forschung und Entwicklung 65
9.2.3.3 Eignung für einen industriellen Einsatz 66
9.2.3.4 Stand und Perspektiven hinsichtlich der industriellen Nutzung 67
9.2.3.5 Fazit der multikriteriellen vergleichenden Bewertung 67
9.3 Biotechnische Verfahren im Vergleich mit physikalisch-chemischen Verfahren 67
9.4 Schlussfolgerungen aus dem multikriteriellen Technologievergleich 69

10 Potenziale für und in Baden-Württemberg 73
10.1 Forschung und Entwicklung 73
10.2 Überführung in den Demonstrations- und Pilotmaßstab 77
10.3 Industrielle Implementierung 79
10.4 Landesstrategien und -aktionspläne 83
10.5 Öffentliche FuE-Förderung zur biotechnischen und bioinspirierten CO_2-Nutzung 92
10.5.1 Deutschland 92
10.5.2 Förderung EU 95

10.6 Akteure und Aktivitäten in Baden-Württemberg 97

10.7 Bewertung von Stärken und Schwächen bezogen auf Baden-Württemberg (SWOT) und Schlussfolgerungen 102

11 Schlussfolgerungen und Empfehlungen 107

11.1 Potenziale der biotechnischen und bioinspirierten Verfahren 107

11.2 Potenziale für Baden-Württemberg 109

11.3 Empfehlungen für ein Konzept zur Förderung in Baden-Württemberg 110

12 Literaturverzeichnis 117

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: „Module“ der Photosynthese und mögliche Optionen für deren technische Umsetzung 11

Tabelle 2: Übersicht über mikrobielle Stoffwechseltypen, die sich in der genutzten Kohlenstoff- und Energiequelle unterscheiden 13

Tabelle 3: Stoffwechselwege für die CO_2-Fixierung 14

Tabelle 4: Übersicht über Prozesse der biologischen Wasserstoffproduktion.23

Tabelle 5: Wirkungsgrade der Solarenergienutzung durch oxygene Photosynthese 47

Tabelle 6: Erforderliche Kompetenzen für die erfolgreiche Erforschung und Entwicklung von biotechnischen und bioinspirierten Verfahren zur CO_2-Nutzung....74

Tabelle 7: Stärken, Chancen, Schwächen und Risiken im Bereich FuE in Baden-Württemberg 75

Tabelle 8: Erforderliche Kompetenzen für das Scale-up sowie die Erprobung in Demonstrations- und Pilotanlagen 77

Tabelle 9: Stärken, Chancen, Schwächen und Risiken im Bereich Scale-up, Demonstrations- und Pilotanlagen in Baden-Württemberg 78

Tabelle 10: Stärken, Chancen, Schwächen und Risiken im Bereich industrielle Implementierung in Baden-Württemberg....80

Tabelle 11: Zur Umsetzung der Nachhaltigkeitsstrategie Baden-Württemberg formulierte Leitsätze einer nachhaltigen Entwicklung, zu denen biotechnische und bioinspirierte Verfahren der CO_2-Nutzung potenziell Beiträge leisten können 83

Tabelle 12: Maßnahmen in der Landesstrategie „Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg“ mit engem bzw. potenziellem Bezug zur biotechnischen und bioinspirierten CO_2-Nutzung 85

Tabelle 13: Maßnahmen im „Integrierten Energie- und Klimaschutzkonzept Baden-Württemberg“ mit Bezug zur biotechnischen und bioinspirierten CO_2-Nutzung 87

Tabelle 14: Stärken, Chancen, Schwächen und Risiken im Bereich Landesstrategien und -aktionspläne....90

Tabelle 15: H2020-Projekte zur biotechnischen CO_2-Nutzung im Aufruf „*Microbial platforms for CO_2-reuse processes in the low-carbon economy*“ 96

Tabelle 16: Forschungseinrichtungen in Baden-Württemberg mit relevanten Kompetenzen für einen Entwicklungsschwerpunkt zur biotechnischen bzw. bioinspirierten CO_2-Nutzung....98

Tabelle 17: Ausgewählte Unternehmen in Baden-Württemberg mit hohen CO_2-Emissionen 101

Tabelle 18: Stärken, Chancen, Schwächen und Risiken für biotechnische und bioinspirierte Verfahren zur CO_2-Nutzung in Baden-Württemberg 104

Tabelle 19: Anforderungen an einen Entwicklungsschwerpunkt zum biotechnologischen/bioinspirierten CO_2-Recycling in Baden-Württemberg 111

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ergebnis der patentstatistischen Recherchen, zeitliche Dynamik der Entwicklung in Teilbereichen des Technologiefeldes 2000-2016 28

Abbildung 2: Ergebnis der patentstatistischen Recherchen, Aufschlüsselung der Patentanmeldungen in Teilbereichen des Technologiefeldes nach Ländern bzw. Regionen, 2010-2016 29

Abbildung 3: Ergebnis der publikationsstatistischen Recherchen, zeitliche Dynamik der Entwicklung in Teilbereichen des Technologiefeldes 1990-2018 30

Abbildung 4: Ergebnis der publikationsstatistischen Recherchen, Aufschlüsselung der Patentanmeldungen in Teilbereichen des Technologiefeldes nach Ländern bzw. Regionen, 2009-2019 31

Abbildung 5: Übersicht über die Verfahren der biologischen und künstlichen Photosynthese 45

Abbildung 6: Prozesskonzepte für biotechnische und bioinspirierte Technologien zur CO_2-Nutzung 62

Abbildung 7: Bewertung der technologischen Reife für ausgewählte biotechnische und nicht-biotechnische Technologien zur CO_2-Nutzung sowie relevante *enabling technologies* 63

Abbildung 8: Multikriterielle vergleichenden Bewertung der biotechnischen Verfahren 64

Abbildung 9: Vergleichende Bewertung biotechnischer und physikalisch-chemischer Ansätze zur CO_2-Nutzung 69

Abbildung 10: CO_2-Emissionen einzelner Standorte der Grundstoffindustrie in Baden-Württemberg 2015 82

Abbildung 11: Förderkonzept zur biologischen und bioinspirierten CO_2-Nutzung in Baden-Württemberg und seine Vernetzung mit weiteren Maßnahmen (M) der Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie. 116

Abkürzungsverzeichnis

A	Ampere
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BVP	Biophotovoltaiksystem
B-W	Baden-Württemberg
Bio-CCU	Biotechnische und bioinspirierte Verfahren zur CO_2-Nutzung
CCU	Carbon Capture and Use
CCS	Carbon Capture and Storage
CH_4	Methan
CH_3COH	Methanol
cm, cm^2	Zentimeter, Quadratzentimeter
CO	Kohlenmonoxid
CO_2	Kohlenstoffdioxid, Kohlendioxid
ct	Cent
DAC	Direct Air Capture, Nutzung von CO_2 aus der Umgebungsluft
€	Euro
h	Stunde
H_2O	Wasser
H_2	Molekularer Wasserstoff
H2020	Horizon2020
HCO_3^-	Hydrogencarbonat
HCOOH	Ameisensäure, Formiat
IEKK	Integriertes Energie- und Klimaschutz-Konzept Baden-Württemberg
J	Joule
k	Kilo, Tausend, 10^3
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
l	Liter
LCA	Life Cycle Assessment, Lebenszyklusanalyse, Ökobilanz
LS!NB	Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg
m, m^2	Meter, Quadratmeter
NH_3	Ammoniak
O_2	Molekularer Sauerstoff
P2X, PtX	Power to X, Umwandlung von Strom in eine andere Energieform
PHA, PHB	Polyhydroxyalkanoate, Polyhydroxybutyrat
RubisCo	Ribulose-1,5-bisphosphat-Carboxylase
SNG	Synthetic natural gas; synthetisches Erdgas, Methan

t	Tonne
T	Tera, Billion, 10^{12}
TRL	Technology Readiness Level, Technologiereifegrad
W	Watt
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg
$	Dollar

Zusammenfassung

In diesem Vorhaben wurde eine Übersicht über Ansätze der biotechnischen und bioinspirierten CO_2-Nutzung und des CO_2-Recyclings erarbeitet. Die Übersicht umfasst die mikrobielle modifizierte Photosynthese, Gasfermentationen, Elektrobiosynthesen sowie enzymatische Ansätze. Diese Ansätze der modifizierten Photosynthese, der Gasfermentation sowie der Elektrobiosynthese wurden näher charakterisiert und in wissenschaftlich-technologischer Hinsicht vergleichend bewertet - untereinander sowie mit komplementären bzw. konkurrierenden Ansätzen der landwirtschaftlichen Biomasseproduktion, Power-to-X-Ansätzen und der künstlichen Photosynthese. Spezifische Stärken der biotechnischen Verfahren liegen in der Synthese CO_2-basierter längerkettiger, funktionalisierter Moleküle. Die aktuellen und potenziellen Kompetenzen und Akteure zur Nutzung dieser Technologien in Baden-Württemberg wurden identifiziert. Baden-Württemberg verfügt in Bezug auf FuE-Kompetenzen, wirtschaftliche und politische Rahmenbedingungen über sehr gute Voraussetzungen, beim biotechnischen CO_2-Recycling eine national und international führende Rolle einzunehmen. Allerdings muss die Ausschöpfung der vorhandenen Potenziale sowie der Synergien zur Power-to-X- und Wasserstofftechnologieforschung aktiv herbeigeführt und unterstützt werden. Es wird ein Förderkonzept für einen anwendungsorientierten Entwicklungsschwerpunkt zur biotechnischen und bioinspirierten CO_2-Nutzung und des CO_2-Recyclings vorgeschlagen. Ziel ist die Mobilisierung der einschlägigen FuE-Kompetenzen zur biotechnischen CO_2-Nutzung, eine Überführung ausgewählter Ansätze in den Pilotmaßstab innerhalb weniger Jahre, die Gewinnung von Industriepartnern sowie die Netzwerkbildung.

1 Motivation und Hintergründe des Vorhabens

Deutschland hat sich mit dem Übereinkommen der UN-Klimakonferenzen von Paris verpflichtet, seine Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um 95 Prozent verglichen mit dem Stand von 1990 zu verringern bzw. will bis 2050 Klimagasneutralität erreichen. Hierfür ist eine weitgehende Defossilisierung nötig, also der Verzicht auf die Nutzung fossiler Rohstoffe zugunsten erneuerbarer und klimagasneutraler Energieträger. Zur Deckung des Kohlenstoffbedarfs der industriellen Produktion muss zudem eine Kreislaufführung des Kohlenstoffs – unter anderem durch die Nutzung von Kohlenstoffdioxid (CO_2) als Rohstoff – erreicht werden.

In der Natur ist ein geschlossener Kohlenstoffkreislauf realisiert: Der Aufbau komplexer organischer Substanzen (z. B. Biomasse) erfolgt aus Wasser und CO_2 unter Nutzung der Energie des Sonnenlichts und Freisetzung von Sauerstoff über den Prozess der Photosynthese. Es folgt ein vielfältiger Um- und Abbau der Photosyntheseprodukte unter Sauerstoffverbrauch durch verschiedene Organismen. Diese Stoffwechselprozesse münden schlussendlich wieder in die Freisetzung zu CO_2 und Wasser, wodurch der Kreislauf geschlossen wird. Durch Photosynthese setzen Pflanzen, Algen und Bakterien mit Hilfe der Sonnenenergie jährlich global 450 Milliarden Tonnen CO_2 aus der Luft in Biomasse und vielfältige organische Substanzen um. Land- und Forstwirtschaft beruhen auf dieser Photosyntheseleistung.

Die Bioökonomie adressierte anfangs primär land- und forstwirtschaftlich produzierte Biomasse für eine energetische und industrielle Nutzung. Biomassebasierte Verfahren stehen jedoch potenziell in Nutzungskonkurrenz um Agrar- und Forstflächen für Nahrungsproduktion und Ökosystemdienstleistungen. Inzwischen schließt die Bioökonomie aber auch biotechnische Verfahren und Prozesse mit abiotischen Substraten sowie die Anwendung biologischen Wissens mit ein. Dies eröffnet die Nutzung biotechnischer und bioinspirierter Verfahren für eine solarenergiegetriebene CO_2-Kreislaufführung. Hierdurch leistet die Bioökonomie einen wichtigen Beitrag zur Defossilisierung und Etablierung einer kreislauforientierten Wirtschaft.

Biotechnische und bioinspirierte Verfahren für eine solarenergiegetriebene CO_2-Kreislaufführung beruhen zwar auf den Prinzipien der natürlichen Photosynthese, ohne sie jedoch 1:1 zu kopieren. Sie bergen das Potenzial, biomassebasierte Ansätze der Bioökonomie wirkungsvoll zu ergänzen oder teilweise sogar zu ersetzen, indem sie einen weitgehenden Verzicht auf fossile Kohlenstoff- und Energiequellen ermöglichen und unter moderaten Prozessbedingungen unabhängig von landwirtschaftlich nutzbaren Flächen betrieben werden könnten.

Um sich den großen Herausforderungen der Ressourcenverknappung und des Klimawandels zu stellen, hat das Land Baden-Württemberg seit 2007 mit seiner Nachhaltigkeitsstrategie Nachhaltigkeit zum zentralen Entscheidungskriterium von Regierungs- und Verwaltungs-

handeln gemacht (Geschäftsstelle Nachhaltigkeitsstrategie 2014). Sowohl in der auf der Nachhaltigkeitsstrategie aufsetzenden Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft und Ministerium für ländlichen Raum und Verbraucherschutz 2019) als auch im Integrierten Energie- und Klimaschutzkonzept (IEKK) des Bundeslandes ist die Maßnahme vorgesehen, gemeinsam mit anwendungsnaher Forschung und Industrie einen Entwicklungsschwerpunkt zum biotechnologischen/bioinspirierten CO_2-Recycling als Beitrag zu den Klimaschutzzielen 2030/2050 aufzubauen.

Diese Studie dient der Vorbereitung der Umsetzung dieser Maßnahmen, indem zum einen ein Überblick über relevante Ansätze zur biotechnologischen oder bioinspirierten CO_2-Fixierung und -Nutzung gegeben wird, diese vergleichend bewertet und die Potenziale speziell in und für Baden-Württemberg aufgezeigt werden. Auf dieser Basis wird ein Konzept für die Ausgestaltung des Entwicklungsschwerpunkts vorgeschlagen.

2 Zielsetzung

Ziel dieser Studie war es,

- eine aktuelle, umfassende Übersicht über das Technologiefeld der biotechnischen und bioinspirierten Möglichkeiten zur CO_2-Fixierung und -Nutzung zu erstellen,
- die einzelnen Technologien zu charakterisieren,
- die aktuellen und potenziellen Kompetenzen und Akteure zur Nutzung dieser Technologien in Baden-Württemberg zu identifizieren,
- eine vergleichende Bewertung der Technologien in technologischer, wirtschaftlicher sowie landespolitischer Hinsicht vorzunehmen,
- Stärken und Schwächen bezogen auf Baden-Württemberg aufzuzeigen sowie
- Empfehlungen für Entscheidungsträger in Forschung, Entwicklung, Wirtschaft, Landespolitik und zivilgesellschaftlichen Gruppen abzuleiten, ob, unter welchen Bedingungen und mit welchen Maßnahmen dieses Technologiefeld im Rahmen einer nachhaltigen Bioökonomie weiter umgesetzt werden könnte.

3 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der Transformation des derzeitigen, auf der Nutzung fossiler Rohstoffe beruhenden Wirtschaftssystems zu einer nachhaltigen, kreislauforientierten Wirtschaftsweise stellt aufgrund des anthropogen bedingten Klimawandels und der Endlichkeit fossiler Ressourcen eine der großen Herausforderungen für die kommenden Jahrzehnte dar. Innerhalb dieses Transformationsprozesses wird der Bioökonomie international (Fund et al. 2018), in Deutschland (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2014; Bundesministerium für Bildung und Forschung und Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2020) und auch in Baden-Württemberg (Hirth und et al. 2013; Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft und Ministerium für ländlichen Raum und Verbraucherschutz 2019) ein hoher Stellenwert zugemessen.

Zurzeit werden im Großteil der industriellen Produktionsverfahren der Bioökonomie heterotrophe Organismen für die Herstellung von biobasierten Chemikalien, Wert- und Treibstoffen eingesetzt. Heterotrophe Organismen nutzen organische Verbindungen aus der Biomasse (z. B. Kohlenhydrate, Lignocellulose) als Kohlenstoff- und Energiequelle. Würde die Transformation zu einer Bioökonomie jedoch ausschließlich auf dem Ausbau solcher Produktionsverfahren beruhen, wären Landnutzungskonflikte zwischen der Biomasseproduktion für industrielle und energetische Zwecke einerseits und der Nahrungsmittelproduktion für eine wachsende Weltbevölkerung andererseits absehbar (Bruinsma 2009) und die Bioökonomie somit nicht nachhaltig. Zudem sind die Umwandlungseffizienzen, bedingt durch die zahlreichen Prozessschritte, gering: Bezogen auf die eingesetzte Solarenergie wird bei der fermentativen Umsetzung von Biomasse nur etwa 0,2 Prozent der Energie in chemischer Form in den Zielprodukten gebunden (Claassens et al. 2016).

Parallel zur Entwicklung einer Bioökonomie wird auch der Wandel des Energiesystems vorangetrieben, um eine weitgehende Defossilisierung der Energieversorgung und -nutzung zu erzielen, also der Verzicht auf die Nutzung fossiler Rohstoffe zugunsten erneuerbarer und klimagasneutraler Energieträger. Dies ist zwingend erforderlich, damit Deutschland das Ziel erreichen kann, seine Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um 95 Prozent verglichen mit dem Stand von 1990 zu verringern bzw. Klimagasneutralität zu erreichen. Hierzu hat sich Deutschland mit dem Übereinkommen der UN-Klimakonferenzen von Paris verpflichtet. In den Sektoren Strom, Wärme, Transport und Industrieproduktion müssen daher die Nutzung fossiler Energieträger und Kohlenstoffquellen drastisch reduziert werden. Dies wird nur durch die Umstellung auf regenerative Energien, durch die Schließung von Materialkreisläufen, durch Kreislaufführung des Kohlenstoffs sowie der Erschließung von nicht-fossilen Kohlenstoffquellen möglich sein: Wenn fossile Energieträger, wo immer technisch möglich, durch klimagasneutrale Energieträger (meist regenerativ erzeugter Strom) ersetzt werden, geht dies zugleich mit einer „Decarbonisierung“ einher. Kohlenstoff ist aber essenzieller Rohstoff für die organische Chemie und die Vielzahl der darauf basierenden

Materialien und Produkte. Zur Deckung des Kohlenstoffbedarfs der industriellen Produktion muss daher zusätzlich eine Kreislaufführung des Kohlenstoffs durch die Schließung von Materialkreisläufen sowie durch die Nutzung von Kohlenstoffdioxid (CO_2) als Rohstoff erreicht werden. Diese Studie befasst sich mit der Nutzung von CO_2 als Rohstoff, wobei das CO_2 entweder als Abgas aus industriellen Punktquellen stammen kann (CO_2-Recycling) oder aber der Atmosphäre entnommen wird.

Zu den Lösungsansätzen, wie eine CO_2-Nutzung technisch erfolgen kann, gehören industrielle Produktionsprozesse, die vom Prinzip der biologischen Photosynthese inspiriert sind: Die natürliche Photosynthese ist ein biochemischer Prozess, bei dem die Energie des Sonnenlichts in chemisch gebundene Energie umgewandelt wird. Diese wird genutzt, um aus CO_2 aus der Luft und Wasser (H_2O) organische Verbindungen zu synthetisieren.

Da die natürliche Photosynthese ein sehr komplexer Prozess ist, kann eine „enge Biomimetik“ nur sehr langfristig erreicht werden – bislang liegen erst wenige *Proof of Concept* eines „künstlichen Blattes“ im Labormaßstab vor. Die künstliche Photosynthese – verstanden als voll integriertes System – wird zwar als sehr vielversprechend eingestuft, befindet sich in weiten Teilen aber noch im Stadium der Grundlagenforschung. Zwar sind einzelne Teilschritte der natürlichen Photosynthese (Absorption des Sonnenlichts, Ladungstrennung durch Elektronenübertragung (Elektronentransfer), Wasseroxidation (Wasserspaltung) sowie CO_2-Reduktion) sehr gut erforscht und die Funktionen in technischen Systemen nachgebildet worden; eine vollständige Integration dieser Teilschritte zu potenziell industriell relevanten Systemen erfordert jedoch noch erhebliche, langfristige Forschungsanstrengungen (European Commission, Directorate-General for Research & Innovation 2016; Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina und Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften 2018; Dau et al. 2019).

Weiter entwickelt sind zurzeit jedoch Ansätze, bei denen die einzelnen Teilschritte der natürlichen Photosynthese in technische Prozesse übertragen und diese Module zu einem Gesamtprozess gekoppelt werden. Derartige Ansätze werden häufig ebenfalls als künstliche Photosynthese bezeichnet. In dieser Studie werden jedoch nur voll integrierte Systeme, die alle Funktionen der natürlichen Photosynthese technisch nachahmen, als künstliche Photosynthese bezeichnet.

Die Umsetzung von CO_2 und Wasser zu Energieträgern und Chemikalien mit Hilfe der Sonnenenergie kann prinzipiell chemisch, elektrochemisch, bio- oder photochemisch erfolgen, und die hierfür erforderliche Energie kann thermisch, elektrisch, chemisch oder durch Licht bereitgestellt werden (Otto et al. 2017). Ein Schwerpunkt der aktuellen FuE-Förderung sind Power-to-X-Ansätze, die sich teilweise bereits in der industriellen Umsetzung befinden. Hierunter versteht man die Überführung von elektrischer Energie in eine andere Energieform. Beispielsweise nutzen einige PtX-Ansätze Strom aus Solarenergie, um elektrolytisch Wasserstoff (H_2) herzustellen. Dieser dient als Reduktionsmittel, um CO_2 chemisch-katalytisch zu reduzieren und zu Produkten, meist Energieträgern und

Basischemikalien, umzusetzen. Vorrangiges Ziel ist, das fluktuierende Angebot regenerativen Stroms stofflich zu speichern (Viebahn et al. 2018).

Während die oben genannten Ansätze der chemisch-technischen CO_2-Nutzung durch Power-to-X-Verfahren und der künstlichen Photosynthese in aktuellen Studien untersucht und bewertet worden sind (Viebahn et al. 2018; Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina und Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften 2018), fehlt noch eine entsprechende Studie, die CO_2-Nutzungs- und Recyclingverfahren beleuchtet, die rein biotechnisch sind oder aber zumindest einen oder mehrere biotechnische Prozessschritte umfassen (so genannte „hybride Verfahren“), und sie im Hinblick auf ihre Potenziale für ihren Einsatz in industriellen Prozessen im Rahmen einer nachhaltigen Bioökonomie bewertet. In eine derartige Studie müssen zumindest einbezogen werden

- Modifizierte Photosynthese: Die Energieumwandlungseffizienz von Solarenergie in Biomasse von Mikroalgen oder Cyanobakterien ist mit bis zu 3 Prozent höher als die Photosyntheseeffizienz von Pflanzen, die in der Größenordnung von 1 bis 2 Prozent liegt. Durch die Anwendung der Synthetischen Biologie und des *systems metabolic engineering* zur Modifizierung sowohl der Licht- als auch der Dunkelreaktion in Mikroorganismen, die zur Photosynthese befähigt sind, werden hier weitere – möglicherweise aber begrenzte – Effizienzsteigerungen erwartet.
- Bioanorganische Hybridsysteme: Da die Lichtumwandlungseffizienz von photovoltaischen Solarzellen die der natürlichen Photosynthese weit übersteigt, wird bioanorganischen Hybridsystemen ein großes Potenzial zugemessen. In bioanorganischen Hybridsystemen werden photovoltaische Stromerzeugung und Elektrolyse mit den (modifizierten) Stoffwechselleistungen autotropher Mikroorganismen gekoppelt. Den bioanorganischen Hybridsystemen ist auch die so genannte Elektrobiosynthese zuzuordnen: sehr unterschiedliche Gruppen von Bakterien können CO_2 als alleinige C-Quelle nutzen, wenn ihnen die erforderliche Energie für die CO_2-Reduktion in Form von Strom zugeführt wird. Hierbei erfolgt ein Ladungstransfer von Elektroden auf Mikroorganismen.
- CO_2-Fixierung: Da mittlerweile mehrere verschiedene Stoffwechselwege für die biologische CO_2-Fixierung bekannt sind, die die Effizienz des pflanzlichen CO_2-Fixierungsweges (Calvin-Benson-Zyklus) teilweise übersteigen, kann diese Biodiversität für die Konstruktion synthetischer CO_2-Fixierungswege genutzt werden, die in dieser Form in der Natur nicht vorkommen (Erb und Zarzycki 2016). Enzyme dieser nicht-natürlichen Synthesewege werden zudem durch Proteinengineering aufeinander abgestimmt und optimiert (Bernhardsgrütter et al. 2021). Dabei können zwei grundlegende Reaktionsmechanismen genutzt werden: die Carboxylierung, bei der CO_2 an ein Molekül angehängt wird, oder die Reduktion, bei der CO_2 zunächst zu Formiat oder CO reduziert wird, ehe es weiter verstoffwechselt wird (Cotton et al. 2018). Durch Kopplung dieser CO_2-Fixierungswege mit unterschiedlichen Biosynthesewegen könnte eine Vielzahl unterschiedlicher industrieller Produkte zugänglich werden.
- Enzymatische Verfahren: Auch enzymatische Verfahren sind Gegenstand der Forschung (Long et al. 2017).

4 Vorgehensweise und Methodik

4.1 Informationsrecherchen

Es wurde ein breit angelegtes Screening von Fachliteratur und grauer Literatur durchgeführt und durch manuelle Internetrecherchen ergänzt, um Optionen und Verfahren zur CO_2-Fixierung und -Nutzung zu identifizieren. Die Recherche erfolgt in den wissenschaftlichen Datenbanken Scopus[1] (Elsevier) und Pubmed[2] (National Center for Biotechnology Information, NCBI) sowie über frei verfügbare Internet-Suchmaschinen. Neben biotechnologischen und bio-inspirierten Verfahren wurden sowohl rein technische Verfahren als auch biotechnische und technische Teilschritte berücksichtigt. Diese Recherchen dienten als Basis für die Strukturierung des Forschungsfelds, zur Identifikation relevanter Ansätze und Akteure sowie als Informationsbasis für alle folgenden Schritte.

4.2 Patent- und publikationsstatistische Analysen

Zur Abbildung der zeitlichen Dynamik der Entwicklung des Technologiefeldes und zur Bestimmung der Position Deutschlands und Baden-Württembergs im internationalen Vergleich und zur Identifikation führender Akteure wurden patent- und publikationsstatistischen Analysen durchgeführt.

Für die patentstatistischen Analysen wurden zwei Datenbanken verwendet:

- Die frei verfügbare Datenbank des Europäischen Patentamtes Espacenet (https://worldwide.espacenet.com/) bietet nur eingeschränkte Suchmöglichkeiten, erlaubt jedoch den kostenfreien Zugriff auf die Original-Dokumente, sodass sie zur Prüfung der Qualität von Elementen der zu entwickelnden Recherchestrategie gut geeignet ist.
- Die kostenpflichtige Mehrwert-Datenbank Derwent World Patents Index® (DWPI) ermöglicht die Umsetzung komplexer Recherche-Strategien, leistungsstarke Stichwort-Recherchen und statistische Auswertungen. Aus Kostengründen können jedoch nicht die Original-Daten der Patentschriften überprüft werden.

Um das Feld adäquat zu beschreiben, wurden für die folgenden vier Teilbereiche separate Suchstrategien entwickelt:

- Strategie 1: Biotechnische Nutzung von C_1-Verbindungen. Stichwortsuche nach Nutzung von CO_2, CO, Abgasen oder Synthesegas als Substrat bzw. Edukt; Eingrenzung auf Patentklassen für biotechnische Verfahren; Ausschluss von Patentklassen für Landwirtschaft, Grüne Gentechnik und Mikroalgen.

---

1 https://www.scopus.com

2 https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/

- Strategie 2: Photosynthetische Mikroorganismen. Stichwortsuche nach Nutzung photoautotropher bzw. photosynthetischer Phänomene; Eingrenzung auf Patentklassen für biotechnische Verfahren; Ausschluss von Patentklassen für Landwirtschaft und Mikroalgen.
- Strategie 3: Hybride Systeme mit Elektrolyse bzw. mit Bioelektrosynthese. Stichwortsuche nach (bio)elektrolytischen, (bio)elektrochemischen und (bio)elektrosynthetischen Verfahren; Eingrenzung auf Patentklassen für biotechnische Verfahren; Ausschluss von Patentklassen für Landwirtschaft, Biosensoren und Messgeräten allgemein.
- Strategie 4: Bioinspirierte, nicht-biologische künstliche Photosynthese. Komplexe Stichwortsuche.

Die Suchstrategien basierten auf geeigneten Stichworten und Patentklassen (Cooperative Patent Classification (CPC) und International Patent Classification (IPC)). Die passenden Stichworte und Patentklassen wurden zunächst durch Recherchen und stichprobenartige inhaltliche Prüfung der Rechercheergebnisse in Espacenet identifiziert, überprüft und ggf. angepasst. So validierte Recherchestrategien wurden anschließend für Analysen in DWPI verwendet. Es wurden nur transnationale Patentanmeldungen (weltweite und europäische Patente) herangezogen, da die Erfindungshöhe hier i.d.R. größer ist und auf diese Weise ein Bias durch national unterschiedlich ausgeprägte Patentierneigung verringert werden kann (Frietsch und Schmoch 2010).

Die wissenschaftlichen Publikationstätigkeiten wurden auf Basis der Datenbank „Scopus“ (Elsevier) analysiert. Analog zu Suchstrategien für die Patentrecherche wurden zunächst geeignete Suchbegriffe zur Eingrenzung der Themenfelder identifiziert und getestet, zur spezifischen Eingrenzung wurde auch Themen und Suchbegriffe ausgeschlossen. Die Recherche wurde auf Primärpublikationen (Publikationsform „article“) eingeschränkt.

4.3 Interviews und Validierungsworkshop

Mit dem Ziel der Informationsrecherche sowie zur Diskussion vorläufiger Schlussfolgerungen und Empfehlungen wurden 14 leitfadengestützte, telefonische Interviews mit einschlägig ausgewiesenen Expertinnen und Experten geführt. Bei diesen handelte es sich um Personen aus der Wirtschaft (Vertreterinnen und Vertreter von Unternehmen und Industrievereinigungen) sowie aus der Grundlagen- und angewandten Forschung (Universitäten, Hochschulen und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen). Die Interviews dauerten zwischen 45 und 90 Minuten und wurden protokolliert. Die erhobenen Informationen wurden durch informelle Gespräche, z. B. mit Teilnehmenden auf einschlägigen Veranstaltungen ergänzt. Die Informationen aus den Interviews wurden trianguliert und zudem im Rahmen eines projektinternen Workshops diskutiert, an dem ISI-Expertinnen und -Experten aus verschiedenen Fachdisziplinen teilnahmen.

Die zentralen Projektergebnisse, vorläufigen Schlussfolgerungen und Empfehlungen wurden am 13.11.2019 im Rahmen eines eintägigen Validierungsworkshops am Fraunhofer ISI einem

Kreis fachlich einschlägig ausgewiesener Expertinnen und Experten vorgestellt und von diesen kritisch reflektiert und diskutiert, um hieraus die endgültigen Schlussfolgerungen und Empfehlungen abzuleiten. Bei der Mehrzahl der Workshopteilnehmerinnen und -teilnehmer handelte es sich um Akteure aus Baden-Württemberg.

Die Agenda des Workshops sowie die Einrichtungen, aus denen die Expertinnen und Experten stammen, die in Interviews bzw. in den Workshop eingebunden waren, sind im Anhang aufgeführt.

5 Ergebnisse des Technologiescreenings

5.1 Screeningkonzept

Die natürliche Photosynthese ist ein biochemischer Prozess, bei dem die Energie des Sonnenlichts in der so genannten Lichtreaktion zunächst in elektrische und schließlich in chemische Energie (ATP und Reduktionsäquivalente $NADPH+H^+$) umgewandelt wird. ATP und Reduktionsäquivalente werden anschließend in der so genannten Dunkelreaktion zur Reduktion von CO_2 zu Zwischenprodukten und letztlich zur Synthese von funktionalisierten und reduzierten organischen Verbindungen (z.B. Glucose) verwendet.

Die pflanzliche Photosynthese stellt ein vollintegriertes System dar, in dem Hell- und Dunkelreaktion sowohl physisch als auch prozessual miteinander gekoppelt sind. Im Fall einer technischen Anwendung ist es jedoch möglich, diese beiden Reaktionen, aber auch einzelne Prozessschritte unabhängig voneinander, räumlich und zeitlich getrennt, umzusetzen.

Entsprechend lassen sich Verfahren zur technischen Umsetzung des Photosyntheseprinzips auch anhand der Umsetzung einzelner Prozessschritte charakterisieren, und für jeden Prozessschritt kommen im Prinzip biotechnische oder physikalisch-chemische Ansätze in Betracht (Tabelle 1):

- Funktion 1: Konversion der Energie des Sonnenlichts in chemische oder elektrische Energie
- Funktion 2: Reduktion von CO_2 und Produktsynthese
  - Art des Reduktionsmittels
  - CO_2-Quelle
  - Prozess der CO_2-Fixierung
  - Produktsynthese

Diese verschiedenen Optionen können – zumindest theoretisch – frei miteinander kombiniert werden, wodurch sich prinzipiell eine Vielzahl von möglichen Prozessvarianten ergibt. Für eine Prozessentwicklung ließen sich jeweils die „besten“ Teilschritte bzw. Prozessmodule (z. B. mit dem höchsten Wirkungsgrad, dem niedrigsten Energieverbrauch, dem höchsten technologischen Reifegrad) auswählen, um diese dann miteinander zu kombinieren und abhängig voneinander zu optimieren. Gleichwohl ergeben sich neue Einschränkungen, beispielsweise aufgrund der Notwendigkeit, Energie und Stoffe zu speichern und zu transportieren, was zwangsläufig mit Verlusten und zusätzlichem Aufwand einhergeht.

Tabelle 1: „Module“ der Photosynthese und mögliche Optionen für deren technische Umsetzung

Solarenergie-wandlung	Reduktionsmittel	CO_2-Quelle	CO_2-Fixierung	Produktsynthese
Photosynthese (Licht ⇨ chem.)	$NADPH+H^+$	Atmosphäre (direkte Nutzung)	Biologische CO_2-Fixierung	Biosynthese
Photovoltaik (Licht ⇨ Solar-strom)	Elektronen (Solarstrom)	Atmosphäre, (Aufkonzentrie-rung mit DAC)	Modifizierte biolo-gische CO_2-Fixierung	Modifizierte Bio-synthese
	H_2 (aus H_2O-Elektro-lyse)	CO_2 aus Abgasen von Punktquellen	Chemisch-katalytische CO_2-Reduktion	Chemisch-katalytische Synthese
	H_2/Synthesegas aus Abgasen von Punktquellen	CO aus Abgasen von Punktquellen		
Photokatalyse	$NADPH+H^+$ [3]	CO, HCOOH (aus CO_2-Elektrolyse)		

Biologische Verfahren sind grün hinterlegt, rein technische Verfahren hellgrau.

In Anlehnung an die acatech-Leopoldina-Studie (Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina und Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften 2018) werden im folgenden Verfahren als hybride Verfahren bezeichnet, bei denen technische und biologische Ansätze kombiniert werden. Im Fokus des Screenings stehen Verfahren, die mindestens einen biotechnologischen Schritt beinhalten. Diese sind in Kapitel 5.2 beschrieben. Rein technische Verfahren werden im Rahmen dieser Studie berücksichtigt, wenn sie wichtige *enabling technologies* für biotechnologische Verfahren bzw. Prozessmodule in hybriden Verfahren darstellen, beispielsweise elektrolytische Verfahren zur Bereitstellung von Wasserstoff oder Kohlenmonoxid, oder als Referenztechnologien zum Zwecke der Einordnung und des Vergleichs. Diese physikalisch-chemischen Ansätze werden in Kapitel 5.3 kurz charakterisiert.

5.2 Übersicht über biologische und biotechnische Technologien und Prozessmodule

5.2.1 CO_2-Nutzung in Land- und Forstwirtschaft

Land- und Forstwirtschaft basieren auf der pflanzlichen Photosynthese, über die Biomasse aufgebaut wird. Die Überführung von atmosphärischem CO_2 in organische Substanzen erfolgt über den Calvin-Benson-Zyklus (Kap. 5.2.2). Diese Biomasse wird dann als Nahrungs- und

3 siehe z.B. https://www.uni-ulm.de/nawi/nawi-anorg1/rau-group/research/i-photocatalysis/

Futtermittel, als Energieträger, Werkstoff oder auch als Substrat für biotechnische Produktionsverfahren genutzt. Eine CO_2-Speicherung über längere Zeiträume kann in langlebigen Materialien (z. B. Holz) und auch durch Kohlenstoffbindung in Böden durch Wurzeln, in Humus oder Torf erfolgen.

Der Teil der Bioökonomie, der auf der Umsetzung von Biomasse basiert, leistet einen wichtigen Beitrag zur Defossilisierung von Energie- und Materialnutzung und zur Etablierung einer kreislauforientierten Wirtschaft. Biomassebasierte Verfahren für industrielle und energetische Anwendungen stehen jedoch potenziell in Nutzungskonkurrenz um Agrar- und Forstflächen für Nahrungsproduktion und Ökosystemdienstleistungen. Die Wirkungsgrade der pflanzlichen Solarenergiekonversion in Biomasse liegen unter Freilandbedingungen in der Größenordnung von 0,25 bis ca. 3 Prozent (Salimijazi et al. 2019).

Ertragssteigerungen bei der Züchtung von Nutzpflanzen wurden in der Vergangenheit meist dadurch erzielt, dass ein höherer Anteil der gebildeten Biomasse in Richtung des gewünschten Produkts (z. B. Frucht) gelenkt wurde. Nunmehr werden auch Züchtungsstrategien verfolgt, die auf die Erhöhung des Photosyntheseeffizienz oder der CO_2-Fixierungsrate abzielen (Ducat und Silver 2012). Entsprechende Ansätze zur Erhöhung der Wirkungsgrade und der Effizienz der Photosyntheseleistung treffen gleichermaßen auf Nutzpflanzen, Grünalgen und Cyanobakterien zu und werden in Kapitel 6 dargestellt.

Darüber hinaus wird in die CO_2-Nutzung durch land- und forstwirtschaftliche Nutzpflanzen in dieser Studie nicht weiter vertieft, sondern nur als Referenz, d. h. zum Vergleich der verschiedenen biotechnischen Optionen zur CO_2-Nutzung herangezogen (Kap. 9).

5.2.2 CO_2-Nutzung durch natürlich vorkommende Mikroorganismen, Enzyme und Stoffwechselwege

So genannte autotrophe Mikroorganismen sind in der Lage, CO_2 als alleinige Kohlenstoffquelle zu nutzen und daraus Biomasse und potenziell auch industriell interessante Produkte aufzubauen. Als Energiequelle für die Reduktion des CO_2 dienen entweder Licht (Photoautotrophie) oder anorganische Elektronendonatoren (Chemolithoautotrophie) (Tabelle 2). Die biotechnische Nutzung autotropher Mikroorganismen birgt das Potenzial, Zielprodukte energieeffizienter und mit höherem Wirkungsgrad zu synthetisieren als mit den derzeit ganz überwiegend industriell genutzten heterotrophen Mikroorganismen, die organische Kohlenstoffverbindungen als Kohlenstoff- und Energiequelle nutzen: Während am Beispiel der biotechnischen Ethanolproduktion ausgehend von Zuckerrohr ein Wirkungsgrad von ca. 0,2 Prozent (Energiegehalt des Ethanols bezogen auf die eingestrahlte Sonnenenergie) anzunehmen ist, kann der Wirkungsgrad bei der weniger Prozessstufen umfassenden Produktion von Ölen in photoautotrophen Mikroalgen bei ca. 1,5 Prozent liegen. Bei der Elektrobiosynthese (Kap. 5.2.8 und 8) von Polyhydroxybutyrat wurde sogar ein Wirkungsgrad von 7,6 Prozent erzielt (Claassens et al. 2016). Inwieweit diese orientierenden Werte im Einzelfall und auch im großtechnischen Maßstab erzielt werden können, muss experimentell ermittelt werden. Sie

weisen jedoch darauf hin, dass entsprechende, autotrophe Mikroorganismen nutzende biotechnische und biohybride Verfahren zur CO_2-Nutzung vorteilhaft sein können. Allerdings steht die Nutzung autotropher Mikroorganismen in der Biotechnologie im Vergleich zur Nutzung heterotropher Mikroorganismen noch am Anfang der Entwicklung.

Tabelle 2: Übersicht über mikrobielle Stoffwechseltypen, die sich in der genutzten Kohlenstoff- und Energiequelle unterscheiden

Stoffwechseltyp	Kohlenstoffquelle	Energiequelle
Heterotroph	Organische Kohlenstoffverbindung	Organische Kohlenstoffverbindung
Photoautotroph	CO_2	Licht
Chemolithoautotroph	CO_2	Anorganischer Elektronendonator
Mixotroph[4]	Organische Kohlenstoffverbindung CO_2	Organische Kohlenstoffverbindung Licht, anorganischer Elektronendonator

Quelle: eigene Zusammenstellung von Informationen aus Claassens et al. (2016)

Es sind im wesentlichen sechs Stoffwechselwege bekannt, über die CO_2 von autotrophen Organismen fixiert, d. h. in organische Kohlenstoffverbindungen überführt werden kann (Fuchs 2011). Tabelle 3 gibt eine Übersicht über diese Stoffwechselwege sowie den jeweiligen Bedarf an Reduktions- und Energieäquivalenten für die Synthese von 1 Mol Pyruvat, einem zentralen Zwischenprodukt. Es gibt nur zwei grundlegende Mechanismen, über die CO_2 in die Biosphäre gelangt: über Carboxylierung, bei der CO_2 an einen Metaboliten angehängt wird, oder über Reduktion, wobei CO_2 zu Formiat oder Kohlenmonoxid (CO) reduziert wird, ehe diese weiter verstoffwechselt werden. Von den sechs Stoffwechselwegen der CO_2-Fixierung nutzen fünf Wege den Mechanismus der Carboxylierung, nur einer, und zwar der Wood-Ljungdahl-Stoffwechselweg, den Mechanismus der Reduktion. Wie Tabelle 3 zeigt, birgt die CO_2-Reduktion das Potenzial, energieeffizienter als die Stoffwechselwege zu sein, die die Carboxylierung nutzen, und ihre biotechnische Nutzung könnte daher das Spektrum der verfügbaren CO_2-Nutzungsoptionen sinnvoll erweitern (Cotton et al. 2018; Bernhardsgrütter et al. 2019). Auf diesen Stoffwechselweg wird in Kapitel 7 näher eingegangen.

4 Mikroorganismen, die je nach Umweltbedingungen heterotroph oder autotroph wachsen können, werden als mixotroph bezeichnet.

Tabelle 3: Stoffwechselwege für die CO_2-Fixierung

Stoffwechselweg	Vorkommen (Auswahl)	Schlüsselenzyme	Mol Reduktionsäquivalente für Synthese von 1 Mol Pyruvat	Mol ATP für Synthese von 1 Mol Pyruvat	Anzahl Enzyme
Calvin-Benson-Zyklus	Pflanzen, Algen, Cyanobakterien, die meisten aeroben oder fakultativ anaeroben Eubakterien	Ribulose-1,5-bisphosphat-Carboxylase/oxygenase (RuBisCO):	5 NAD(P)H	7	10
Wood Ljungdahl Stoffwechselweg (Reduktiver Acetyl-CoA-Zyklus)	Methanogene und sulfatreduzierende Euryarchaeota, acetogene Firmicutes u. a.	Acetyl-CoA-Synthase/CO-Dehydrogenase	2 NAD(P)H, 2 Ferredoxin	Ca. 1	8
Reduktiver Citronensäurezyklus	Chlorobiales, Proteobacteria	2-Oxoglutarat-Synthase, ATP-Citrat-Lyase	2 NAD(P)H, 1NADH, 2 Ferredoxin	2-3	8
Dicarboxylat/ 4-Hydroxybutyrat-Zyklus	Anaerobe Thermoproteales	4-Hydroxybutyryl-CoA-Dehydratase	6 NAD(P)H	5	
3-Hydroxypropionat/ 4-Hydroxybutyrat-Zyklus	Aerobe Sulfolobales	Acetyl-CoA/Propionyl-CoA-Carboxylase	6 NAD(P)H	9	13
3-Hydroxypropionat-Bi-Zyklus	Chloroflexaceae	Malonyl-CoA-Reduktase, Propionyl-CoA-Synthase, Malyl-CoA-Lyase		7	

Quelle: eigene Zusammenstellung von Informationen aus Emerson und Stephanopoulos (2019) und Fuchs (2011)

Am intensivsten untersucht ist die CO_2-Fixierung über den Calvin-Benson-Zyklus, und es gibt zahlreiche Ansätze zu ihrer Optimierung, auf die in Kapitel 6 näher eingegangen wird. Die vier alternativen CO_2-Fixierungswege, die wie der Calvin-Benson-Zyklus die Carboxylierung nutzen, weisen jedoch jeweils Spezifika auf, die das Ausloten für biotechnische Anwendungen bzw. die Neukombination der jeweils beteiligten Enzyme attraktiv erscheinen lassen. Zu diesen Spezifika gehören – jeweils im Vergleich zum Calvin-Benson-Zyklus – beispielsweise höhere theoretische Wirkungsgrade, geringere ATP-Bedarfe pro fixiertem CO_2, weniger sauerstoffsensitive Enzyme, oder die Nutzung von Hydrogencarbonat (statt CO_2) als Substrat, was ggf. CO_2-Aufkonzentrierungsschritte entbehrlich machen könnte.

In der Photosynthese von Pflanzen, Algen und Cyanobakterien dient Wasser als Elektronendonator bzw. Reduktionsmittel. Für hybride biotechnische Verfahren zur CO_2-Nutzung kommen jedoch noch weitere unmittelbar verstoffwechselbare Elektronendonatoren in Betracht. Eine umfassende Übersicht und Charakterisierung dieser Elektronendonatoren geben Claassens et al. (2018). Als besonders vielversprechende Elektronendonatoren für hybride Verfahren, bei denen elektrochemische und biotechnische Verfahrensmodule gekoppelt werden, stufen sie H_2, CO und Formiat ein.

5.2.2.1 Modifizierte Photosynthese

Unter modifizierter Photosynthese werden biotechnische Prozesse zusammengefasst, bei denen photosynthetisch aktive Mikroorganismen genutzt werden. Ihre Stoffwechselleistungen werden mit Hilfe gentechnischer und systembiologischer Verfahren des *metabolic engineering* optimiert. Hierbei handelt es sich um mikrobielle Systeme, in denen alle Teilprozesse der Lichtabsorption, Wandlung in chemisch nutzbare Energie, CO_2-Fixierung und Synthese der Zielprodukte voll integriert in den Zellen der Mikroorganismen ablaufen.

Zur Photosynthese sind zum einen Grünalgen und Cyanobakterien natürlicherweise befähigt, die – wie Pflanzen – eine oxygene Photosynthese mit Wasser als Elektronendonator betreiben und CO_2 über den Calvin-Benson-Zyklus fixieren. Zum anderen gibt es Mikroorganismen, die Photosynthese unter anaeroben Bedingungen betreiben und anorganische, reduzierte Substanzen, z. B. Eisen-II-Ionen oder Schwefelwasserstoff, als Elektronendonatoren verwenden.

Modifikationen der Photosynthese richten sich zum einen auf die Prozesse der Lichtabsorption und Ladungstrennung selbst und zielen auf die Erhöhung des Wirkungsgrades der Sonnenlichtumwandlung in Reduktions- und Energieäquivalente ab, die die Mikroorganismen für weitergehende Synthesen nutzen. Zum anderen richten sich Optimierungsansätze auf das Schlüsselenzym des Calvin-Benson-Zyklus, die Ribulose-bisphosphat-Carboxylase (RubisCo) mit dem Ziel, die Reaktionsgeschwindigkeit der CO_2-Reduktion zu erhöhen und die unerwünschte Nebenreaktion mit Sauerstoff (so genannte Photorespiration) zu unterdrücken. Weitere Ansätze haben zum Ziel, den Stofffluss des photosynthetisch fixierten Kohlenstoffs in

Richtung der gewünschten Zielprodukte zu lenken. Hierzu werden entsprechende Stoffwechselwege in den photosynthetischen Mikroorganismen (heterolog) exprimiert und ihre Regulation entsprechend optimiert.

Auf die modifizierte Photosynthese wird vertiefend in Kapitel 6 eingegangen.

5.2.2.2 Gasfermentationen

Einige Mikroorganismen sind in der Lage, gasförmiges CO_2 oder CO als Kohlenstoffquelle zu nutzen. Der technische Einsatz derartiger Mikroorganismen für die Produktion von Biomasse oder Stoffwechselprodukten wird als Gasfermentation bezeichnet.

Grundsätzlich ist zwischen anaerober und aerober Gasfermentation zu unterscheiden. Umfassend erforscht ist die anaerobe Gasfermentation durch Acetogene: Diese können über den Wood-Ljungdahl-Stoffwechselweg atmosphärisches CO_2 fixieren und daraus Essigsäure (Acetat), also eine Verbindung mit zwei Kohlenstoffatomen, aufbauen (Gonzales et al. 2019; Dürre 2017; Bengelsdorf und Dürre 2017). Als Energiequelle und Reduktionsäquivalent nutzen sie entweder CO oder molekularen Wasserstoff (H_2). Einige Acetogene sind auch in der Lage, Alkohole wie Ethanol und Butanol zu bilden. Die Gasfermentation mit Acetogenen wird bereits in industriellen Anwendungen genutzt: Abgase aus Stahlwerken, die einen hohen Anteil an CO_2, CO und H_2 enthalten, dienen als Substrat für die Herstellung von Ethanol und anderen höherwertigen Alkoholen mit Hilfe der anaeroben Gasfermentation.

Daneben besteht auch die Möglichkeit, unter aeroben Bedingungen, also unter Anwesenheit von Sauerstoff, Gasfermentation zu betreiben (Brigham 2019; Reed et al. 2017). In diesem Fall nutzen Mikroorganismen, so genannte Knallgasbakterien, Wasserstoff als Energiequelle für die Fixierung von CO_2 über den Calvin-Benson-Zyklus, während Sauerstoff zu Wasser reduziert wird. Der Vorteil gegenüber anaeroben Verfahren ist darin zu sehen, dass deutlich mehr Energie für Stoffwechselprozesse zur Verfügung steht. Bislang ist die aerobe Gasfermentation jedoch vor allem Gegenstand der akademischen Forschung. Grundsätzlich besteht bei allen Gasfermentationsverfahren die Herausforderung, dass Wasserstoff als Energieträger und Reduktionsäquivalent zugeführt werden muss.

Auf die Verfahren der Gasfermentation wird vertiefend in Kapitel 7 eingegangen.

5.2.3 CO_2-Nutzung durch das Design nicht-natürlicher Stoffwechselwege

Anspruchsvolle und wissenschaftlich attraktive Ansätze haben zum Ziel, die Photosyntheseeffizienz durch das Design neuer, in der Natur nicht vorkommender Stoffwechselwege zu steigern. Die konzeptionellen Grundlagen hierfür wurden von Bar-Even et al. (2010) gelegt: Ausgehend von etwa 5000 bekannten, in der Natur vorkommenden Enzymen wurden am Computer alternative CO_2-Fixierungsstoffwechselwege ausgearbeitet, indem Stoffwechsel-

„Bausteine“ aus verschiedenen Organismen kombiniert wurden. Diese Stoffwechselwege wurden anhand der Kinetik, Energetik und Lokalisation mit natürlichen Stoffwechselwegen verglichen. Auf diese Weise wurden einige neue Stoffwechselwege identifiziert, die den natürlich vorkommenden Wegen beispielsweise in Bezug auf die Umsetzungsgeschwindigkeit überlegen sein könnten. Die erstmalige experimentelle Umsetzung und damit der Nachweis der grundsätzlichen Machbarkeit erfolgte durch Schwander et al. (2016), die die sechs bekannten natürlich vorkommenden CO_2-Fixierungswege mit einem siebten synthetischen ergänzten: Der Crotonyl-CoA/Ethylmalonyl-CoA/Hydroxybutyryl-CoA-Zyklus (CETCH-Zyklus) besteht aus 17 Enzymen aus neun verschiedenen Organismen, die durch mehrfache Optimierungsrunden *in vitro* zu einem aufeinander abgestimmten Reaktionszyklus zusammengefügt wurden. Dieser künstliche Stoffwechselweg kann CO_2 in organische Moleküle umsetzen. Mit ähnlichen Ansätzen wurde auch ein neuer Stoffwechselweg designt, der den Kohlenstoffverlust über den Prozess der Photorespiration während der Photosynthese verringert (Trudeau et al. 2018), und ein Stoffwechselweg für die effiziente Assimilation anderer C_1-Moleküle als CO_2 identifiziert und *in vitro* verifiziert (Yang et al. 2019). Da diese Ansätze der Grundlagenforschung zuzurechnen sind und die funktionelle Expression dieser neu designten Stoffwechselwege *in vivo* noch aussteht, werden diese Ansätze in dieser Studie nicht weiter vertieft.

5.2.4 Carboanhydrase-katalysierte Konversion von CO_2 zu HCO_3^-

Das Enzym Carboanhydrase (CA) katalysiert die reversible Umwandlung von CO_2 zu Hydrogencarbonat (Bicarbonat):

$$CO_2 + H_2O \rightarrow HCO_3^- + H^+$$

Carboanhydrase ist ein ubiquitäres Enzym, das in allen Organismengruppen vorkommt. Für industrielle Anwendungen werden geeignete, natürlicherweise vorkommende CA in der Regel durch übliche Methoden des Proteinengineerings im Hinblick auf katalytische Aktivität, Thermostabilität, Toleranz gegenüber Katalysatorgiften in Industrieabgasen sowie Robustheit unter Prozess- und Lagerungsbedingungen optimiert und durch heterologe Überexpression in Produktionsorganismen hergestellt (Bhagat et al. 2018; Bose und Satyanarayana 2017; Sharma et al. 2020). Mögliche industrielle Anwendungen liegen in der Abtrennung von CO_2 aus Gasgemischen mit Hilfe von Membranen, in der CO_2-Absorption mit Lösungsmitteln sowie in der Mineralisierung von CO_2 mit dem Ziel der langfristigen Lagerung (Long et al. 2017):

- Trennung von Gasgemischen. Um CO_2 in niedrigen Konzentrationen aus Gasgemischen selektiv abzutrennen, können Membranen eingesetzt werden. Wird Carboanhydrase auf diesen Membranen immobilisiert, können Effizienz, Geschwindigkeit und Spezifität der Abtrennung von CO_2 im Temperaturbereich von 40-85 °C erhöht werden. Eine breitere industrielle Anwendung steht noch aus, da zuvor Lösungen für die noch zu kurzen Betriebszeiten, das Membranfouling sowie die Ablösung des Enzyms von der Membranfläche gefunden werden müssen.
- Mineralisierung von CO_2. Als Alternative zur unterirdischen Langfristlagerung von CO_2 in geologischen Formationen (Carbon Capture and Storage, CCS) wird auch die Abscheidung

als schwer lösliche Carbonate untersucht. Dieser Prozess findet beispielsweise in großem Umfang bei der Bildung von Kalkschalen ($CaCO_3$) durch Muscheln und Schnecken statt. Da bei der Fällung von CO_2 beispielsweise als $CaCO_3$ die Bildung von HCO_3^- der geschwindigkeitslimitierende Schritt ist, kann die Mineralisierung durch die Zugabe von Carboanhydrase beschleunigt werden. Neben der Identifizierung geeigneter Immobilisierungsmethoden und -materialien für die CA, um die Standzeit zu erhöhen und die Wiederverwendung des Enzyms zu ermöglichen, muss der Massentransfer für eine großtechnische Anwendung der CO_2-Sequestrierung noch erhöht werden.

- CO_2-Absorption mit Lösungsmitteln. Für die CO_2-Abtrennung mit Lösungsmitteln wird häufig eine Aminwäsche durchgeführt (Kap. 5.3.3), bei der jedoch die Regeneration des Lösungsmittels sehr energieaufwändig ist. Die CO_2-Absorptionskinetik kann durch den Einsatz von CA verbessert und der Energieaufwand deutlich verringert werden. Das kanadische Unternehmen CO2Solutions[5] hat seinen entsprechenden, „industrielle Lunge“ genannten Prozess in einer Pilotanlage im National Carbon Capture Center, Wilsonville, Alabama (USA) und 2015 in einer Demonstrationsanlage in Salaberry-de-Valleyfield, Kanada validiert (Fradette et al. 2017). Das Unternehmen verfügt unter anderem über ein Patent, wonach das mittels CA-Katalyse absorbierte CO_2 aus Zementwerksabgasen nachfolgend für die Produktion von $CaCO_3$ eingesetzt wird, um daraus Portlandzement herzustellen. CO2Solutions setzt derzeit jedoch auf die direkte Nutzung des gewonnenen CO_2 ohne weitere chemische Konversion. Die lösungsmittelbasierte Aufkonzentrierung von CO_2 aus Zementwerksabgasen mit einer ultrastabilen CA für die nachfolgende biotechnische Umsetzung des CO_2 zu höherwertigen Chemikalien wird auch im EU-geförderten H2020-Projekt „Biological routes for CO_2 conversion into chemical building blocks“ (Bio-RECO2VER)“[6] untersucht.

Sofern für eine effiziente (bio)technische Umwandlung des CO_2 dessen Aufkonzentrierung erforderlich ist, stellt die CA-katalysierte Absorption in Lösungsmitteln ein vielversprechendes und industriell relevantes Prozessmodul dar, das sowohl mit biotechnischen, hybriden als auch rein technischen Ansätzen zur CO_2-Nutzung kombiniert werden kann und beispielsweise im Rahmen des in Baden-Württemberg geplanten anwendungsorientierten Entwicklungsschwerpunkts (Kap. 11.3) weiterverfolgt werden könnte. In dieser Studie wird dieser Ansatz jedoch nicht weiter vertieft, da keine Sonnenlichtnutzung und auch keine Umwandlung des CO_2 in reduzierte organische Verbindungen stattfindet.

5.2.5 Mikrobiell induzierte Calciumcarbonatfällung

Als Alternative zur unterirdischen Langfristlagerung von CO_2 in geologischen Formationen (Carbon Capture and Storage, CCS) wird auch der Prozess der Biomineralisation untersucht, die so genannte mikrobiell induzierte Abscheidung von CO_2 als schwer lösliches Carbonat (*microbially induced calcium carbonate precipitation*, MICP). Dabei verändern die Mikroorganismen durch ihre Stoffwechselaktivität den pH-Wert ihrer unmittelbaren Umgebung ins

5 https://co2solutions.com

6 http://bioreco2ver.eu/; Tabelle 15.

Alkalische, so dass das Ausfallen des Minerals begünstigt wird. Häufig fungieren zudem Oberflächenstrukturen der Mikroorganismen als Kristallisationskeime.

Es wurden verschiedene Mechanismen vorgeschlagen, durch die die mikrobielle Biomineralisation zu Calciumcarbonat erfolgen kann, darunter

- Hydrolyse von Harnstoff durch das harnstoffspaltende Enzym Urease. Bakterien können Harnstoff als Stickstoffquelle mit Hilfe des Enzyms Urease nutzen. Dabei werden Carbonat-Ionen freigesetzt, die in Anwesenheit von Calciumionen als Calciumcarbonat ausfallen können. Allerdings entstammt der Kohlenstoff der Carbonationen dem Harnstoff und nicht CO_2 aus der Atmosphäre bzw. aus Emissionen. CO_2-Emissionen können höchstens indirekt vermieden werden, da das mikrobiell induzierte $CaCO_3$ in bestimmten Anwendungen (z. B. Verdichtung oder Versiegelung von Böden) teilweise Zement bzw. Beton ersetzen kann (Krajewska 2018). Eine entsprechende Herstellung von „umweltfreundlichem Zement“ wurde beispielsweise im Projekt ECO-CEMENT untersucht, das von 2012-2015 im 7. Rahmenprogramm der EU gefördert wurde[7].
- Mikrobielle Verstoffwechselung von Calciumsalzen organischer Säuren. Das Ausfallen von Calciumcarbonat bei Verstoffwechslung von beispielsweise Calciumlactat durch alkaliphile Mikroorganismen wurde genutzt, um „selbstheilenden“ Beton zu entwickeln (Alshalif et al. 2020; Jonkers und Schlangen 2009). Diese Entwicklung ist beispielsweise durch das niederländische Unternehmen Basilisk BV[8] kommerzialisiert.

Eine Bindung von atmosphärischem CO_2 in Zement bzw. Beton erfolgt, indem darin enthaltenes $Ca(OH)_2$ mit CO_2 zu Calciumcarbonat reagiert. Es wird untersucht, inwieweit dieser Prozess durch mikrobielle Aktivität gefördert und beschleunigt werden kann (Alshalif et al. 2020). Die Zementindustrie erforscht bereits die Bindung von CO_2 durch $Ca(OH)_2$ im Zement bzw. Beton. Dieser Ansatz kann daher potenziell für die Zementindustrie von Interesse sein. Er wird in dieser Studie nicht weiter vertieft, da der Prozess keine organischen Verbindungen für eine stoffliche Nutzung im Rahmen der Bioökonomie bereitstellt.

5.2.6 Biophotovoltaik

Biophotovoltaiksysteme (BVPs) sind Systeme, in denen oxygene photosynthetische Mikroorganismen Sonnenlicht in elektrischen Strom umwandeln (Kornienko et al. 2018). Sie gehören zu den semiartifiziellen photosynthetischen Systemen und werden auch als mikrobielle Solarzellen oder photomikrobielle Brennstoffzellen bezeichnet. Von mikrobiellen Brennstoffzellen unterscheiden sie sich jedoch dadurch, dass bei den BVPs Sonnenlicht als Energiequelle genutzt wird, jedoch keine organischen Kohlenstoffverbindungen. Biophotovoltaiksysteme liefern nur Strom, keine chemischen Verbindungen als Produkt und könnten daher in biohybriden Systemen anstelle von Solarzellen eingesetzt werden.

---

7 *New microbial carbonate precipitation technology for the production of high strength, economical and ecological cement*; https://cordis.europa.eu/project/id/282922

8 https://www.basiliskconcrete.com/en/

Als biologische Komponente werden meist Modellorganismen eingesetzt, und zwar das Cyanobakterium *Synechocystis sp*. PCC6803 bzw. verschiedene einzellige Grünalgen (z. B. *Chlamydomonas*, *Chlorella* oder *Dunaliella*); für die Untersuchung grundlegender Forschungsfragen können auch Chloroplasten oder isolierte Photosysteme verwendet werden (Kornienko et al. 2018). Einfache Zwei-Elektrodensysteme haben folgendes Funktionsprinzip (Tschörtner et al. 2019): Bei Belichtung werden Elektronen aus der Wasserspaltung über den Prozess der so genannten Exoelektrogenese von den Elektronentransportketten der Photosysteme aus der Zelle herausgeleitet und auf eine Anode übertragen. Über einen Stromkreis fließen sie zur Kathode, wo sie Sauerstoff und Protonen zu Wasser reduzieren. Dieser Vorgang wird von der Potenzialdifferenz zwischen den anodischen und kathodischen Redoxreaktionen getrieben.

Neben den 2-Elektroden-Systemen, die vor allem für anwendungsorientierte FuE und für Charakterisierungen des Gesamtsystems verwendet werden, gibt es auch 3-Elektroden-Systeme, die für Fragestellungen der Kinetik und der Thermodynamik besser geeignet sind.

Biophotovoltaiksysteme werden bislang nur im Labormaßstab betrieben. Die bisher höchsten erzielten Werte waren 100 nW/m^2 in 2-Elektroden-Systemen; 120 mA/m^2 in 3-Elektroden-Systemen und bis zu 530 mW/m^2 in mikrofluidischen Apparaturen. Berechnungen zufolge müssten 0,7-7,7 W/m^2 bzw. Stromdichten von 0,34-2,46 mA/cm^2 erreichbar sein (Wey et al. 2019). Es liegen nur wenige systematische Studien zum Langzeitbetrieb von Biophotovoltaiksystemen vor: es werden Experimente von bis zu 35 Tagen Dauer berichtet, in denen die Zellen aktiv blieben (Wey et al. 2019). Insgesamt liegen diese Leistungsparameter bzw. Stromdichten sowie die Betriebsdauer um Größenordnungen niedriger, als mit mikrobiellen Brennstoffzellen oder Solarzellen erreicht werden (Tschörtner et al. 2019).

Zwar wurden seit der ersten Beschreibung biophotovoltaischer Zellen vor ca. 40 Jahren erhebliche Fortschritte erzielt, doch sind wesentliche FuE-Anstrengungen erforderlich, um anwendungsrelevante Leistungsparameter zu erreichen. Folgende Ansätze bieten Potenziale (Tschörtner et al. 2019; Wey et al. 2019):

- Optimierung der mikrobiellen photosynthetisch aktiven Organismen. Entsprechende Ansätze unter Einsatz gentechnischer Methoden, des *metabolic engineering* sowie der synthetischen Biologie werden ausführlich in Kapitel 6 beschrieben. Ansatzpunkte sollten sich aus einem besseren Verständnis der exoelektrogenen Aktivität ergeben. Der Einsatz von mikrobiellen Konsortien, d. h. Kombinationen verschiedener Stämme, die Redoxmediatoren ausscheiden mit solchen, deren exoelektrogene Aktivität sehr hoch ist, wird diskutiert, ist bislang aber kaum untersucht. Mittel- bis langfristig wird der Ersatz von Modellorganismen durch Stämme, die an die Anwendungsbedingungen adaptiert sind, erforderlich sein.
- Optimierung der Anode. Anoden sollten eine hohe elektrische Leitfähigkeit und elektrochemische Stabilität aufweisen, biokompatibel und lichtdurchlässig sein. Für ein anwendungsrelevantes Scale-up sind kostengünstige, nachhaltig gewinnbare Materialien und ent-

sprechende Herstellverfahren wichtig. Die zurzeit besten Anoden sind hierarchisch strukturierte Elektroden mit Indium-Zinkoxid-Nanopartikeln. Wünschenswert wären jedoch ähnlich leistungsfähige Elektroden ohne das Seltene-Erden-Element Indium. Darüber hinaus ist eine Nanostrukturierung der Elektrodenoberfläche mit Poren und verbindenden Kanälen erforderlich, die an Form und Größe der verwendeten Mikroorganismen angepasst sein müssen. Generell sollten sich Synergien zur Elektrodenoptimierung im Rahmen der Bioelektrochemieforschung, der Brennstoffzellenforschung und der Immobilisierung von Photosystemen ergeben.

- Optimierung der Kathode. Im Fokus ist die Suche nach nachhaltigen, kostengünstigen Kathodenmaterialien mit hoher katalytischer Aktivität, die kein Platin benötigen.
- „Verkabelung“ (engl. *wiring*). *Wiring* bezeichnet die elektrische Verbindung zwischen den photosynthetischen Mikroorganismen und der Anode. Unterschieden wird der indirekte extrazelluläre Elektronentransfer, bei dem ein diffundierender Mediator Elektronen von der Zelle zur Elektrode transferiert, vom direkten extrazellulären Elektronentransfer, bei dem der Elektronentransfer über ein membrangebundenes Cytochrom, einen Pilus o. Ä. erfolgt.
- Maßstabsvergrößerung. Für praxisrelevante Arbeiten ist eine Maßstabsvergrößerung (*upscaling*) aus dem Labormaßstab heraus erforderlich.
- Standardisierung und Vergleichbarkeit. Ein wesentliches Hemmnis besteht darin, dass Ergebnisse verschiedener Studien sehr schwierig zu vergleichen sind: Teilweise fehlen essenzielle Informationen, teilweise werden keine IUPAC-Einheiten verwendet, teilweise fehlt ein guter Indikator für die Menge des eingesetzten biologischen Materials. Daher besteht dringender Bedarf nach einer Standardisierung, um eine vergleichende Charakterisierung unterschiedlicher Ansätze zu ermöglichen.

Da der Ansatz der Biophotovoltaik keine direkte CO_2-Nutzung beinhaltet und viele FuE-Fragestellungen ähnlich wie in der Elektrobiosynthese (Kap. 5.2.8, Kap. 8) sind, wird dieser Ansatz in dieser Studie nicht weiter vertieft.

5.2.7 Biologische Wasserstoffgewinnung

Biologische Wasserstoffgewinnung nutzt die Fähigkeit verschiedener Mikroorganismengruppen, molekularen Wasserstoff (H_2) freizusetzen. Je nach verwendeter Organismengruppe und Stoffwechselweg lassen sich drei grundlegende Prozesse der biologischen Wasserstoffproduktion unterscheiden, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile aufweisen (Tabelle 4). Die biologische Wasserstoffgewinnung birgt prinzipiell das Potenzial, in biohybriden Verfahren die Bereitstellung von Wasserstoff durch Wasserelektrolyse für die CO_2-Reduktion zu ersetzen. Allerdings ist nur der Stoffwechselprozess der Biophotolyse unabhängig von der Zufuhr organischer Kohlenstoff- und Energiequellen. Daher wird im Folgenden nur die Biophotolyse beschrieben.

Bei der direkten Biophotolyse, zu der Grünalgen und Cyanobakterien befähigt sind, wird H_2 aus Elektronen und Protonen synthetisiert, die aus der Wasserspaltung durch Photosystem II stammen. Bei der indirekten Biophotolyse entstammen Elektronen und Protonen hingegen der Verstoffwechselung von endogenen Kohlenstoffverbindungen, die zuvor durch Photosynthese

aufgebaut worden sind. Die Reduktion von Protonen zu H_2 erfolgt sowohl in Grünalgen als auch in Cyanobakterien durch wasserstoff-bildende Enzyme, die Hydrogenasen; bei einigen Cyanobakterien können zusätzlich Stickstoff-reduzierende Enzyme, Nitrogenasen, unter anaeroben, stickstofflimitierten Bedingungen zur H_2-Bildung beitragen.

Natürlicherweise ist die biophotolytische Wasserstoffproduktion ein stark regulierter Stoffwechselprozess, der nur unter ganz bestimmten Wachstumsbedingungen meist nur kurzzeitig angeschaltet wird. Forschungsanstrengungen richten sich daher darauf, eine kontinuierliche, effiziente Wasserstoffproduktion mit hoher Ausbeute über längere Zeiträume zu erzielen. Ansätze der Systembiologie, des *metabolic engineering* und der synthetischen Biologie umfassen Inaktivierung der *uptake*-Hydrogenase, Eliminierung von Stoffwechselwegen, die mit der Wasserstoffbildung um Elektronen konkurrieren, sowie die Verringerung der Sauerstoffempfindlichkeit der Hydrogenasen. Verfahrenstechnische Ansätze richten sich auf die Optimierung der Photobioreaktoren und der Prozessführung (Khetkorn et al. 2017; Tóth und Yacoby 2019 ; Khosravitabar 2020).

Die H_2-Produktion durch Biophotolyse liegt in der Größenordnung von einigen 100 Mikrolitern H_2/ml über mehrere Tage (Tóth und Yacoby 2019) und damit deutlich unter H_2-Produktionsmengen durch Wasserelektrolyse. Wegen des langfristigen, grundlagenorientierten Forschungsbedarfs zur Weiterentwicklung der biophotolytischen Wasserstoffproduktion in anwendungsrelevante Maßstäbe wird diese Option für biohybride Verfahren in dieser Studie nicht weiter betrachtet.

Tabelle 4: Übersicht über Prozesse der biologischen Wasserstoffproduktion

H_2 Produktionsprozess	Mikroorganismengruppe	Vorteile	Nachteile
Direkte Biophotolyse Photo-Fermentation	Grünalgen (z. B. *Scenedesmus obliquus*, *Chlamydomonas reinhardii*)	• H_2-Produktion aus Wasser und Sonnenlicht • 10-fach höherer Wirkungsgrad der Solarenergiekonversion im Vergleich zu höheren Pflanzen • Nutzung von atmosphärischem CO_2	• Hemmung der H_2-Produktion durch Sauerstoff
Direkte Biophotolyse Indirekte Biophotolyse	Cyanobakterien (z. B. *Synechocystis* PCC 6803, *Anabaena sp.*)	• H_2-Produktion aus Wasser und Sonnenlicht • Nutzung von atmosphärischem CO_2 • H_2-Produktion erfolgt getrennt von O_2-Produktion	• Hemmung der H_2-Produktion durch Sauerstoff • Verringerte H_2-Ausbeute durch Uptake-Hydrogenase
Photo-Fermentation	Photosynthetische Bakterien (z. B. *Rhodobacter sphaeroides*, *R. capsulatus*)	• Verschiedene Reststoffe als Substrat nutzbar • Breites Lichtspektrum nutzbar	• H_2-Produktion ist lichtabhängig • Fermentationsbrühe kann Abwasser belasten
Fermentation	Fermentative Bakterien (z. B. *Enterobacter aerogenes*, *Clostridium butyricum*)	• Verschiedene organische Substrate nutzbar • H_2-Produktion lichtunabhängig • H_2-Produktion gekoppelt mit Produktion von organischen Säuren (z. B. Buttersäure, Milchsäure)	• Gabe von C- und N-Quellen erforderlich • Fermentationsbrühe kann Abwasser belasten • H_2-Gas enthält CO_2

Quelle: eigene Übersetzung von Khetkorn et al. 2017

5.2.8 Elektrobiosynthese

Die Elektrobiosynthese stellt einen noch relativ neuen Ansatz dar, dem seit einigen Jahren erhöhte Aufmerksamkeit zukommt. Sie beruht darauf, dass durch die Zuführung elektrischer Energie biologische Synthesen angetrieben werden können, insbesondere auch energetisch unvorteilhafte Biosynthesen wie die Reduktion von CO_2. Entsprechend wird die Elektrobiosynthese als eine vielversprechende Technologie für die Nutzung von CO_2 angesehen.

Die Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass Elektroden direkt in den Bioreaktor integriert werden. Verschiedene Mikroorganismen sind in der Lage, als Biofilme diese Elektroden zu besiedeln und Elektronen mit den Elektroden auszutauschen. Allerdings sind die Mechanismen dieses Elektronentransfers noch nicht im Detail bekannt. Für einige Organismen konnte gezeigt werden, dass ein direkter Elektronenübergang von der Elektrode auf die Mikroorganismen möglich ist (Cheng und Logan 2007; Cheng et al. 2009), in den meisten Fällen dürfte jedoch zunächst eine abiotische Reduktion von CO_2 und eine anschließende Verstoffwechselung der Reduktionsprodukte (z. B. H_2, CO oder Formiat) durch die Mikroorganismen stattfinden (Gimkiewicz et al. 2017; Li et al. 2012; Gonzales et al. 2019). Aufgrund der direkten Interaktion der Bakterien mit der Elektrode können unter Laborbedingungen sehr hohe Wirkungsgrade erreicht werden (Cheng et al. 2009). Allerdings stellt die begrenzte Elektrodenfläche, die von den Mikroorganismen besiedelt wird, eine wesentliche Limitierung für eine Skalierung der Prozesse auf industrielle Maßstäbe dar (Claassens et al. 2019a).

Im Labormaßstab wurde ein breites Spektrum an Produkten nachgewiesen, die mithilfe der Elektrobiosynthese hergestellt werden können, darunter sowohl Bulkprodukte wie Methan, Methanol oder Ethanol, aber auch höherwertige Produkte wie längerkettige Alkohole (Isopropanol, Hexanol, Butanol), Terpene (Krieg et al. 2018) oder Bioplastik (PLA/PBA) (Jiang et al. 2019). Claassens et al. (2019a) nehmen eine Bewertung der verschiedenen Ansätze auf der Basis theoretischer quantitativer Daten vor. Insgesamt befindet sich die Elektrobiosynthese noch in der Phase der akademischen Forschung und Entwicklung und wurde bislang nur im Labormaßstab umgesetzt. Forschungsbedarf besteht im einerseits im Hinblick auf die Aufklärung der grundlegenden biochemischen Prozesse, der Entwicklung von neuen Bioreaktorkonzepten und der Prozessführung sowie der Skalierung und Entwicklung von Produktionsprozessen, die industriellen Anforderungen entsprechend. Hierauf wird vertiefend in Kapitel 8 eingegangen.

5.2.9 C_1-Fermentationen

Power-to-X-Verfahren (Kap. 5.3.2) sowie die elektrochemische Reduktion von CO_2 (Kap. 5.3.2.2) können ausgehend von CO_2 C_1-Moleküle wie Methan, Methanol und Formiat liefern, die als Kohlenstoff- und Energiequelle von verschiedenen Mikroorganismen genutzt werden können, um daraus längerkettige, funktionalisierte Kohlenstoffverbindungen zu synthetisieren (Yishai et al. 2016). Das ursprüngliche Interesse an dem Forschungsgebiet der C_1-

Fermentation lag in der Nutzung von Erdgas als Fermentationssubstrat. Nunmehr könnten Power-to-X-Verfahren diese C_1-Fermentationssubstrate ausgehend von CO_2 bereitstellen, die dann fermentativ zu höherwertigen Zielprodukten umgewandelt werden.

Bei der aeroben Nutzung von Methan als alleinige Kohlenstoff- und Energiequelle erfolgt zunächst eine Oxidation zu Methanol, gefolgt von der Oxidation zu Formaldehyd, das anschließend entweder über den Ribulose-Monophosphatweg oder über den Serin-Zyklus von den Mikroorganismen verstoffwechselt wird. Als Produkte wurden Methanol, Polyhydroxyalkanoate, Carotinoide, organische Säuren und Alkohole untersucht, jedoch konnten nur niedrige Ausbeuten im Labormaßstab erreicht werden (Bennett et al. 2018).

Die Mikroorganismen, die natürlicherweise zur so genannten Methylotrophie befähigt sind, sind biotechnologisch schwierig zu nutzen: Herausforderungen bestehen in niedrigen Wachstums- und Produktionsraten, geringen Produkttitern, einem engen Produktspektrum, Wissenslücken in Bezug auf Zellphysiologie und -stoffwechsel sowie kaum verfügbaren Methoden für die gentechnische Veränderung.

Daher werden vorrangig Ansätze verfolgt, etablierte, industriell eingesetzte Mikroorganismen wie z. B. *Escherichia coli* und *Corynebacterium glutamicum* so zu modifizieren, dass sie die oben genannten C_1-Substrate, insbesondere Methanol und Formiat, zur Synthese höherwertiger Verbindungen nutzen können (Yu und Liao 2018 ; Antoniewicz 2019; Claassens et al. 2019b; Yishai et al. 2017). Dabei müssen zunächst zwei Limitierungen überwunden werden: die ungünstigen kinetischen Eigenschaften des Enzyms Methanoldehydrogenase, das die Methanoloxidation katalysiert, sowie die ineffiziente Regeneration von Ribulose-5-Phosphat, einem Schlüsselmetabolit in dem Stoffwechselweg, über den das zellgiftige Formaldehyd verstoffwechselt wird, das als Produkt der Methanol-Oxidation anfällt (Bennett et al. 2018).

Zwar bergen C_1-Fermentationen grundsätzlich das Potenzial, das Produktspektrum von Power-to-X-Ansätzen durch biotechnische Valorisierung von C_1-Verbindungen zu funktionalisierten, längerkettigen Kohlenstoffverbindungen zu erweitern. Da aber CO_2 nur indirekt, d. h. nach elektrochemischer oder katalytischer Umwandlung als Substrat in die biotechnische Umsetzung eingespeist wird und sich zudem teilweise Überschneidungen bzw. fließende Übergänge zur Gasfermentation (Kap. 5.2.2.2 und 7) bzw. zur Elektrobiosynthese (Kap. 8) ergeben, werden C_1-Fermentationen in dieser Studie nicht weiter vertieft.

5.2.10 Publikations- und patentstatistische Analyse des Technologiefeldes

Ziel der publikations- und patentstatistischen Analyse war es, die zeitliche Dynamik der Entwicklung des Technologiefeldes und die Position Deutschlands und Baden-Württembergs im internationalen Vergleich zu bestimmen, sowie Hinweise auf einschlägig tätige Akteure zu erlangen.

Die Ergebnisse der patentstatistischen Analysen sind in Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellt. Folgende Punkte sind festzuhalten:

- Die Teilbereiche zeichnen sich durch unterschiedliche Patentieraktivität aus: Diese ist am größten im Teilbereich „Biotechnische C_1-Nutzung“, gefolgt von „Photoautotrophen Mikroorganismen“, „hybriden Systemen mit Elektrolyse bzw. mit Bioelektrosynthese“ und „künstlicher Photosynthese“.
- In allen Teilbereichen mit Ausnahme der „hybriden Systemen mit Elektrolyse bzw. mit Bioelektrosynthese“ erfolgt ein stetiger Anstieg der Patentanmeldungen etwa bis zum Jahr 2009/2010, um dann zurückzugehen. Dieses Muster ist vermutlich auf die bis 2009/2010 hohen Rohölpreise bei gleichzeitigen hohen Photovoltaikpreisen zurückzuführen. Seitdem sind die Preise deutlich gesunken, was die Intensität der Suche nach Alternativen zu fossilen Rohstoffen bzw. Energieträgern negativ beeinflusst.
- „Hybride Systeme mit Elektrolyse bzw. mit Bioelektrosynthese“ sind demgegenüber ein Teilbereich, in dem die Patentanmeldungen von niedrigem Niveau aus ansteigen, was unter anderem auf sinkende Kosten bei regenerativem Strom zurückzuführen sein könnte. Zudem handelt es sich noch um ein recht neues Forschungsfeld, bei dem die industrielle Wertschöpfung bislang nur in geringem Maße erfolgt.
- Schlüsselt man die Patentieraktivitäten nach Ländern bzw. Regionen auf, so zeigt sich für alle Teilbereiche mit Ausnahme der Künstlichen Photosynthese dasselbe Muster: Jeweils die meisten Patentanmeldungen stammen aus den USA, gefolgt von EU28[9] und den asiatischen Ländern China, Japan und Korea. Innerhalb Europas kommt Deutschland eine führende Rolle vor Großbritannien und Frankreich zu.
- Der Teilbereich der künstlichen Photosynthese wird, gemessen an den Patentanmeldungen, dominiert von den asiatischen Ländern Japan, China und Korea, gefolgt von der EU28. Innerhalb Europas kommt Deutschland eine führende Rolle zu.

Für Baden-Württemberg können aufgrund der niedrigen Zahl der Patentanmeldungen in den jeweiligen Bereichen auf der Basis dieser Analyse keine belastbaren Aussagen zur Position im internationalen Wettbewerb getroffen werden.

Die Innovationsfelder umfassen jeweils eine Vielzahl an technischen Innovationen, die aber auch in anderen Anwendungen relevant sind. Eine Abbildung des gesamten Feldes über Patentaktivitäten ist deswegen kaum möglich, weil einerseits nur ein Teil der technischen Innovationen erfasst wird, andererseits keine trennscharfe Eingrenzung auf den Gegenstandsbereich dieser Studie möglich ist.

---

9 Die Analysen wurden vor dem Austritt Großbritanniens aus der EU durchgeführt.

Die Ergebnisse der publikationsstatistischen Analysen sind in Abbildung 3 und Abbildung 4 dargestellt. Folgende Punkte sind festzuhalten:

- Die Teilbereiche zeichnen sich durch unterschiedliche Publikationsaktivität aus: sie ist am größten im Teilbereich „künstliche Photosynthese“, gefolgt von „hybriden Systemen mit Elektrolyse bzw. mit Bioelektrosynthese“, „biotechnischer C_1-Nutzung“ und „Photoautotrophen Mikroorganismen“.
- In allen Teilbereichen erfolgt ein stetiger, linearer Anstieg der Publikationen etwa bis zum Jahr 2008, um ab dann dynamischer anzusteigen.
- Schlüsselt man die Publikationsaktivitäten nach Ländern bzw. Regionen auf, so führen die USA vor China und Deutschland in den Teilbereichen „biotechnische C_1-Nutzung“ sowie „photoautotrophe Mikroorganismen“. In den Teilbereichen „hybride Systeme mit Elektrolyse bzw. mit Bioelektrosynthese“ sowie „künstliche Photosynthese“ stammen hingegen die meisten Publikationen aus China, gefolgt von den USA.
- Unter den europäischen Ländern weist Deutschland in allen Teilbereichen die meisten Publikationen auf.

Für Baden-Württemberg können aufgrund der niedrigen Zahl der Publikationen in den jeweiligen Bereichen auf der Basis dieser Analyse keine belastbaren Aussagen zur Position im internationalen Wettbewerb getroffen werden.

Den patent- und publikationsstatistischen Analysen wurden Hinweise auf relevante Akteure entnommen, die in die weiteren Recherchen sowie die vertiefenden Analysen in den Kapiteln 6 bis 8 sowie in die Akteursübersicht in Baden-Württemberg (Kap. 10.6) eingeflossen sind.



Abbildung 1: Ergebnis der patentstatistischen Recherchen, zeitliche Dynamik der Entwicklung in Teilbereichen des Technologiefeldes 2000-2016

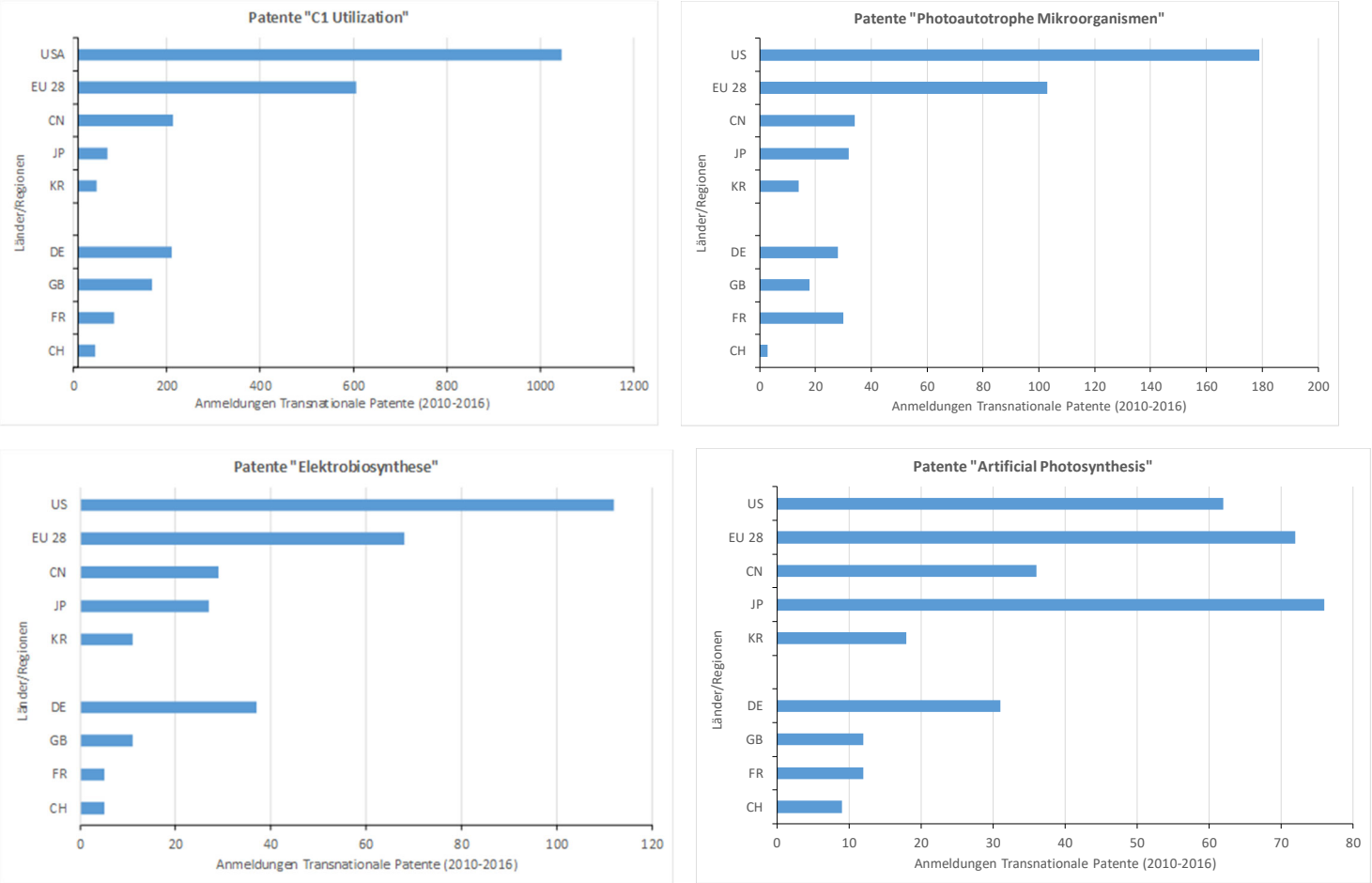


Abbildung 2: Ergebnis der patentstatistischen Recherchen, Aufschlüsselung der Patentanmeldungen in Teilbereichen des Technologiefeldes nach Ländern bzw. Regionen, 2010-2016

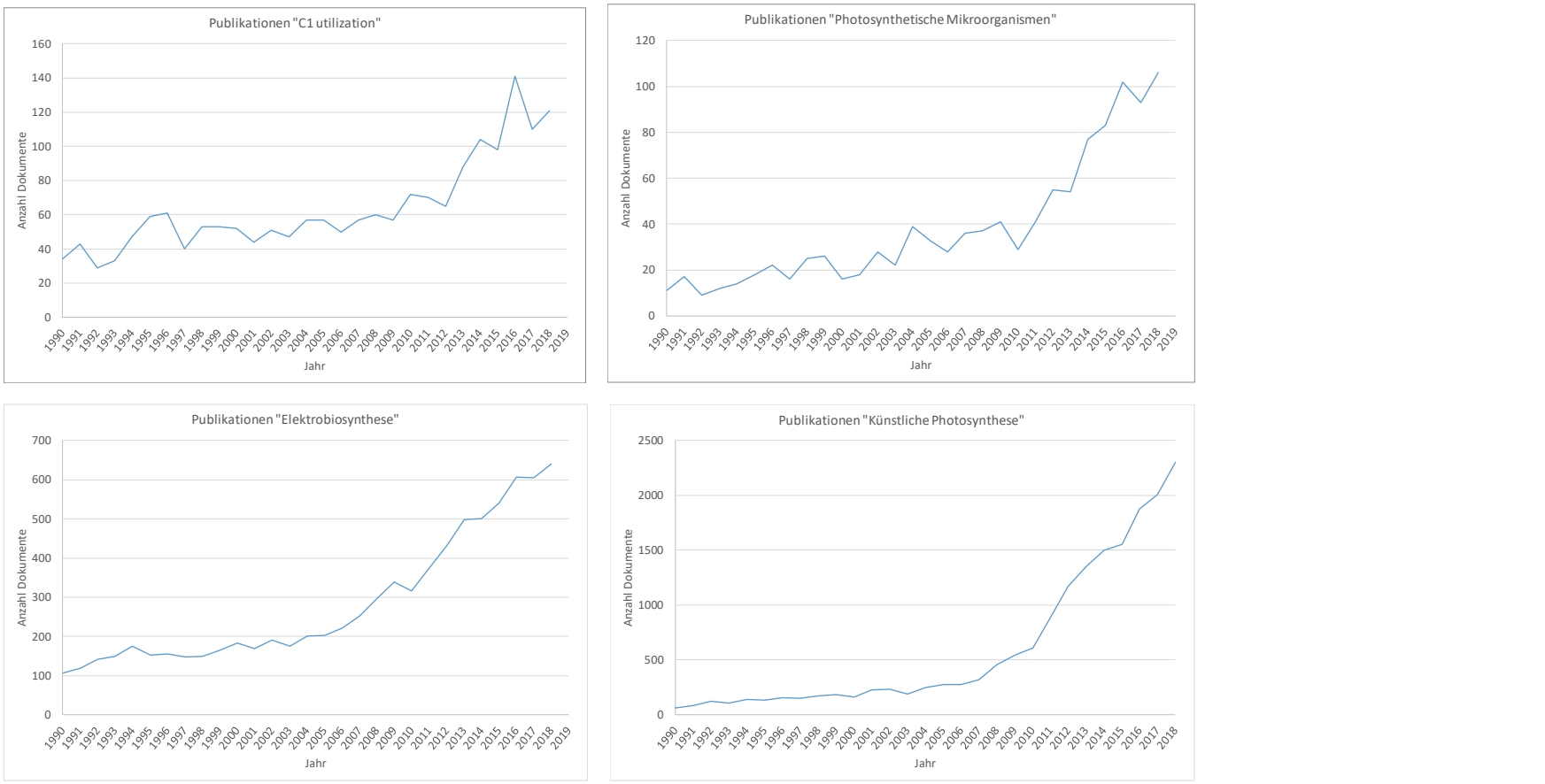


Abbildung 3: Ergebnis der publikationsstatistischen Recherchen, zeitliche Dynamik der Entwicklung in Teilbereichen des Technologiefeldes 1990-2018

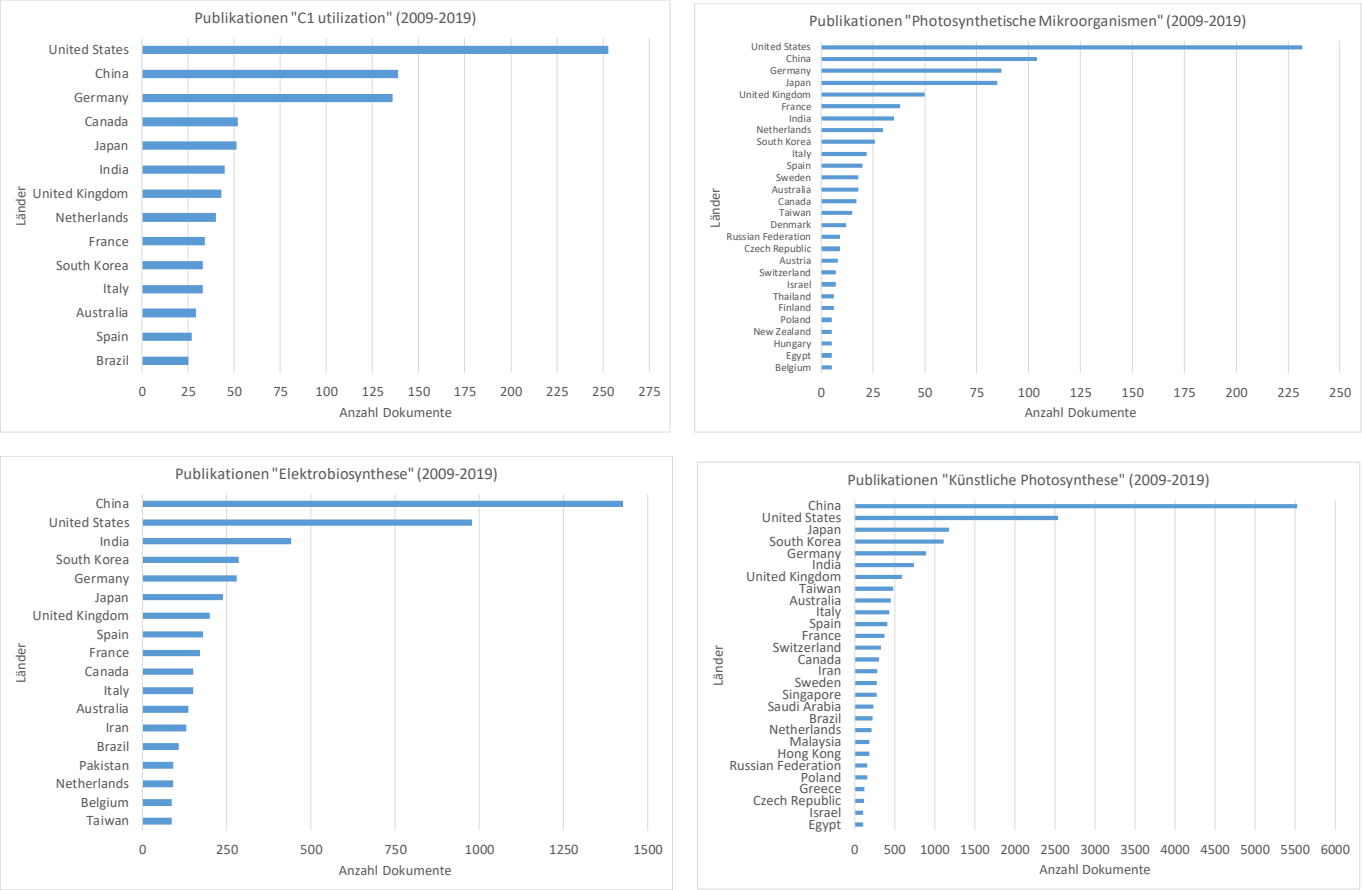


Abbildung 4: Ergebnis der publikationsstatistischen Recherchen, Aufschlüsselung der Patentanmeldungen in Teilbereichen des Technologiefeldes nach Ländern bzw. Regionen, 2009-2019

5.3 Übersicht über physikalisch-chemische Technologien

Die Informationen zu den physikalisch-chemischen Technologien wurden, soweit nicht anders angegeben, Viebahn et al. (2018) entnommen.

5.3.1 Photovoltaik

Die meisten Verfahren zur Nutzung von CO_2 benötigen elektrische Energie. Für das CO_2-Recycling kommt aus Klimaschutzgründen nur Strom aus regenerativen Quellen in Frage. Für diese Studie wird vereinfachend angenommen, dass dieser Strom Solarstrom ist, der durch photovoltaische Wandlung des Sonnenlichts in elektrische Energie erzeugt wird. Während die pflanzliche Photosynthese die Umwandlung von Lichtenergie in chemisch gebundene Energie katalysiert, ermöglichen Photovoltaik-Anlagen lediglich die Wandlung von Lichtenergie in elektrische Energie, die im Gegensatz zu chemischen Energieträgern nur in begrenztem Maße gespeichert werden kann.

Photovoltaik-Anlagen haben volle Marktreife erreicht: Die Stromerzeugung mittels Photovoltaik-Technologie ist kompetitiv im Vergleich zu anderen Formen der Stromerzeugung. Im Jahr 2019 stammten 9,1 Prozent (46,4 TWh) der Nettostromerzeugung aus Photovoltaik[10]. Somit stellt Photovoltaik nach Windkraft die zweitwichtigste erneuerbare Energiequelle für die Stromerzeugung in Deutschland dar. Es wird erwartet, dass die Produktionskapazitäten in den kommenden Jahren noch deutlich ansteigen werden und gleichzeitig die Produktionskosten auf 2,5 - 4,4 Cent/kWh fallen werden. Derzeitige Anlagen weisen Wirkungsgrade im Bereich 15 bis 22 Prozent auf, hier werden bis zum Jahr 2050 noch leichte Steigerungen auf bis zu 24 Prozent erwartet. Dem Betrieb von Photovoltaik-Anlagen in Deutschland sind allerdings aufgrund des Flächenbedarfs Grenzen gesetzt. Wie im Falle anderer erneuerbarer Energiequellen stellt sich die Frage nach Betriebsstandorten für Photovoltaik und der Stromabnehmer.

5.3.2 Power-to-X

Unter dem Begriff Power-to-X (PtX, P2X) werden verschiedene Ansätze zusammengefasst: Während Power-to-X generell die Umwandlung von Strom in eine andere Energieform beschreibt, werden die stofflichen Power-to-X-Technologien häufig in Bezug auf das Zielmolekül charakterisiert. Unter Power-to-Gas (PtG) versteht man die Herstellung eines gasförmigen Zielproduktes, wie Wasserstoff (H_2) oder Methan (CH_4), unter Power-to-Liquid (PtL) die Herstellung eines flüssigen Energieträgers (auch als E-Fuels bezeichnet), wie Otto- oder Dieselkraftstoff, Kerosin, etc. Power-to-Chemicals (PtC) bezeichnet die Herstellung von Chemikalien, wie Methanol (CH_3OH), Ammoniak (NH_3), etc. Letztere

10 https://www.energy-charts.de/energy_de.htm?source=all-sources&period=annual&year=2019

sind in der Regel ebenfalls flüssig oder gasförmig, sodass die Nomenklatur nicht immer eindeutig ist.

Für alle stofflichen Power-to-X-Technologien bildet die Umwandlung von Strom in stoffliche Energie den ersten Schritt der Prozesskette. Dabei spielt die Bereitstellung von nachhaltig erzeugtem Wasserstoff eine zentrale Rolle. Den Schwerpunkt bildet die Wasserelektrolyse, die Wasser unter Zuführung von elektrischem Strom in Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) spaltet (Kap. 5.3.2.1). Andere Verfahren zur Wasserstoffgewinnung sind die Co-Elektrolyse von Wasser und CO_2 (Kap. 5.3.2.2), oder die Pyrolyse von Methan (CH_4) in Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H_2). Synthesegas stellt ein wichtiges zentrales Zwischenprodukt für die anschließenden Synthesen dar. In der Diskussion sind außerdem Verfahren zur Gewinnung von Wasserstoff, bei denen eine Dampfreformierung von Erdgas mit CO_2-Abscheidung und -Lagerung gekoppelt wird. Dies wird jedoch kontrovers bewertet, unter anderem, weil in der Vorkette Treibhausgase entstehen. Dieser Ansatz wird hier nicht weiter betrachtet.

Auch wenn der Begriff Power-to-X an sich technologie-offen ist, werden darunter im Allgemeinen vor allem chemisch-katalytische Verfahren verstanden. Als wichtigste Verfahren sind der Sabatier-Prozess mit dem Produkt Methan, die Methanolsynthese und die Fischer-Tropsch-Synthese für Kohlenwasserstoffe unterschiedlicher Kettenlänge (Alkane, Alkene, Alkohole) zu nennen.

Allen Power-to-X-Ansätzen ist gemeinsam, dass sie einen hohen Energiebedarf haben, der aus Klimaschutzgründen aus erneuerbaren Quellen gespeist werden sollte. Insbesondere besteht die Erwartung, mit Power-to-X-Systemen flexibel auf die fluktuierende Verfügbarkeit von regenerativ erzeugtem Strom reagieren zu können. Weil die Volllaststundenzahl regenerativ erzeugter Energieträger aber oft beschränkt ist, gibt es hier einen Zielkonflikt, da die Anlagen aus Kosten- und Ressourcengründen zu möglichst hohen Anteilen unter Volllast gefahren werden sollten.

5.3.2.1 Wasserelektrolyse

In den meisten physikalisch-chemischen Ansätzen zur Reduktion von CO_2, aber auch in hybriden biotechnischen Verfahren, spielt Wasserstoff eine zentrale Rolle als Energielieferant und Reduktionsmittel. Mittels Wasserelektrolyse kann Wasser unter Nutzung elektrischer Energie in molekularen Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) gespalten werden:

$$2\ H_2O \xrightarrow{\text{(Elektrolyse)}} 2\ H_2 + O_2 \qquad \Delta\square_R = 571{,}7\ \text{kJ/mol}$$

Da es sich jedoch um eine stark endotherme Reaktion handelt, also ein große Menge Energie zugeführt werden muss, galt die Wasserelektrolyse lange als nicht als kostenwettbewerbsfähiges Verfahren im Vergleich zur Gewinnung von Wasserstoff aus fossilen Quellen. Unter dem Gesichtspunkt der Defossilisierung erfolgt jedoch eine Neubewertung der Wasserstofferzeugung ohne CO_2-Freisetzung über reine Kostenbetrachtungen hinaus. Damit kommt der Wasserelektrolyse eine wachsende Bedeutung zu.

Ein technisches System, in dem eine Elektrolyse stattfindet, wird als Elektrolyseur bezeichnet. Je nach Betriebsart wird zwischen unterschiedlichen Elektrolyseurtypen unterschieden, unter anderem alkalische Elektrolyseure, saure oder PEM-(„*proton exchange membrane*“)-Elektrolyseure sowie Hochtemperatur-Elektrolyseure. Dabei ist noch nicht endgültig absehbar, welche Technologie langfristig in Führung liegen wird.

Derzeitige Anlagen erreichen Energienutzungsgrade im Bereich von 51 bis 79 Prozent bezogen auf die aufgewendete elektrische Energie, d. h. in Kombination mit Photovoltaik kann bis zu 17 Prozent der Solarenergie in Form von Wasserstoff gespeichert werden[11].

Aufgrund umfassender Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Wissenschaft und Industrie zur Entwicklung von leistungsfähigen Elektrolyseuren wird Deutschland derzeit die weltweite Technologieführerschaft zugeschrieben. Es wird erwartet, dass die alkalische Elektrolyse bis zum Jahr 2030 einen Technologiereifegrad von 9 erreicht haben wird.

Wegen des massiv wachsenden Bedarfs an Wasserstoff im Kontext der Defossilisierung der Wirtschaft durch Power-to-X-Verfahren (Kap. 5.3.2) bedarf es noch eines starken Aufbaus von Elektrolyseur-Kapazitäten (Viebahn et al. 2018).

---

11 In der Energiewirtschaft werden erneuerbare Energien per Definition immer mit 100 Prozent Wirkungsgrad gerechnet.

Hemmnisse für den Einsatz von Elektrolyseuren sind in den hohen Investitionen und in der Unsicherheit zu sehen, inwieweit langfristig kostengünstiger Strom verfügbar sein wird.

5.3.2.2 Elektrochemische Reduktion von CO_2

Mittels Elektrolyse ist auch eine direkte Reduktion von CO_2 möglich: Die so genannte CO-Elektrolyse, die gemeinsame Reduktion von H_2O und CO_2 zu Synthesegas (H_2 und CO) ist Gegenstand intensiver Forschungsanstrengungen (Artz et al. 2018; Haas et al. 2018; Krause et al. 2020). Darüber hinaus kann CO_2 mittels Elektrolyse auch zu Formiat ($HCOO^-$) (Agarwal et al. 2011) oder Ethylen ($H_2C=CH_2$) reduziert werden (Reller et al. 2017). Derzeit stehen zwei technologische Ansätze für die elektrolytische Reduktion von CO_2 im Fokus: die Hochtemperatur (HT)-Co-Elektrolyse und die Niedertemperatur (NT)-Co-Elektrolyse. Bei der HT-Co-Elektrolyse erfolgt neben der CO_2-Reduktion die Produktion von Wasserstoff, sodass Synthesegas entsteht, während bei der NT-Elektrolyse vor allem CO produziert wird und H_2 für weitere Anwendungen in einem separaten Prozess bereitgestellt werden muss.

Diese Reduktionsprodukte sind potenziell hoch relevante Ausgangsstoffe für biotechnologische Synthesen (Kap. 5.2.2.2, Kap. 5.2.8 und Kap. 5.2.9). Entsprechend kommt der CO_2-Elektrolyse ein hohes Potenzial als *enabling technology* zur Bereitstellung von biotechnologisch nutzbaren Substraten zu (Haas et al. 2018; Yishai et al. 2016).

Die Verfahren zur elektrochemischen Reduktion von CO_2 sind Gegenstand von intensiven Forschungsbemühungen, unter anderem im Rahmen der Energieforschungsinitiative der Kopernikus-Projekte[12]. Unter anderem bedarf es noch einer deutlichen Skalenvergrößerung: Die aktiven Elektrodenflächen der bislang entwickelten Systeme rangieren aktuell noch im Bereich von 10^1-10^2 cm^2, für einen industriellen Einsatz wären jedoch Elektrodenflächen im Quadratmeter-Bereich (d. h. 10^6 cm^2) erforderlich (Krause et al. 2020).

Erste Unternehmen bieten kommerzielle Systeme an. Im Rahmen des BMBF-Kopernikus-Projektes Power-to-X wurde 2019 am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) eine HT-Co-Elektrolyse-Anlage durch die Firma Sunfire in Betrieb genommen. An der Skalierung auf industrielle Maßstäbe wird derzeit gearbeitet (sunfire GmbH 15.01.2019). Die Firma Siemens forscht an der Entwicklung von NT-Co-Elektrolyseuren und entwickelt derzeit mit der Firma Evonik einen Prozess, in dem das elektrolytisch erzeugtes CO in fermentativen Verfahren genutzt werden soll (Haas et al. 2018; Kap. 7.1.2.2).

---

12 https://www.kopernikus-projekte.de/

5.3.3 Direct Air Capture

Die Umgebungsluft weist eine geringe CO_2-Konzentration von lediglich ca. 0,04 Volumen-Prozent (400 ppm) auf, wohingegen die meisten technischen Verfahren zur Nutzung von CO_2 höher konzentriertes oder sogar reines CO_2 benötigen. Als CO_2-Quellen kommen daher ausgewählte Punktquellen in Frage, die hohe CO_2-Konzentrationen im Abgasstrom aufweisen (Ausfelder und Dura 2018). Alternativ dazu besteht auch die Möglichkeit der Abtrennung und Aufkonzentrierung von CO_2 aus der Umgebungsluft. Dies wird als *Direct Air Capture* (DAC) bezeichnet.

DAC-Anlagen filtern die Umgebungsluft und trennen CO_2 mit Hilfe einer Aminwäsche, eines Absorptionsverfahrens oder mit Anionenaustauschharzen ab. Im anschließenden Schritt wird das hochreine CO_2 in flüssiger oder gasförmiger Form wieder freigesetzt.

In den letzten Jahren wurden erste DAC-Demonstrationsanlagen in Betrieb genommen: Im Rahmen des BMBF-geförderten Kopernikus-Projekts wird am KIT in Karlsruhe seit 2019 eine DAC-Anlage des Schweizer Unternehmen Climeworks betrieben. Auch am Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) in Stuttgart wurde bereits 2009 eine Pilotanlage konstruiert. Die aktuellen Anlagen erfüllen jedoch noch nicht die Anforderungen für einen großskaligen, industriellen Einsatz. Insbesondere im Hinblick auf die Minimierung des Energiebedarfs, die Anlagenskalierung, die Prozessintegration und Kostenreduktion besteht nach wie vor Forschungsbedarf (Viebahn et al. 2018). In der Literatur findet sich eine große Bandbreite an Kostenschätzungen. Beispielsweise geben Fasihi et al. (2019) Kosten von über 200 €/t CO_2 an.

5.3.4 Chemische Katalyse

Die Katalyseforschung stellt einen wichtigen Treiber für die Nutzung von CO_2 dar. Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei CO_2 um ein sehr stabiles, reaktionsträges Molekül handelt, ist eine große Energiemenge nötig, um CO_2 in einer chemischen Reaktion in andere Produkte umzuwandeln. Durch den Einsatz geeigneter Katalysatoren lässt sich der Energiebedarf für eine Reaktion senken und somit die Reaktion in eine gewünschte Richtung lenken. Mittlerweile konnten im Laborbetrieb verschiedenste Synthese-Reaktionen umgesetzt werden, von der Synthese einfacher C_1-Moleküle wie Methanol oder Ameisensäure bis hin zu komplexeren Verbindungen wie Alkohole, Carbonsäuren oder Polymere sowie zyklischen Kohlenstoffverbindungen (Klankermayer et al. 2016; Dabral und Schaub 2019).

Erste Ansätze wie die CO_2-basierte Synthese von Polyurethan-Schäumen (durch Covestro) haben mittlerweile industrielle Reife erreicht. Auch andere Anwendungen wie

die Methanolsynthese mittels heterogener Katalyse, d. h. dem Einsatz von festen Katalysatoren zur Umsetzung von flüssigen oder gasförmigen Substanzen, ist bereits verhältnismäßig weit fortgeschritten und wird bereits in Pilotanlagen untersucht (Dabral und Schaub 2019). Die Umsetzung zu komplexen oder längerkettigen, höherwertigeren Kohlenwasserstoffen ist dahingegen noch Gegenstand der Forschung. Eine besondere Herausforderung liegt darin, kostengünstige und langlebige Katalysatoren zu entwickeln, die für einen großskaligen, industriellen Einsatz geeignet sind.

In Deutschland existieren verschiedene Forschungsinitiativen, die sich der Katalyseforschung zur Nutzung von CO_2 widmen, z. B. in den Kopernikus-Projekten[12]. Daran sind auch große Unternehmen der chemischen Industrie maßgeblich beteiligt. Beispielsweise betreibt die BASF gemeinsam mit der Universität Heidelberg das gemeinsame Forschungslabor „CARLA – Catalysis Research Laboratory“[13].

5.3.5 Photokatalytische Reduktion von CO_2

CO_2 kann auch photokatalytisch über Halbleiter reduziert werden (Ulmer et al. 2019). Hierfür werden Photoabsorber eingesetzt, unter anderem Farbstoffe wie Rutheniumbipyridyl oder Materialien wie Quantum Dots, Oxidnanopartikel oder Kohlenstoffbasierte Heterostrukturen (Fermin und Marken 2018). Eine direkte photokatalytische Reduktion hätte zum Vorteil, dass die Sonnenenergie direkt genutzt werden kann und somit auf verschiedene Schritte der Energieumwandlung wie Photovoltaik und Wasserelektrolyse zur Wasserstoffgewinnung verzichtet werden könnte (Ulmer et al. 2019).

Photokatalytische Ansätze stellen daher auch attraktive Komponenten für eine künstliche Photosynthese dar (Kap. 5.3.6). Für verschiedene Ansätze wurde im Labormaßstab ein *Proof of Concept* erbracht. Die bislang erreichbaren Umsätze sind jedoch noch deutlich zu gering für Anwendungen im industriellen Maßstab. Auch sind die Reaktionsmechanismen häufig noch nicht vollständig aufgeklärt. Dementsprechend bedarf es noch erheblicher Forschungsanstrengungen sowohl im Bereich der Grundlagenforschung als auch in der anwendungsorientierten Forschung zur Entwicklung von Verfahren, die industriellen Anforderungen genügen.

13 http://www.carla-hd.de

5.3.6 Künstliche Photosynthese

Unter „künstlicher Photosynthese“ versteht man rein technische Systeme, in denen die Umwandlung von Solarenergie mit katalytischen Prozessen zur Synthese von Brenn- und Wertstoffen gekoppelt ist und alle Prozessschritte in einer Anlage räumlich und zeitlich vollständig miteinander integriert und dadurch sehr effizient sind (Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina und Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften 2018).

Funktionale Moleküle, Materialien oder Bauteile existieren für alle Teilprozesse der Photosynthese, d. h. für Lichtabsorption, Ladungstrennung, Wasseroxidation und CO_2-Reduktion. Allerdings sind nur wenige Prototypen voll integrierter Systeme bekannt. Der Schwerpunkt liegt bislang auf Energieanwendungen, insbesondere auf der solaren Produktion von Wasserstoff. Sofern eine Kopplung mit der CO_2-Reduktion erfolgt, sind Methan und Methanol die am häufigsten erforschten Produkte. Für längerkettige funktionalisierte Kohlenstoffverbindungen als Produkte wären noch Durchbrüche bei der selektiven, energieeffizienten CO_2-Reduktion erforderlich.

Prototypen sind im cm^2-Maßstab und überwiegend auf den Laborbetrieb ausgelegt. Die Wirkungsgrade liegen in der Größenordnung bis 5 Prozent, die Betriebsdauer im Umfang von Tagen. Hierfür wurden bislang teure Materialien in aufwändiger Fertigung verwendet, die für eine großtechnische Anwendung nicht geeignet wären.

Insgesamt handelt es sich bei der künstlichen Photosynthese um einen konzeptionell sehr attraktiven Ansatz, da das vollständig integrierte System ein hohes Effizienzpotenzial birgt (European Commission, Directorate-General for Research & Innovation 2016; Dau et al. 2019). Allerdings befindet sich dieser Ansatz weitgehend im Stadium der Grundlagenforschung. Es ist von einem hohen Entwicklungs- und Optimierungsaufwand auszugehen, verbunden mit einem hohen Entwicklungsrisiko. Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht für die Einzelkomponenten in der Optimierung der Wirkungsgrade, der Betriebsdauer sowie der Robustheit unter Realbedingungen, insbesondere, weil hierfür kostengünstige Materialien möglichst ohne seltene Rohstoffe gefunden werden müssen. Weitere FuE-Aufgaben liegen in der vollständigen Integration der Einzelkomponenten zu Gesamtsystemen, der Maßstabsvergrößerung sowie der Entwicklung industriell relevanter Fertigungsverfahren.

5.4 Einbettung der Technologien in ein künftiges Wirtschaftssystem

5.4.1 Hintergrund, Ausgangslage

Das Pariser Klimaschutzabkommen umzusetzen, um die gesteckten Klimaziele zu erreichen, stellt Gesellschaft und Wirtschaftssystem vor bislang beispiellose Herausforderungen: Um die stufenweise Reduktion der Treibhausgasemissionen um 40 Prozent im Jahr 2020 und 70 Prozent im Jahr 2030, verglichen mit dem Jahr 1995, und Klimagasneutralität im Jahr 2050 zu erreichen, sind weitreichende Veränderungen im Wirtschaftssystem, aber auch in den gesellschaftlichen Verhaltensweisen, beispielsweise der Mobilität, notwendig. Innovative Technologien zur Treibhausgas-Einsparung können deshalb nur eine von mehreren Komponenten darstellen. Ihr Beitrag zur Erreichung der Klimaziele hängt maßgeblich von Art und Umfang ihres Einsatzes sowie den geltenden Rahmenbedingungen ab. Die Frage nach der gesellschaftlich-politischen Gestaltung unserer künftigen Gesellschaft umfasst vielfältige Aspekte, die größtenteils übergeordneter Natur sind und den Rahmen dieser Studie sprengen würden. Für eine Bewertung und Einordnung der hier untersuchten Technologien sollen deshalb hier nur einige Aspekte aufgezeigt werden, deren Ausgestaltung maßgeblich den künftigen Einsatz von CO_2-Nutzungstechnologien beeinflussen dürfte. Dies betrifft nicht allein biotechnische Verfahren, sondern in der Regel Technologien zur Fixierung und Nutzung von CO_2 (*Carbon Capture and Use*-Technologien, CCU-Technologien) in ihrer Gesamtheit. Da für viele der Faktoren die konkrete Ausgestaltung derzeit noch unklar ist, ergeben sich große Unsicherheiten bei der Bewertung der möglichen CO_2-Einsparpotenziale einzelner Technologien.

5.4.2 Erwartete Entwicklungen und Implikationen für CCU-Technologien

5.4.2.1 Energiebedarf und -produktion in Deutschland

Der notwendige stufenweise Ausstieg aus fossilen Rohstoffen führt dazu, dass neben einer Kreislaufführung des Kohlenstoffs auch die Erschließung erneuerbarer Energiequellen ein zentrales Thema darstellt. Sowohl im Mobilitätssektor als in der stofflichen Produktion wird deswegen eine Elektrifizierung angestrebt, sodass erwartet wird, dass der Bedarf an elektrischer Energie massiv steigen wird. Der Nettostromverbrauch von Deutschland bewegte sich in den vergangenen Jahren im Bereich 500 - 540 TWh

und lag im Jahr 2019 bei 512 TWh[14]. Dieser Bedarf kann aktuell durch inländische Produktion gedeckt werden[15].

Eine vollständige Defossilisierung würde zu einem massiven Anstieg des inländischen Strombedarfs führen: Allein für die Chemiebranche wird bei einer vollständigen Umstellung eine Vervielfachung des Strombedarfs von 54 TWh im Jahr 2018 auf 628 TWh im Jahr 2050 vorhergesagt (Geres et al. 2019). Dieser Bedarf wird sich nach heutiger Kenntnis nicht allein durch inländische Produktion decken lassen, sodass sich Deutschland von einem derzeitigen Netto-Stromexporteur zu einem Netto-Importeur entwickeln dürfte. Daraus ergeben sich Fragen nach den geopolitischen Implikationen dieser Entwicklung und nach der künftigen Höhe des Strompreises.

Unabhängig von der technischen Machbarkeit stellt sich für CCU-Technologien auch die Frage der Wirtschaftlichkeit, wobei der künftige Strompreis ein entscheidendes Kriterium darstellt (Hoppe et al. 2018). Für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen von CCU-Systemen werden häufig sehr niedrige Strompreise angenommen, die deutlich unter den heutigen Preisen angesiedelt sind (Haas et al. 2018; Geres et al. 2019; Hoppe et al. 2018). Im Hinblick auf die oben skizzierten Entwicklungen müssen diese Annahmen jedoch kritisch hinterfragt werden (Kaiser und Bringezu 2020). Ebenso zielen viele Entwicklungen darauf ab, Überschussstrom zu nutzen: Hier stellt sich einerseits die Frage, in welchem Umfang Stromspitzen in Zukunft auftreten werden, denn nur bei einer hohen Anzahl an Stunden mit günstigem Strom lassen sich Wasserstoff und Syntheseprodukte wettbewerbsfähig in Deutschland herstellen. Zum anderen ist offen, inwiefern ein wirtschaftlicher Einsatz von strombasierten CCU-Technologien im industrierelevanten Maßstab möglich sein kann, wenn deren Betrieb durch kaum kontrollierbare externe Faktoren wie das Wetter bestimmt wird.

5.4.2.2 Verfügbarkeit von CO_2-Quellen

Aktuell stellt der Energiesektor mit mehr als 80 Prozent der Gesamtemissionen die größte Quelle für CO_2-Emissionen in Deutschland dar, Industrieprozesse und Landwirtschaft tragen jeweils ca. 7,5 Prozent zu den Gesamtemissionen[16] bei (Umweltbundesamt 2020). Dieses Emissionsprofil und damit auch die Verfügbarkeit von CO_2-Quellen wird sich bis 2050 in Deutschland grundlegend ändern. Auch wurde die

14 https://de.statista.com/statistik/daten/studie/164149/umfrage/netto-stromverbrauch-in-deutschland-seit-1999/

15 https://www.energy-charts.de/energy_pie_de.htm?year=2019

16 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/8_tab_thg-emi-kat_2020.png

Erhebung einer CO_2-Steuer ab dem Jahr 2021 in Deutschland beschlossen, deren lenkender Effekt jedoch abzuwarten bleibt.

Da für stoffliche Synthesen das CO_2 in einer ausreichend hohen Konzentration vorliegen muss, sind vor allem industrielle CO_2-Punktquellen relevant, bei denen die stoffliche Zusammensetzung des Abgases weitgehend bekannt ist und die geeignete Schnittstellen für eine CO_2-Abscheidung und -Nutzung bieten. Während für Punktquellen im Bereich der Energiewirtschaft und der Stahlproduktion vorausgesagt wird, dass diese bis zum Jahr 2050 weitgehend entfallen müssen, werden die Zementindustrie, Biogasanlagen und Müllverbrennungsanlagen aller Voraussicht nach weiterhin relevante CO_2-Quellen darstellen, durch die sich der Kohlenstoffbedarf für stoffliche Verwertungswege langfristig decken ließe (Kaiser und Bringezu 2020). Daneben besteht die Möglichkeit der direkten Abscheidung von CO_2 aus der Atmosphäre (DAC) (Kap. 5.3.3). Aufgrund des hohen Energiebedarfs für die Gewinnung von CO_2 aus der Atmosphäre wird der inländische Einsatz von DAC-Systemen kritisch diskutiert (Kaiser und Bringezu 2020).

Insgesamt ist festzuhalten, dass sich die inländische Landschaft der CO_2-Quellen in den kommenden Jahrzehnten grundlegend ändern muss. Zur Erreichung der Klimaziele werden einerseits (Übergangs-)Technologien benötigt, die bereits während dieser Transitionsphase dazu beitragen, den CO_2-Ausstoß der bestehenden Industrien so weit wie möglich zu senken, zum anderen solche, die langfristig eine vollständige Defossilisierung der Wirtschaft ermöglichen.

5.4.2.3 Verfügbarkeit von Wasserstoff

Wasserstoff kommt bei fast allen CCU-Technologien für die Reduktion von CO_2 eine zentrale Bedeutung zu. Die elektrolytische Gewinnung von Wasserstoff ist technisch weit entwickelt, bei wachsendem Bedarf an „grünem“ Wasserstoff stellt sich jedoch wiederum die Fragen nach Energieversorgung und Standort, aber auch nach Verteilung und relevanten Infrastrukturen für Transport, Speicherung und Bereitstellung von Wasserstoff. In jüngster Zeit wird der Bereitstellung und Nutzung von Wasserstoff auf politischer Ebene große strategische Bedeutung zugemessen: so wurde in Deutschland im Juni 2020 die Nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung verabschiedet, die 34 Maßnahmen zur Sicherstellung der künftigen Versorgung mit nachhaltig erzeugtem Wasserstoff enthält (Bundesministerium für Wirtschaft BMWi 2020). Im Juli 2020 veröffentlichte die EU-Kommission ihre Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa (European Commission 2020). Auch Baden-Württemberg hat eine Wasserstoff-Roadmap mit 29 Maßnahmen erarbeitet (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft 2020).

5.4.2.4 Bedeutung von CCU-Standorten

Es muss davon ausgegangen werden, dass die inländische Stromproduktion langfristig nicht ausreichen wird, um den künftigen hohen Strombedarf zu decken. Dementsprechend ergeben sich Fragen nach dem Betriebsstandort von CCU-Technologien. Im Falle von vollintegrierten Systemen betrifft dies das gesamte System. In den meisten Fällen sind die Prozessschritten jedoch räumlich und zeitlich entkoppelbar. Bislang ist das Verhältnis eines teilweisen oder vollständigen Betriebs im Ausland zu einem inländischen Betrieb offen.

Der Betrieb von CCU-Anlagen im Inland ermöglicht die Emissionsreduktion inländischer Industrien, inländische Wertschöpfung und Autarkie. Dem gegenüber könnte es vorteilhaft, sein, insbesondere energieintensive Prozessschritte mit CCU vorzugsweise direkt an ausländischen Orten durchzuführen, an denen zu geringen Kosten große Mengen erneuerbaren Stroms gewonnen werden können, also beispielsweise in Wüstenregionen. So könnte man Energieverluste beim Stromtransport über lange Strecken vermeiden. Dem gegenüber sind Power-to-X-Produkte in der Regel zu niedrigeren Kosten transportierbar. Derartige Fragen müssen jedoch im Kontext der nationalen und europäischen Versorgungssicherheit diskutiert werden, eine Vertiefung würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

5.4.2.5 Regulatorische Einordnung von CO_2-basierten Produkten

Ein weiterer entscheidender Faktor für den Einsatz von CCU-Technologien und die Marktakzeptanz der damit hergestellten Produkte ist ihre regulatorische Klassifizierung, beispielsweise als Recyclingprodukte. Diese stehen im Wettbewerb beispielsweise mit fossil basierten, bio-basierten und mit konventionellen Recycling-Produkten. Letztendlich ist es eine Frage der politischen Weichenstellung, inwiefern regulatorische Anreize für den Einsatz von CCU-Technologien geschaffen werden.

5.4.3 Implikationen für die Technologiebewertung

Eine Bewertung von CCU-Technologien im Allgemeinen und von biotechnischen und hybriden Verfahren im Besonderen ist derzeit aufgrund vielfältiger Unsicherheiten und einer begrenzten Datenlage nur unter Vorbehalt möglich. Künftiger Einsatz, Akzeptanz in Wirtschaft und Bevölkerung und Beitrag zu Klimazielen des Bundes und des Landes Baden-Württemberg werden neben der technologischen Reife und Eignung der Technologien für bestimmte Anwendungen auch maßgeblich durch wirtschaftliche, politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen bestimmt. Bislang ist hinsichtlich

vieler zentraler Aspekte die langfristige politische Weichenstellung allerdings noch nicht absehbar.

Deshalb wird bei der Bewertung der Technologien und Anwendungsoptionen an dieser Stelle lediglich auf vielfältige Unsicherheiten hingewiesen, eine umfassende Analyse verschiedener Zukünfte hätte den Rahmen dieser Studie jedoch gesprengt.

Es bleibt festzuhalten, dass zum Erreichen der gesetzten Klimaziele der Nettoeintrag von CO_2 in die Atmosphäre signifikant verringert werden muss, unabhängig davon, ob das CO_2 aus fossilen oder biogenen Quellen stammt. Ergänzend kommen Verfahren zum Einsatz, die eine Kreislaufführung des emittierten CO_2 ermöglichen. Ein solches CO_2-Recycling ist technologisch zunächst für CO_2 möglich, das in höheren Konzentrationen aus Punktquellen (z.B. Kraftwerke, Industrieanlagen) emittiert wird. Perspektivisch sind auch CO_2-negative Produktionsprozesse möglich, die atmosphärisches CO_2 als Kohlenstoffquelle nutzen. Hemmende Faktoren sind jedoch der große Energiebedarf für die Aufkonzentrierung von atmosphärischem CO_2 und die Tatsache, dass eine technische Reife für derartige Verfahren für großindustrielle Anwendungen eher mittel- bis langfristig erreichbar sein wird. Entsprechend können sich potenzielle Klimaeffekte auch erst langfristig entfalten.

Kurzfristig sollte die industrielle Implementierung von CO_2-Recycling-Verfahren an allen geeigneten CO_2-Punktquellen im Vordergrund stehen, um die Technologie zu optimieren. Der mittel- bis langfristige strategische Fokus der Ausrüstung industrieller Punktquellen mit CO_2-Recyclingverfahren sollte jedoch auf solchen Anlagen liegen, bei denen die CO_2-Emissionen technisch unvermeidbar sind (z.B. Zementherstellung). Dadurch soll vermieden werden, dass durch das CO_2-Recycling die Substitution von CO_2-emittierenden Verfahren durch klimagasneutrale Technologien (z.B. Substitution fossiler Energieträger) länger als (technologisch) nötig hinausgezögert wird.

Für die weitere Analyse werden sowohl Verfahren berücksichtigt, die an CO_2-Punktquellen ansetzen als auch solche, die die Nutzung von atmosphärischem CO_2 ermöglichen. Dabei wird der Schwerpunkt auf ihre technologische Bewertung gelegt.

5.5 Fazit des Screenings: Definition und Abgrenzung des Vertiefungsgegenstandes

Die sonnenlichtgetriebene Umwandlung von CO_2 in Energieträger und Chemikalien ist von der natürlichen Photosynthese inspiriert. Entsprechende Ansätze und Technologien wurden in diesem Kapitel kurz charakterisiert. Das Spektrum der Ansätze, die von der natürlichen Photosynthese inspiriert sind, reicht von rein biotechnischen Verfahren über hybride Verfahren, die technische und biotechnische Prozessschritte kombinieren, bis

hin zu rein technischen Verfahren wie Power-to-X und der künstlichen Photosynthese (Abbildung 5).

Allen von der Photosynthese inspirierten Ansätzen ist gemeinsam, dass sie technische Lösungen für die Photosyntheseschritte – Absorption des Sonnenlichts, Wandlung der Solarenergie in nutzbare Energie, Reduktion des CO_2, Synthese der gewünschten Produkte – umfassen müssen.

Während es sich bei der natürlichen oder modifizierten Photosynthese und der künstlichen Photosynthese um vollintegrierte Verfahren handelt, die Lichtenergie direkt nutzen können, sind alle anderen Verfahren auf die Bereitstellung von (nachhaltig produziertem) Strom angewiesen. Da die verschiedenen Verfahren zumindest theoretisch miteinander und außerdem mit weiteren Syntheseverfahren kombinierbar sind, ergibt sich eine große Anzahl an Möglichkeiten. Zur Eingrenzung des Untersuchungsgegenstands wurden für die vertiefende Analyse solche Verfahren ausgewählt, die die folgenden Voraussetzungen erfüllen:

- In den Prozess der Produktsynthese geht CO_2 als Edukt ein (hierdurch scheiden beispielsweise Biophotovoltaik und biologische Wasserstoffgewinnung aus).
- Die Verfahren umfassen mindestens einen biotechnischen Schritt.
- Die dem System zugeführte Energie kann zumindest theoretisch aus einer solaren Quelle stammen, beispielsweise aus Photovoltaik.
- Die Verfahren dienen der stofflichen Wertschöpfung. Verfahren, die lediglich der Energieumwandlung und -speicherung dienen (z. B. Photovoltaik und Elektrolyse) werden nur in Kombination mit Syntheseverfahren betrachtet.
- Die Verfahren weisen einen solchen Entwicklungsstand auf, dass das Erreichen des Pilotanlagenstadiums (TRL 4-5) oder sogar des Demonstrationsanlagenstadiums (TRL 6-7) innerhalb weniger Jahre erreichbar scheint.
- Es ergeben sich keine unmittelbaren Flächenkonkurrenzen mit der Agar- und Forstwirtschaft. Entsprechend werden Verfahren, die auf der natürlichen Photosyntheseleistung von Agrar- und Forstpflanzen beruhen sowie sämtliche Verfahren, die als Edukte Photosyntheseprodukte (z. B. pflanzliche Biomasse, Stärke) nutzen, nicht für die weiteren Analysen berücksichtigt.

In den folgenden Kapiteln werden die Ansätze, die einer vertieften Analyse unterzogen wurden, im Detail beschrieben. Dabei handelt es sich um die modifizierte Photosynthese (Kap. 6), die Gasfermentation (Kap. 7) und die Elektrobiosynthese (Kap. 8). Sie sind in Abbildung 5 grün gekennzeichnet. Die blau markierten Verfahren werden in der vergleichenden Bewertung (Kap. 9) als Referenz herangezogen.

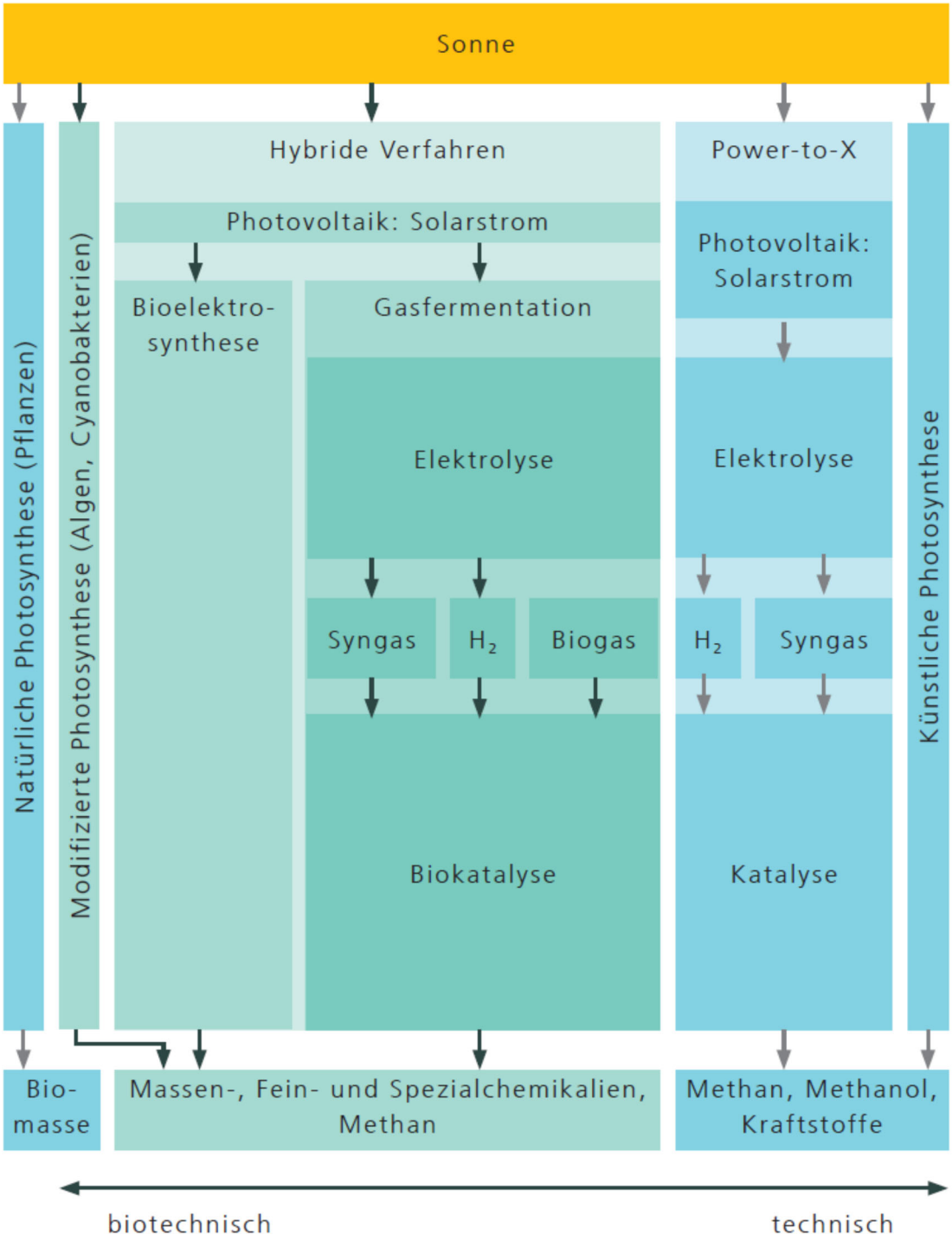


Abbildung 5: Übersicht über die Verfahren der biologischen und künstlichen Photosynthese

6 Modifizierte Photosynthese

Dieses Kapitel befasst sich mit photoautotrophen Mikroorganismen, bei denen entweder die Effizienz der eigentlichen Photosynthese oder aber die photoautotrophe Synthese von industriell interessanten Produkten optimiert wurde.

Zu den photoautotrophen Mikroorganismen gehören einerseits Grünalgen und Cyanobakterien, die wie Nutzpflanzen eine oxygene Photosynthese mit Wasser als Elektronendonator betreiben. Die CO_2-Fixierung erfolgt über den Calvin-Benson-Zyklus. Andererseits gibt es noch photoautotrophe Mikroorganismen, die eine anoxygene Photosynthese mit reduzierten Schwefel- oder Eisenverbindungen als Elektronendonatoren nutzen. Wegen der – im Vergleich zu Wasser – geringen technischen Verfügbarkeit dieser Elektronendonatoren und der – im Vergleich zu Grünalgen und Cyanobakterien – geringen Erforschung dieser Mikroorganismengruppe wird die anoxygene Photosynthese im Folgenden nicht näher betrachtet.

Im Gegensatz zu den nachfolgend vertiefend dargestellten Optionen der Gasfermentation (Kap. 7) und der Elektrobiosynthese (Kap. 8), die jeweils hybride, d. h. technische und biotechnische Verfahrensschritte koppelnde Prozesse sind, handelt es sich bei der modifizierten Photosynthese um ein rein biologisches System, bei dem Solarenergiewandlung, CO_2-Fixierung und Synthese der gewünschten Zielprodukte voll integriert in derselben Zelle ablaufen.

6.1 Biologischer Hintergrund

Aus der Photosyntheseforschung lässt sich die Effizienz der Solarenergienutzung, auch als Wirkungsgrad bezeichnet, für die oxygene Photosynthese abschätzen. Dieser Wirkungsgrad gibt an, welcher Anteil der gesamten Energie der einfallenden Sonnenstrahlung in eine spezifische, nutzbare Energieform überführt wird, im Fall der Photosynthese ist es die in Form chemischer Verbindungen gespeicherte Energie (Dau et al. 2019, S. 57). Der theoretische Maximalwert liegt in der Größenordnung von 10 bis 12 Prozent, wird in der Realität aber nicht erreicht. Vielmehr liegt der Wirkungsgrad für die globale Vegetation im Jahresmittel bei nur 0,25 bis 1 Prozent, bei landwirtschaftlichen Nutzpflanzen bei bis zu 3,4 Prozent und bei Mikroalgen und Cyanobakterien in Bioreaktoren bei 3 Prozent, unter optimalen Laborbedingungen ggf. höher (Tabelle 5). Mikroalgen und Cyanobakterien können unter anderem deshalb einen höheren Wirkungsgrad als Nutzpflanzen erreichen, weil keine Wurzeln und Sprossachsen gebildet werden müssen. Gleichwohl gibt es eine Vielzahl von Gründen, warum der real erzielbare Wirkungsgrad sowohl bei Pflanzen als auch bei photosynthetisch aktiven Mikroorganismen deutlich unter dem theoretischen Maximum liegt. Hierzu zählen (Dau et al. 2019, S. 61ff.):

- Nichtideale Flächenabdeckung, Reflektionsverluste und Vegetationsperioden,
- Energieaufwand für Selbstreproduktion und Reparaturprozesse,
- Lichtsättigung und Photorespiration.

Tabelle 5: Wirkungsgrade der Solarenergienutzung durch oxygene Photosynthese

Organismen/Stoffwechselprozess	Wirkungsgrad Solarenergie → Biomasse (%)	
	real	theoretisch maximal
Oxygene Photosynthese, Calvin-Benson-Zyklus		10-12 %
Globale Vegetation, Jahresmittel	0,25-1 %	
C_3-Pflanzen, Freiland	Bis 2,4 %	4,6 %
C_4-Pflanzen, Freiland	Bis 3,4 %	6 %
Grünalgen, Cyanobakterien, begaster Photobioreaktor, Freiland	3 %	9 %
„Modifizierte Photosynthese“: Gentechnik, synthetische Biologie		10-12 % Bis 20 % (radikal)

Quelle: Zusammenstellung von Informationen aus Blankenship et al. (2011), zitiert in Dau et al. (2019), S. 55ff.

Forschungsansätze richten sich daher darauf, die Effizienz der Solarenergienutzung durch oxygene Photosynthese und die photosynthetische CO_2-Fixierung ausgehend von den realen Werten näher an die theoretischen Maximalwerte in der Größenordnung von 10 bis 12 Prozent zu bringen. Theoretisch erscheint es möglich, durch speziell designte, nicht-natürliche Stoffwechselwege (Kap. 5.2.3) sogar höhere Wirkungsgrade von bis zu 20 Prozent erreichen zu können. Dies würde aber einen radikalen Umbau des Stoffwechsels der Organismen erfordern (Kubis und Bar-Even 2019). Es ist beim derzeitigen wissenschaftlich-technischen Stand des *metabolic engineering* und der synthetischen Biologie ungewiss, ob dies realisiert werden kann bzw. ob lebensfähige, den natürlich vorkommenden Organismen überlegene Konstrukte erhalten werden können.

Mit dem Ziel, eine wachsende Weltbevölkerung ernähren zu können, werden Forschungsanstrengungen unternommen, die Effizienz der Solarenergienutzung und die photosynthetische CO_2-Fixierung in landwirtschaftlichen Nutzpflanzen zu erhöhen (Bar-Even 2018; Skraly et al. 2018; Weber und Bar-Even 2019; Amthor et al. 2019; Hennacy und Jonikas 2020; Naseem et al. 2020). Die dort verfolgten Ansätze überschneiden sich zu größeren Anteilen mit der Erhöhung der Photosyntheseeffizienz in Grünalgen und Cyanobakterien, da alle drei Organismengruppen im Prinzip dieselben Stoffwechselwege nutzen. Im Folgenden wird auf Grünalgen und Cyanobakterien eingegangen,

die im Vergleich zu landwirtschaftlichen Nutzpflanzen folgende Vorteile bzw. Stärken aufweisen:

- Potenzial, auf landwirtschaftlich nicht nutzbaren Flächen kultiviert zu werden
- Höhere photoautotrophe Produktivität als Nutzpflanzen, da ein geringerer Anteil von Photosyntheseprodukten für Aufbau und Erhalt der Organismen benötigt wird; nur ein Zelltyp oder wenige Zelltypen
- Kurze Generationszeiten, keine jahreszeitlichen Aussaat-Ernte-Zyklen erforderlich
- Kultivierung unter vielen unterschiedlichen Bedingungen möglich
- Fähigkeit zur direkten Synthese komplexerer Moleküle mit mehreren C-Atomen aus CO_2, auch kommerziell interessanter Substanzen
- Methoden für die molekulargenetische Veränderung sind gut etabliert bzw. mit angemessenem Aufwand realisierbar
- Potenzial, den Organismen durch *metabolic engineering* die Fähigkeit zur Synthese kommerziell interessanter Substanzen zu verleihen, zu deren Synthese sie natürlicherweise nicht fähig wären
- Versorgung der Zellen mit Substraten unkritisch, Downstream Processing vergleichsweise einfach

Im Wesentlichen werden folgende Ansätze verfolgt, um die Effizienz der Solarenergienutzung und die photosynthetische CO_2-Fixierung durch Grünalgen und Cyanobakterien zu erhöhen (Bar-Even 2018 ; Dau et al. 2019; Erb und Zarzycki 2018; Work et al. 2012; Miao et al. 2020):

- Erhöhung des Wirkungsgrades der Lichtreaktion der Photosynthese durch
  - Verbreiterung des nutzbaren Lichtspektrums von 350-700 nm auf 720-740 nm durch Expression alternativer Chlorophylle (Chlorophyll d, f)
  - Verengung des Spektrums des eingestrahlten Lichts durch Verwendung von LEDs mit einem Maximum bei 650 nm (Lips et al. 2018)
  - Verringerung der Photoinhibition durch Modifikation der Schutzmechanismen gegen hohe Lichtintensitäten
  - Verringerung der Verluste durch Lichtsättigung durch Verringerung der aktiven Lichtsammelkomplexe über verschiedene Strategien oder durch verfahrenstechnische Lösungen
- Optimierung der Ribulose-1,5-bisphosphat-Carboxylase (RubisCo) durch
  - Austausch gegen eine heterologe RubisCo mit (erwünschten) höheren Carboxylierungsraten, höherer Spezifität für CO_2, geringeren (unerwünschten) Nebenreaktionen mit Sauerstoff, geringerer Bindung von RubisCo-Inhibitoren oder
  - entsprechende Optimierung der RubisCo durch Enzym-Engineering

- Verringerung des CO_2-Verlusts durch Photorespiration, z. B. durch Einführung alternativer Photorespirations-Bypässe, die kein CO_2 freisetzen oder weniger Energie- und Reduktionsäquivalente verbrauchen (Trudeau et al. 2018)
- Einführung von CO_2-Konzentrierungsmechanismen, um die Reaktionsbedingungen für die RubisCo günstig zu beeinflussen
- Zeitliche Entkopplung von Mikroorganismen-Wachstum und Produktion des Zielprodukts
- Optimierung der Flächenerträge durch Optimierung des Designs der Photobioreaktoren und der Prozessführung (Posten 2009)

Für eine technische Nutzung und einen industriellen Einsatz optimierter Grünalgen- oder Cyanobakterien-Produktionsorganismen ist es zudem erforderlich, durch *metabolic engineering* den (Kohlen-)Stofffluss in Richtung des jeweiligen Zielprodukts zu lenken, um dessen Ausbeute zu steigern, die genetische Stabilität des Produktionsorganismus zu steigern, Photobioreaktoren und Prozessführung sowie Abtrennung des Produkts und seine Aufarbeitung (Downstream Processing) zu optimieren (Pérez et al. 2019).

6.2 Technische Nutzung und industrieller Einsatz

Die in Kapitel 6.1 genannten Ansätze zur Steigerung der Photosyntheseeffizienz der CO_2-Fixierung befinden sich weitgehend noch im Stadium der Laborforschung. Ihnen wird aber das Potenzial zugemessen, die Wirkungsgrade von derzeit 3 bis 5 Prozent erhöhen zu können (Dau et al. 2019, S. 76).

In Bezug auf die Optimierung der Synthese hochwertiger Zielprodukte wurde gezeigt, dass Mikroalgen und Cyanobakterien – ggf. nach *metabolic engineering* zur Expression heterologer Synthesewege – ein breites Spektrum von Massen- über Spezial- und Feinchemikalien, Nahrungsergänzungsmitteln bis hin zu Pharmazeutika zu synthetisieren vermögen. Einige industrielle Produktionsprozesse sind kommerzialisiert. So belief sich 2015 die Weltjahresproduktion von Spirulina-Nahrungsergänzungsprodukten auf 5.000 bis 15.000 Tonnen, von Phycocyanin auf 110 Tonnen mit einem Marktwert von 1,9 Mrd. US-$ (Noreña-Caro und Benton 2018). Es kann der Literatur nicht immer eindeutig entnommen werden, inwieweit diese Produktionsprozesse im industriellen Maßstab tatsächlich (ausschließlich) auf photoautotropher Kultivierung beruhen, oder ob die eigentliche Produktion heterotroph, also unter Nutzung einer organischen Energie- und Kohlenstoffquelle erfolgt.

In Deutschland wird Mikroalgenbiomasse beispielsweise durch die Firma Roquette Klötze GmbH & Co. KG[17] produziert und zu verschiedenen Wellnessprodukten, Nahrungsergänzungsmitteln und Futtermitteln verarbeitet. Die Firma IGV GmbH[18] produziert Mikroalgen für Algenkosmetik und Nahrungsergänzungsmittel. In Baden-Württemberg ist die Firma subitec GmbH[19] Spezialist für den Bau von Anlagen zur Kultivierung von Mikroalgen, die in Nahrungsergänzungsmitteln, als Futtermittel für Aquakulturen sowie in der Kosmetik- und Pharmaindustrie Anwendung finden.

Darüber hinaus gibt es mehrere Versuchs-, Pilot- und Demonstrationsanlagen, in denen CO_2-haltige Abgase aus industriellen Produktionsprozessen als Kohlenstoffquelle für photoautotrophe Mikroorganismen genutzt werden. Beispielsweise hat das Unternehmen Heidelberg Zement im Jahr 2019 eine 1 Hektar große Algenfarm in Safi, Marokko, in Betrieb genommen, mit der aus den CO_2-haltigen Abgasen der dortigen Zementfabrik Algenbiomasse als Fischfutter produziert wird.

Eine Zusammenführung der oben genannten Entwicklungen für die photoautotrophe Produktion von Biokraftstoffen (Ethanol, Butanol, Oktanol, Biodiesel) mit Hilfe von Mikroalgen wurde bis zum Jahr 2015 weltweit von mehreren Start-up-Unternehmen vorangetrieben, die eine kommerzielle Produktion dieser solaren Biokraftstoffe anstrebten (Peplow 2015). Während dies technologisch realisierbar war, mussten die Aktivitäten weitgehend aufgegeben werden, da unter den herrschenden Rahmenbedingungen, insbesondere einem niedrigen Rohölpreis am Weltmarkt, eine Kostenwettbewerbsfähigkeit mit fossilen Kraftstoffen vorerst nicht zu erreichen war.

Somit ist die Ausrichtung technologisch weit entwickelter Anlagen und Algenbioraffinerien (Lindblad et al. 2019) auf autotroph hergestellte höherwertige Chemikalien jenseits von Lebensmittelergänzungsmitteln derzeit noch gering. Für kommerziell interessante Produktionsraten ist die Begasung mit CO_2 in höheren Konzentrationen als in der Atmosphäre vorhanden erforderlich. Dies legt eine Kopplung der Mikroalgenanlage an CO_2-emittierende Punktquellen nahe, schließt dadurch aber im Fall der meisten industriellen Punktquellen wohl Lebensmittelanwendungen aus. Herausforderungen liegen in geringen Biomassekonzentrationen, die nicht ohne weiteres erhöht werden können, da dies mit einer wechselseitigen Beschattung der Mikroorganismen einhergeht. Vor diesem Hintergrund besteht FuE-Bedarf, die Photobioreaktoren weiterzuentwickeln und die Reaktoren bzw. Anlagen vom m^2-Maßstab deutlich hochzuskalieren. Die Prozessentwicklung muss die Erhöhung von Produkttitern und Produktionsraten, die Erhöhung der

17 https://www.algomed.de/

18 http://www.igv-gmbh.de

19 https://subitec.com/de

Langzeitstabilität der Prozesse sowie die Senkung des Hilfsenergiebedarfs zum Ziel haben. Auch die Entwicklung von Wertschöpfungsketten bzw. geeigneten Geschäftsmodellen zur photoautotrophen CO_2-Nutzung aus industriellen Punktquellen müsste adressiert werden.

7 Gasfermentationen

Die Gasfermentation ist ein biotechnologisches Verfahren, das es ermöglicht, CO_2 direkt als Kohlenstoffquelle für die Synthese von organischen Verbindungen zu nutzen.

Unter dem Begriff der Gasfermentation werden alle Ansätze zusammengefasst, bei denen Mikroorganismen eine gasförmige Kohlenstoffquelle nutzen. Dazu sind verschiedene Mikroorganismen unter Ausnutzung verschiedener Stoffwechselwege in der Lage. Grundsätzlich ist zwischen anaeroben und aeroben Verfahren zu unterscheiden (Takors et al. 2018). Eine weitere Anwendung der Gasfermentation ist die biologische Methanisierung.

In ausgewählten Anwendungskontexten haben Gasfermentationen bereits Marktreife erreicht. Für eine breite Anwendung der Technologie in verschiedenen Anwendungskontexten müssen jedoch noch technologische Hürden überwunden werden: Insbesondere die Bereitstellung von geeigneten Reduktionäquivalenten und von Prozessenergie sind zentrale Herausforderungen bei der Entwicklung eines industriellen Prozesses.

7.1 Anaerobe Gasfermentation

7.1.1 Biologischer Hintergrund

Einige Mikroorganismen sind in der Lage, atmosphärisches CO_2 über den Wood-Ljungdahl-Stoffwechselweg (auch reduktiver Acetyl-CoA-Weg genannt) zu fixieren. Dabei handelt es sich um einen nicht-zyklischen Stoffwechselweg, der sowohl in Archaeen als auch in Bakterien vorkommt. Die so genannten Acetogenen nutzen CO_2 und/oder CO als Ausgangssubstrate, um Essigsäure (Acetat), also eine Verbindung mit zwei Kohlenstoffatomen, aufzubauen (Gonzales et al. 2019; Dürre 2017; Bengelsdorf und Dürre 2017). Als Energiequelle und Reduktionsäquivalent dient entweder CO oder molekularer Wasserstoff (H_2), sodass eine Fixierung von CO_2 sogar gänzlich ohne zusätzliche Wasserstoffzufuhr möglich ist. Neben Acetat ist die Bildung weiterer Produkte möglich, insbesondere von Alkoholen wie Ethanol und Butanol. Der Wood-Ljungdahl-Stoffwechselweg gilt als besonders energieeffizienter Stoffwechselweg für die Synthese von Alkoholen, mit einem verhältnismäßig geringem Bedarf an teuren „Substraten“ wie H_2 oder Elektrizität (Fast und Papoutsakis 2012). Allgemein gilt, dass anaeroben Organismen nur wenig Energie für ihren Stoffwechsel zur Verfügung steht, diese aber effizient genutzt wird. Somit kommt es in der Regel nur zu geringer Biomassebildung, während die spezifische Produktausbeute sehr hoch ausfallen kann.

Acetogene stellen keine einheitliche taxonomische Gruppe dar. Eine Vielzahl natürlicher Isolate wurde mittlerweile beschrieben und deren Genome vollständig sequenziert. Als Modellorganismen gelten unter anderem *Acetobacterium woodii* und *Clostridium ljungdahlii*, die zu den Clostridien zählen. Die biochemischen Grundlagen des Wood-Ljungdahl-Stoffwechselweges sind weitgehend bekannt, und es sind Verfahren zur gentechnischen Veränderung für relevante Stämme verfügbar. Mit Hilfe biotechnologischer und gentechnische Verfahren konnte das Produktspektrum der anaeroben Gasfermentation deutlich erweitert werden (Liew et al. 2016; Takors et al. 2018).

Es besteht noch größerer Forschungsbedarf im Hinblick auf die Entwicklung industrieller Prozesse und einer Reaktortechnologie, die auf die spezifische Zusammensetzung des verfügbaren Gasstroms angepasst ist. Hier stellt die Bereitstellung von Wasserstoff oder eines anderen geeigneten Reduktionsmittels eine zentrale Herausforderung dar. Weiterer Forschungsbedarf liegt darin, dass die Zwischenprodukte, die unmittelbar aus der Gasfermentation hervorgehen, in der weiteren Downstreamprozessierung in hochwertige, marktgängige Endprodukte überführt werden müssen. Hier liegt der Bedarf weniger in der Entwicklung grundlegend neuer Verfahren, als darin, verschiedene Verfahrensschritte miteinander zu koppeln und einen Gesamtprozess zu entwickeln, der industriellen Anforderungen entspricht.

7.1.2 Technische Nutzung und industrieller Einsatz

Der anaeroben Gasfermentation wird eine hohe wirtschaftliche Bedeutung beigemessen (Liew et al. 2016; Dürre 2017; Takors et al. 2018). Für ausgewählte Anwendungen, insbesondere für CO- und H_2-reiche Abgasströme der Stahlproduktion, wurden Gasfermentationen bis zur Marktreife entwickelt (Kap. 7.1.2.1), wohingegen für andere Anwendungskontexte zwar industrielles Interesse, aber nach wie vor hoher Entwicklungsbedarf besteht (Kap. 7.1.2.2).

Am industriellen Einsatz der Gasfermentation arbeiten nicht nur kleine, dedizierte Biotechnologieunternehmen. Vielmehr engagieren sich auch große Unternehmen wie Evonik, Siemens oder Dow auf diesem Gebiet. Im Folgenden wird auf ausgewählte konkrete Industrieaktivitäten eingegangen.

7.1.2.1 LanzaTech

Vorreiter ist die US-Firma LanzaTech: Diese hat einen industriellen Prozess entwickelt, in dem kohlenstoffreiche Abgase mit Hilfe von Acetogenen für die Synthese von Ethanol und anderen Wertstoffen genutzt werden. Das LanzaTech-Verfahren hat kommerzielle Reife erreicht, ist aber auf Anwendungen beschränkt, bei denen der zu verwertende

Gasstrom eine ausreichend hohe CO- oder H_2-Konzentration enthält, sodass auf die Zuführung von H_2 verzichtet werden kann. Derzeit kommt das LanzaTech-Verfahren vor allem in der Stahlindustrie zum Einsatz: Das Unternehmen betreibt mehrere Demonstrationsanlagen in China und den USA. Eine erste kommerzielle Anlage mit einer Produktionskapazität von 46 kt Ethanol pro Jahr wurde im Jahr 2018 in China in Betrieb genommen (LanzaTech 2018). Im Rahmen des Steelanol-Projekts (Horizon 2020) wird derzeit eine erste europäische Anlage in Kooperation zwischen LanzaTech und dem belgische Stahlproduzenten ArcelorMittal in Ghent, Belgien aufgebaut (Takors et al. 2018; Steelanol). Ethanol stellt nach wie vor das Hauptprodukt dar, allerdings wurde die Produktpalette deutlich erweitert, unter anderem auf Flugbenzin und diverse Plattformchemikalien. LanzaTech unterhält verschiedene Kooperationen mit Unternehmen aus der Chemiebranche wie Evonik oder Dow.

Verschiedene Studien kommen zu dem Ergebnis, dass Ethanol, welches über den LanzaTech-Prozess produziert wird, eine bessere Treibhausgasbilanz aufweist, als Ethanol, das primär auf fossilen Quellen stammt (Handler et al. 2016; Ou et al. 2013). Allerdings gilt insbesondere für die Stahlproduktion, dass es sich lediglich um Kohlenstoffrecycling handelt, da nach wie vor fossiler Kohlenstoff aus Kohleverbrennung freigesetzt wird.

7.1.2.2 Rheticus-Projekt

Im Gegensatz zum etablierten LanzaTech-Verfahren befinden sich die Anwendungen der Gasfermentation für CO- und H_2-arme Abgasströme bislang noch in der Entwicklung, bergen aber das Potenzial einer breiteren industriellen Anwendung als das LanzaTech-Verfahren. Die Unternehmen Evonik und Siemens entwickeln aktuell im Rahmen des Rheticus-Projekts, das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wird, einen integrierten Prozess, der die Prozessschritte der Synthesegasbereitstellung, der Gasfermentation und der weiteren Produktumsetzung umfassen soll (Haas et al. 2018). Im ersten Schritt soll ausgehend von CO_2 Synthesegas (CO und H_2) mittels Elektrolyse produziert werden. Das Synthesegas wird in einem mehrstufigen Fermentationsverfahren zunächst mittels anaerober Gasfermentation zu Acetat und Ethanol verstoffwechselt. Aus diesen Intermediaten werden in anschließenden Fermentationsschritten die Plattformchemikalien Butanol und Hexanol gebildet (Haas et al. 2018). Dabei stellt die Siemens AG einen CO_2-Elektrolyseur mit einer Gesamtelektrodenfläche von 3000 cm^2 bereit, der die Reduktion von CO_2 und Wasser zu Synthesegas katalysiert. Die Firma Evonik hat das Fermentationsmodul mit einem Gesamtvolumen von 2000L entwickelt. Das Rheticus-Projekt verdeutlicht anschaulich die Herausforderungen der Prozessentwicklung, da zwar die für die einzelnen Prozessschritte not-

wendigen Einzeltechnologien bekannt und verfügbar sind, es jedoch noch weitreichender Entwicklungsanstrengungen bedarf, diese in einen kontinuierlichen Prozess zu integrieren, der industriellen Anforderungen gerecht wird. Die Inbetriebnahme der integrierten Anlage ist für das Jahr 2020 angekündigt worden (Siemens AG; Evonik Industries AG 10.10.2019).

Der Vorteil des Rheticus-Ansatzes ist, dass dieser auf CO_2 als Ausgangssubstrat aufbaut. Allerdings ist wie bei allen Power-to-X-Verfahren langfristig mit einem hohen Bedarf an klimaneutral erzeugtem Strom für den Elektrolyseschritt zu rechnen.

7.2 Aerobe Gasfermentation

Neben der anaeroben Gasfermentation ist auch die Fixierung von CO_2 in Gegenwart von Sauerstoff möglich. Nicht-photosynthetische CO_2-fixierende Mikroorganismen, so genannte Chemoautotrophe, nutzen verschiedene anorganische Verbindungen wie Wasserstoff, Metallionen oder Sulfide zur Reduktion von CO_2. Die Kohlenstofffixierung erfolgt in den meisten Fällen über den Calvin-Zyklus oder den reduktive Citratzyklus (auch reduktiver Krebs-Zyklus oder reduktiver Tricarbonsäure-Zyklus genannt). In beiden Fällen ist das Endprodukt Acetyl-CoA, ein Zwischenprodukt der Fettsäuresynthese (Reed et al. 2017). Im Gegensatz zur anaeroben Fermentation liefern aerobe Stoffwechselwege in der Regel deutlich mehr Energie in Form vom ATP, was sich in einer stärkeren Biomassebildung widerspiegelt.

Im Hinblick auf mögliche industrielle Anwendungen liegt die aerobe Gasfermentation deutlich hinter der anaeroben Gasfermentation zurück. Die meisten Aktivitäten befinden sich noch im Bereich der Grundlagenforschung. Interesse kommt unter den chemolithoautotrophen Bakterien den so genannten „Knallgasbakterien“ zu. Diese sind in der Lage, in einer Knallgasreaktion Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser zu oxidieren (H_2 + 0,5 O_2 → H_2O). Dabei handelt es sich um eine stark exotherme Reaktion, bei der viel Energie freigesetzt wird, die von den Bakterien für die Fixierung von CO_2 genutzt werden kann (Reed et al. 2017; Brigham 2019). Industriell relevante Produkte, die ausgehend von Acetyl-CoA von Knallgasbakterien gebildet werden können, umfassen langkettige Fettsäuren und Alkohole für Bioschmierstoffe oder Biokraftstoffe, Terpene sowie Bioplastik (Brigham 2019).

Als Modellorganismus gilt das Bodenbakterium *Cupriavidus necator* (früher auch *Ralstonia eutropha* genannt). *C. necator* ist ein natürlicher Bioplastik-Produzent, der große Mengen an Polyhydroxyalkanoat (PHA) intrazellulär als Speicherstoff einlagern kann (Pohlmann et al. 2006). Außerdem sind Verfahren zur genetischen Manipulation von

C. neactor verfügbar und die mögliche Produktpallette konnte in den letzten Jahren deutlich erweitert werden (Heinrich et al. 2018; Brigham 2019).

Dass es sich bei dem Substrat, dem Gasgemisch aus H_2 und O_2, um ein explosives Gas („Knallgas“) handelt, stellt eine Herausforderung für die Prozess- und Reaktorentwicklung dar. Hier besteht noch grundlegender Forschungsbedarf zu Prozessdesigns und Reaktorarchitekturen, die diesem Sicherheitsrisiko Rechnung tragen.

7.3 Biologische Methanisierung

Einige Archaebakterien, so genannte hydrogenotrophe Methanogene, sind in der Lage, CO_2 unter Verwendung von Wasserstoff zu Methan (CH_4) zu reduzieren. Hierfür nutzen sie den Methyl-Arm des Wood-Ljungdahl-Stoffwechselwegs (Borrel et al. 2016). Da der Wasserstoff in der Regel über eine Wasserelektrolyse bereitgestellt wird, kann die biologische Methanisierung auch den Power-to-X-Verfahren bzw. den hybriden Verfahren zugeordnet werden.

Die wichtigste Anwendung für die biologische Methanisierung stellt die Aufwertung von Rohbiogas dar: Rohbiogas enthält noch 25 bis 55 Volumen-Prozent CO_2, das vor der Einspeisung ins Gasnetz abgetrennt werden muss. Als Alternative zur Abtrennung besteht die Möglichkeit, CO_2 mithilfe der biologischen Methanisierung durch Zuführung von H_2 zu reduzieren und dadurch die Methanausbeute zu erhöhen. Dieses Verfahren gilt als kompetitiv mit katalytisch-thermischen Methanisierungsverfahren und steht bereits an der Schwelle zur Marktreife: In Deutschland werden mehrere Demonstrationsanlagen betrieben. Erste Anbieter von Biogasanlagen bieten Zusatzmodule zur Biogasaufwertung bzw. integrierte Systeme an, darunter die Firmen MicroPyros GmbH[20], microbEnergy GmbH[21] (Viessmann-Gruppe) und Electrochaea GmbH[22].

Insgesamt werden in Deutschland derzeit über 8000 Biogasanlagen betrieben, sodass sich zumindest theoretisch ein großes Anwendungspotenzial für die biologische Methanisierung ergibt. Durch die Kopplung des Verfahrens an Biogasanlagen sind wichtige Voraussetzungen erfüllt: Biogasanlagen liefern einen geeigneten Substratstrom mit hoher CO_2-Konzentration und geringen Verunreinigungen. Die Produktabnahme dürfte durch die Anbindung an Gasnetzinfrastrukturen zumindest technisch gegeben sein. Allerdings muss für die Bereitstellung des Wasserstoffs ein Elektrolyseur betrieben wer-

20 https://www.micropyros.de/

21 https://www.microbenergy.de/

22 http://www.electrochaea.com/

den, sodass die Wirtschaftlichkeit vor allem von den Investitionskosten, der Verfügbarkeit von kostengünstigem Strom und der Betriebsdauer des Elektrolyseurs abhängt. Auch ergibt sich durch das Geschäftsmodell der Biogasaufwertung nur ein geringer Skaleneffekt. Bislang liegen keine abschließenden Analysen zu Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeitseffekten vor (Fröhlich et al. 2019).

8 Elektrobiosynthesen

Die Elektrobiosynthese (auch mikrobielle Elektrosynthese, MES) hat in den letzten Jahren verstärkte Aufmerksamkeit in der akademischen Forschung erhalten und wird als vielversprechende Technologie zur stofflichen Nutzung von CO_2 angesehen. Der Ansatz basiert auf einer direkten Integration von elektrochemischen Systemen in Bioreaktoren, um so Energie und Reduktionsäquivalente für die Reduktion von CO_2 durch Mikroorganismen bereitzustellen. Ein wichtiger Vorteil könnte in hohen Wirkungsgraden liegen, da Effizienzverluste vermieden werden können, die unausweichlich sind, wenn das elektrochemische und das biologische System getrennt betrieben werden, wie im vorangegangenen Beispiel der Gasfermentation beschrieben. Allerdings ergeben sich durch die Integration vielfältige prozesstechnische Herausforderungen.

Die Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass – im Gegensatz zu den Verfahren der Gasfermentation – Elektroden direkt in den Bioreaktor integriert werden. Mikroorganismen können entweder direkt als Biofilm mit der Elektrodenoberfläche interagieren oder die Interaktion erfolgt indirekt über Redoxmediatoren bzw. Intermediate, die die suspendierten Mikroorganismen aus dem Medium aufnehmen.

8.1 Biologischer Hintergrund

Verschiedene Mikroorganismen sind in der Lage, Kathoden als Biofilme zu besiedeln und die von der Elektrode abgegebenen Elektroden zu nutzen. Es konnte gezeigt werden, dass in einigen Fällen ein direkter Elektronenübertrag auf die Mikroorganismen möglich ist (Cheng und Logan 2007; Cheng et al. 2009). Im Fall der mediatoren-basierten Elektrobiosynthese erfolgt zunächst die elektrochemische Reduktion von Wasser und/oder CO_2 an der Kathode, die Reduktionsprodukte (H_2, CO oder Formiat) werden anschließend von Mikroorganismen aufgenommen und verstoffwechselt (Gimkiewicz et al. 2017; Li et al. 2012; Gonzales et al. 2019). Da die exakten Prozesse an der Kathodenoberfläche häufig noch nicht im Detail aufgeklärt sind, lässt sich in vielen Fällen nicht mit Gewissheit sagen, ob es sich um einen direkten Elektronentransfer handelt oder nicht. Für verschiedene Acetogene und Methanogene konnte gezeigt werden, dass sie als Biofilme an der Kathode wachsen und CO_2 über den Wood-Ljungdahl-Stoffwechselweg fixieren können (Kap. 7) (Blasco-Gómez et al. 2017; Karthikeyan et al. 2019; Edel et al. 2019). Auch verschiedene Knallgasbakterien sind geeignete Biokatalysatoren für die Elektrobiosynthese (Krieg et al. 2018; Reiner et al. 2020). Mikrobielle Konsortien rücken zunehmend in den Fokus der Forschung und es gibt Hinweise, dass diese Konsortien in ihrer Leistungsfähigkeit Reinkulturen überlegen sein könnten (Reiner et al. 2020; Bajracharya et al. 2015; Bajracharya et al. 2017; Deutzmann und Spormann 2017).

Im Labormaßstab wurde ein breites Spektrum an Produkten nachgewiesen, die mithilfe der Elektrobiosynthese hergestellt werden können, darunter sowohl Bulkprodukte wie Methan, Methanol oder Ethanol, aber auch höherwertige Produkte wie längerkettige Alkohole (Isopropanol, Hexanol, Butanol), Terpene (Krieg et al. 2018) oder Bioplastik (PLA/PBA) (Jiang et al. 2019).

Der wichtigste Vorteil der Elektrobiosynthese wird in der hohen Energieeffizienz gesehen. Unter Laborbedingungen konnte gezeigt werden, dass über 90 Prozent der aufgewendeten elektrischen Energie in das Produkt überführt werden kann (Cheng et al. 2009; Claassens et al. 2019a; Jourdin et al. 2015). Dem könnte im Hinblick auf die zu erwartende Konkurrenz um regenerativ erzeugten Strom in Zukunft eine große Bedeutung zukommen. Allerdings sind die Systeme dadurch limitiert, dass sie nur unter physiologischen Bedingungen und bei moderaten Stromstärken betrieben werden können, die von den Mikroorganismen an der Kathode toleriert werden. Das bedeutet, dass die hohe Effizienz letztendlich auf Kosten einer verhältnismäßig geringen Gesamtleistung erreicht wird. Zudem wird an der Entwicklung geeigneter Kathodenmaterialien (Aryal et al. 2017) und neuen Reaktorsystemen (Giddings et al. 2015; Krieg et al. 2019) geforscht. Hier ergeben sich auch Überschneidungen und Synergien zur Biophotovoltaik (Kap. 5.2.6).

8.2 Technische Nutzung und industrieller Einsatz

Die Elektrobiosynthese befindet sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium im Bereich von TRL 3-4 und ist bislang nur in der akademischen Forschung untersucht worden. Das Flächenwachstum der Mikroorganismen auf den Elektroden stellt eine Limitierung für die Skalierung der Prozesse auf industrielle Maßstäbe dar (Claassens et al. 2019a; Prévoteau et al. 2020). Die Daten zur Energieeffizienz und zu Wirkungsgraden stammen bislang aus Laborumgebungen, aus denen sich nur sehr eingeschränkt Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit unter realen Prozessbedingungen ziehen lassen. Die Skalierung im Liter-Maßstab in den Bereich von 50-100 Litern ist Gegenstand der aktuellen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Etablierung industrierelevanter Prozesse und Verfahren.

Hierbei wird insbesondere zu klären sein, ob für Anwendungen im industriellen Maßstab die „Ein-Topf-Elektrobiosynthese“ als integriertes System realisiert werden kann, oder ob nicht eher der mehrstufige Betrieb von CO_2-Elektrolyse mit nachfolgender biotechnologischer Stoffumwandlung, wie sie beispielsweise als Gasfermentation im Rheticus-Projekt umgesetzt werden soll (siehe Kap. 7.1.2.2) einer integrierten Elektrobiosynthese vorzuziehen wäre (Prévoteau et al. 2020; Claassens et al. 2019a).

9 Vergleichende Bewertung der Verfahren

9.1 Zielsetzung und Auswahl der Technologien

In diesem Kapitel sollen die in den vorangegangenen Kapiteln 6 bis 8 vertieft vorgestellten biotechnologischen Verfahren zunächst untereinander anhand technischer und nicht-technischer Kriterien verglichen werden (Kap. 9.2). Dabei stehen an dieser Stelle nicht die einzelnen Prozessschritte und deren technische Umsetzung im Fokus, sondern vielmehr der resultierende Gesamtprozess sowie Rahmenbedingungen und Implikationen, die sich aus dem künftigen Einsatz der jeweiligen Verfahren ergäben. Für eine vergleichende Einordnung werden teilweise auch nicht-biotechnische Verfahren sowie die klassische Biomasseproduktion im Rahmen der Land- und Forstwirtschaft herangezogen.

In einem zweiten Schritt werden die biotechnologischen Verfahren in ihrer Gesamtheit den nicht-biologischen Verfahren gegenübergestellt, um grundlegende Stärken und relevante Anwendungen der biotechnologischen Verfahren aufzuzeigen (Kap. 9.3).

9.2 Vergleich der biotechnischen Verfahren untereinander

Im Folgenden werden die Verfahren der modifizierten Photosynthese, der Gasfermentationen sowie der Elektrobiosynthese vergleichend bewertet. Die jeweilige Bewertung ergibt sich aus den Literaturrecherchen, Interviews mit Expertinnen und Experten sowie den Erkenntnissen aus dem Validierungsworkshop (Kap. 4).

9.2.1 Integrationsgrad der Prozesse

Zwar müssen alle von der Photosynthese inspirierten Verfahren die Funktionen der Sonnenlichtabsorption, Energiewandlung, CO_2-Fixierung und -Reduktion und Produktsynthese umfassen (Kap. 5.1). Es gibt aber große Unterschiede darin, inwiefern die einzelnen Prozessschritte in einem integrierten System umgesetzt werden oder ob es sich um eine Prozesskette aus räumlich und zeitlich voneinander unabhängigen Einzelverfahren handelt. Licht, CO_2 und Wasser stellen jeweils die wichtigsten Eingangsparameter in den Gesamtprozess dar (Abbildung 6). Die natürliche Photosynthese dabei stellt ein vollintegriertes System dar, das ausgehend von diesen Inputgrößen Sauerstoff (O_2) und reduzierte organische Kohlenstoffverbindungen (Kohlenhydrate) liefert. Nach diesem Vorbild soll auch die künstliche Photosynthese als vollintegriertes System umgesetzt werden (Abbildung 6, Prozessvariante A).

In allen anderen betrachteten Prozessvarianten (Abbildung 6, Prozessvarianten B und C) stellt die Konversion von Licht in eine nutzbare Energieform (Elektrizität, Wasserstoff) einen von Gesamtsystem losgelösten Prozessschritt dar. Um die Anforderung zu erfüllen, Sonnenlicht als Energiequelle zu nutzen, wird in dieser Studie vereinfachend von Photovoltaik ausgegangen. Allerdings ist die Art der Stromgewinnung aus technischer Sicht für die weiteren Prozessschritte unerheblich. Es wären auch andere Technologien zum Erzeugen von „grünem“ Strom möglich, z. B. Solarthermie, Wasser- oder Windkraft.

Die Reduktion von CO_2 kann als erster Schritt der (biotechnologischen) Produktsynthese erfolgen (Prozessvariante B1) oder als eigenständiger Prozessschritt in einer CO_2-Elektrolyse (Prozessvariante B2). Demnach sind je nach Systemgestaltung die Eingangsprodukte für die Produktsynthesereaktion Wasserstoff und Kohlendioxid oder Synthesegas (CO_2/CO) und Wasserstoff. Diese Prozessvariante ist im Fall der Gasfermentation und der biologischen Methanisierung umgesetzt, aber grundsätzlich auch in allen Power-to-X-Verfahren. Die Gasfermentation, wie sie im LanzaTech-Verfahren umgesetzt ist, stellt einen Sonderfall der Prozessvariante B2 dar: Hier werden Wasserstoff und CO bereits durch den Gasstrom bereitgestellt, sodass die Umwandlung von Sonnenlicht und die elektrolytische Reduktion von Wasser und/oder Kohlendioxid entfallen können.

Im Fall der der Elektrobiosynthese sind dahingegen die elektrolytische Reduktion und die Produktsynthese als integrierter Prozessschritt umgesetzt, sodass keine separate Wasserelektrolyse betrieben bzw. Wasserstoff zugeführt werden muss (Abbildung 6, Prozessvariante C).

Im Allgemeinen wird integrierten Verfahren eine höhere Prozesseffizienz zugeschrieben, da es zu weniger Verlusten an Schnittstellen kommt. Allerdings ergeben sich in der Umsetzung häufig Probleme, da die einzelnen Prozessschritte nicht unabhängig voneinander optimiert werden können und die Prozessintegration mit einem hohen Entwicklungsaufwand einhergeht.

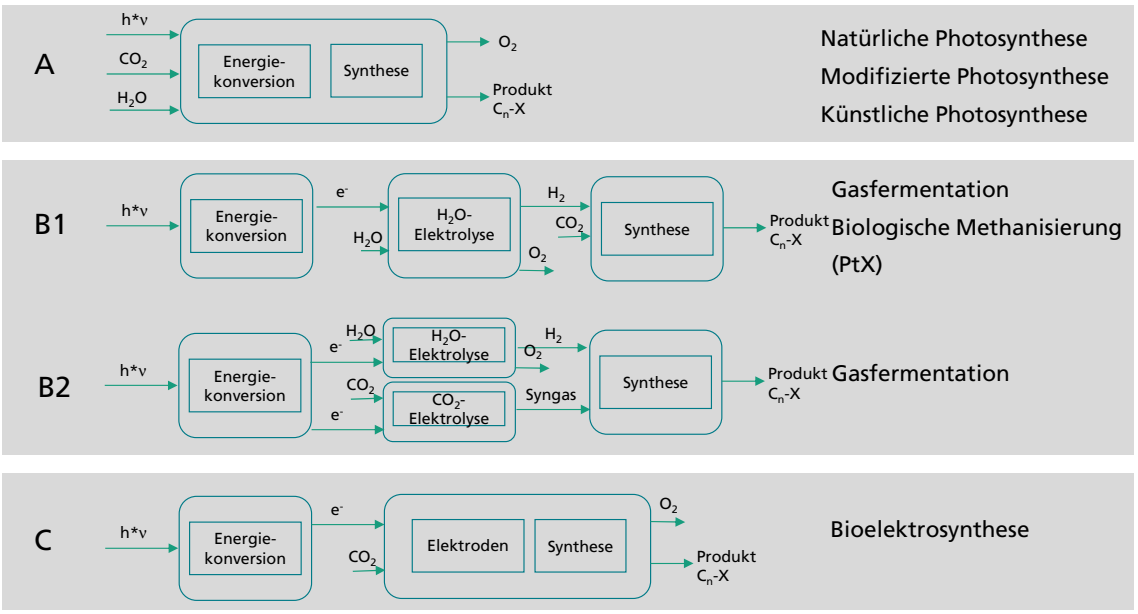


Abbildung 6: Prozesskonzepte für biotechnische und bioinspirierte Technologien zur CO_2-Nutzung

9.2.2 Vergleich nach technologischer Reife

Die verschiedenen biotechnologischen Verfahren zur CO_2-Verwertung befinden sich in unterschiedlichen technologischen Reifegraden. Die jeweils erreichten Reifegrade können sich zwischen den einzelnen Prozessschritten eines Gesamtprozesses unterscheiden, wie dies im Detail in den Kapiteln 6 bis 8 dargelegt wurde. Abbildung 7 gibt eine grobe, vereinfachende und orientierende Übersicht: Die Nutzung von Mikroalgen, die biologische Methanisierung und die Gasfermentation, wie sie im LanzaTech-Verfahren umgesetzt ist, sind technologisch so weit fortgeschritten, dass für spezifische Anwendungen erste kommerzielle Lösungen auf dem Markt sind. Allerdings spielen bei diesen kommerziellen Anwendungen öffentliche Fördermittel eine zentrale Rolle in der Finanzierung bzw. ist im Fall der Mikroalgenverfahren die photoautotrophe Synthese von höherwertigen Produkten noch nicht realisiert, sodass eine wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit vermutlich noch nicht gegeben ist.

Der gekoppelte Betrieb von CO_2-Elektrolyse und Gasfermentation, wie er beispielsweise im Rheticus-Projekt (Kap. 7.1.2.2) angestrebt wird, ist trotz des Engagements von bedeutsamen Industrieakteuren noch in einer fortgeschrittenen Entwicklungsphase, sodass es wahrscheinlich noch einige Jahre bis zum industriellen Einsatz dauern wird, zumal auch noch FuE-Bedarf bei der CO_2-Elektrolyse besteht. Die Elektrobiosynthese ist derzeit noch weitgehend im Bereich der Grundlagenforschung angesiedelt.

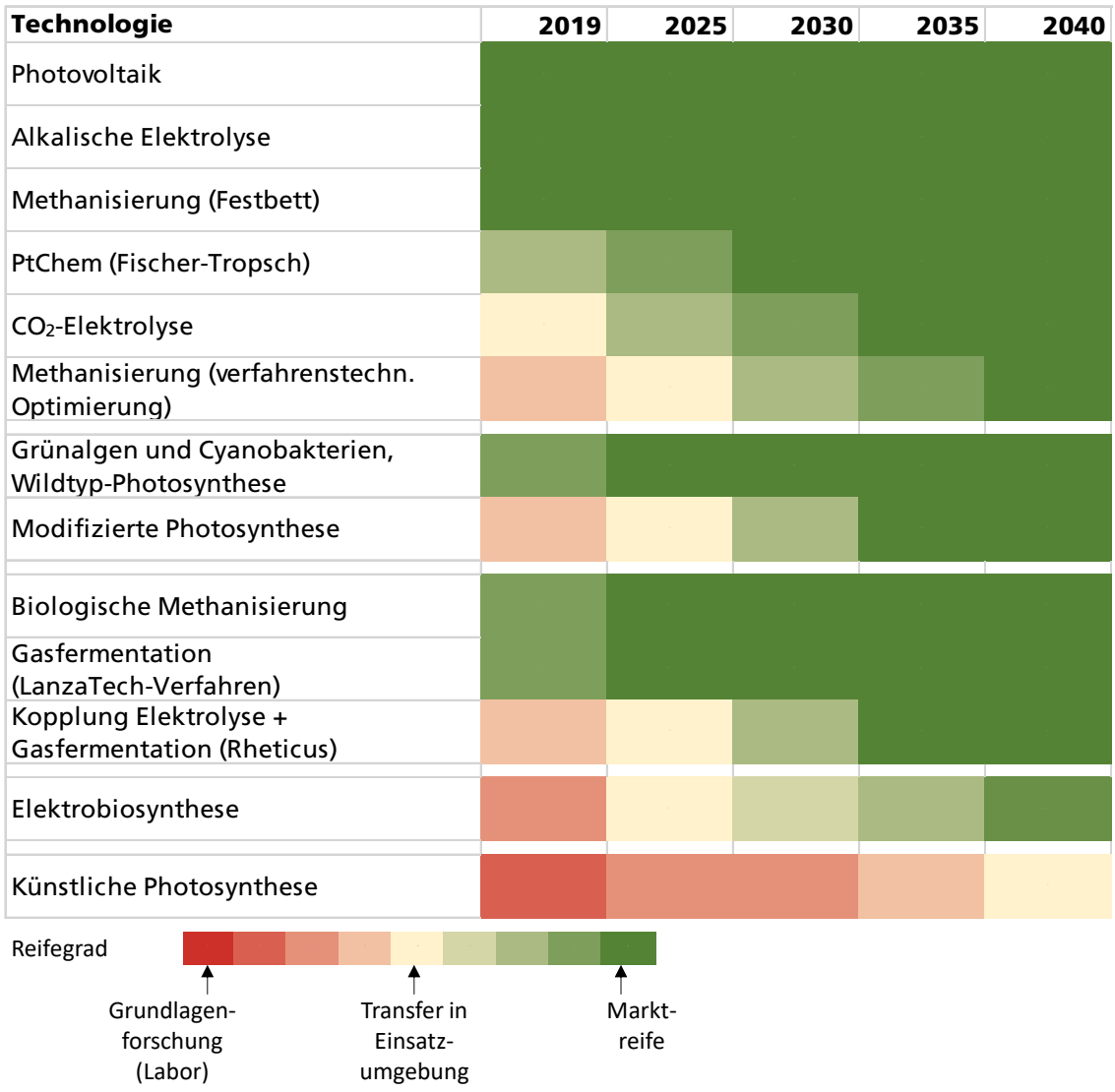


Abbildung 7: Bewertung der technologischen Reife für ausgewählte biotechnische und nicht-biotechnische Technologien zur CO_2-Nutzung sowie relevante *enabling technologies*

Die Entwicklung der ergänzenden Technologien, insbesondere Photovoltaik-Technologie und Wasserelektrolyse ist so weit fortgeschritten, dass deren Verfügbarkeit voraussichtlich keine Limitierung für den Einsatz der biotechnischen Verfahren darstellen wird. Die CO_2-Elektrolyse befindet sich noch im Forschungsstadium, aufgrund des großen Engagements verschiedener industrieller Akteure (Siemens, Sunfire) ist jedoch davon auszugehen, dass die notwendigen Technologien mittelfristig verfügbar sein werden.

Ebenso wie die biotechnischen Verfahren weisen auch die physikalisch-chemischen Power-to-X-Verfahren eine hohe Streuung hinsichtlich ihrer technologischen Reife auf. Insgesamt ist das Power-to-X-Forschungsfeld jedoch als weiterentwickelt einzustufen (Kap. 9.3) (Bringezu et al. 2020), nicht zuletzt aufgrund der entsprechenden Förderprogramme in den letzten Jahren.

9.2.3 Multikriterielle Bewertung der biotechnischen Verfahren untereinander

Für die vergleichende Bewertung der biotechnischen Verfahren untereinander wurden verschiedene Kriterien herangezogen, die sich in vier übergeordnete Kategorien zusammenfassen lassen:

- Bewertung auf Basis theoretischer Werte aus der Literatur
- Stand und Perspektiven von Forschung und Entwicklung
- Eignung für einen industriellen Einsatz
- Stand und Perspektiven hinsichtlich der industriellen Nutzung

Die Bewertung der einzelnen Technologien erfolgte insofern möglich quantitativ auf Basis verfügbarer Daten, in der Regel jedoch qualitativ auf Basis der im Rahmen der Erhebungen gewonnenen Erkenntnisse. Für einen Vergleich wurde den biotechnischen Verfahren auch noch die landwirtschaftliche Agrarproduktion gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 zusammengefasst.

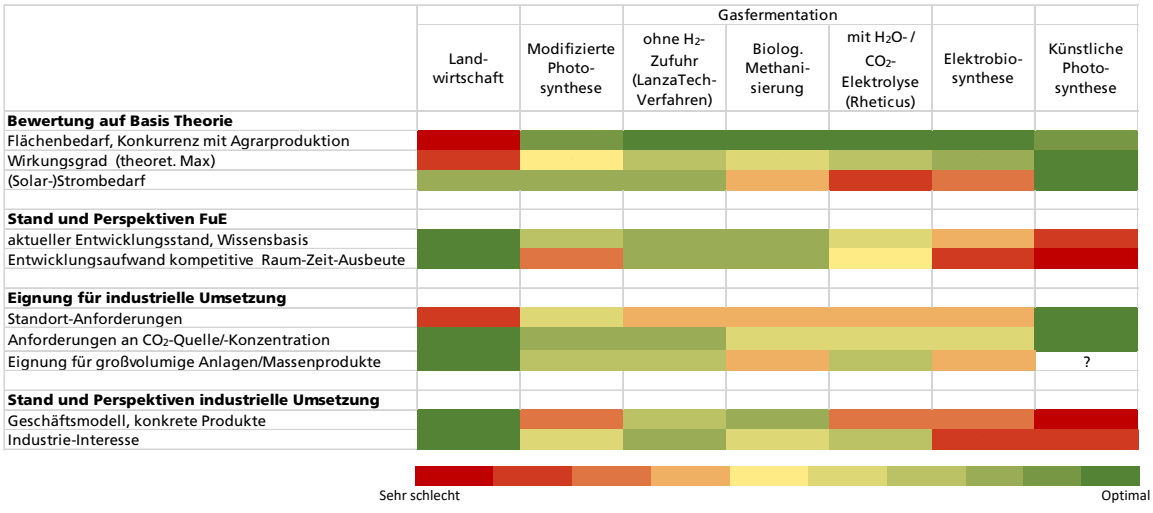


Abbildung 8: Multikriterielle vergleichenden Bewertung der biotechnischen Verfahren

9.2.3.1 Bewertung auf Basis theoretischer Werte aus der Literatur

Diese Kategorie umfasst die Kriterien: „Flächenbedarf und Flächenkonkurrenz mit Agrarproduktion“, „maximaler theoretischer Wirkungsgrad“ sowie „Energie- bzw. Strombedarf“ (Abbildung 8).

Sämtliche betrachteten biotechnologischen Verfahren haben gegenüber dem landwirtschaftlichen Nutzpflanzenanbau den Vorteil, dass sie nicht unmittelbar mit der Agarproduktion um Flächen konkurrieren. Zumindest prinzipiell können Flächen genutzt werden, die für eine landwirtschaftliche Produktion nicht geeignet sind. Aufgrund des geringen Wirkungsgrad der natürlichen Photosynthese (Tabelle 5) ist davon auszugehen, dass mit allen Verfahren bessere Lichtausbeuten und Wirkungsgrade zu erreichen sind, wobei hochintegrierte Verfahren in der Theorie besser abschneiden als gekoppelte Verfahren, da sich weniger Verluste durch Schnittstellen ergeben. Naturgemäß verbrauchen alle Verfahren, die einen elektrolytischen Schritt umfassen, Strom. Diesbezüglich schneiden die natürliche und die künstliche Photosynthese besonders vorteilhaft ab, da sie nicht (oder nur im sehr geringem Maße) auf Hilfsstrom angewiesen sind. Gleiches gilt für das LanzaTech-Verfahren, wobei diese Verfahren jedoch die notwendige Energie in Form von H_2 und CO aus Abgasstrom gewinnt, d. h. es handelt sich um ungenutzte Energie fossilen Ursprungs.

Bei der Betrachtung der Wirkungsgrade ist zu berücksichtigen, dass es noch sorgfältiger Analysen und Berechnungen bedarf, wie der Wirkungsgrad von biotechnischen Verfahren für die Konversion der Solarenergie in das jeweilige Zielprodukt zu beziffern ist, wenn das Endprodukt kein Energieträger, sondern eine stofflich zu nutzende Chemikalie ist. Dies konnte im Rahmen dieser Studie nicht geleistet werden.

9.2.3.2 Stand und Perspektiven von Forschung und Entwicklung

Diese Bewertungskategorie reflektiert den aktuellen Stand von Forschung und Entwicklung, das Vorhandensein einer Wissensbasis sowie den voraussichtlich notwendigen Entwicklungsaufwand, um kompetitive Raum-Zeit-Ausbeuten für die jeweiligen Verfahren zu erreichen. Hier schneidet die etablierte und technologisch ausgereifte Landwirtschaft deutlich besser ab als neue Verfahren. Im Vergleich untereinander sind das LanzaTech-Verfahren und die biologische Methanisierung als marktreife Verfahren als weit entwickelt einzustufen. Dem gegenüber sind für Gasfermentationen, gekoppelt mit Elektrolysen, und für die Elektrobiosynthese noch ein erheblicher Entwicklungsaufwand für kompetitive Prozesse erforderlich. Zudem muss die Wissensbasis über die zugrundeliegenden Mechanismen und Stoffwechselprozesse, teilweise auch das molekularbiologische Werkzeug für die gezielte Modifikation der Mikroorganismen noch erweitert

werden. Die künstliche Photosynthese, verstanden als voll integriertes biomimetisches System, befindet sich dahingegen noch in einem frühen Forschungsstadium.

9.2.3.3 Eignung für einen industriellen Einsatz

Diese Kategorie umfasst die Kriterien „Spezielle Anforderungen, die an einen geeigneten Standort zu stellen sind“ (z. B. Eignung für landwirtschaftliche Nutzung, Verfügbarkeit spezieller Infrastrukturen (z. B. CO_2-Punktquelle; Infrastruktur für Versorgung mit Solarstrom und Wasserstoff)), Anforderungen an die CO_2-Quelle (z. B. CO_2-Konzentration und -Reinheit, Abwesenheit von toxischen Substanzen) sowie die Eignung des Verfahrens für großvolumige Anlagen und Massenproduktion.

Alle Verfahren, die nicht direkt atmosphärisches CO_2 nutzen, weisen spezifische Anforderungen an ihren Standort auf, da sie in der Regel für den Einsatz an einer gegebenen CO_2-Punktquelle (z. B. Kraftwerkabgase, Biogasanlage) entwickelt sind. Entsprechend kommt der Betrieb nur an Standorten in Frage, wo die entsprechende Quelle vorhanden ist. Während dies die Wahl der möglichen Standorte einschränkt, ist jedoch gleichzeitig davon auszugehen, dass es sich dabei jeweils um industriell erschlossene Standorte handelt, an denen bereits die notwendigen Voraussetzungen für den Betrieb (z. B. Anschluss an Gas- und Stromnetz) gegeben sind bzw. leicht hergestellt werden können. Landwirtschaftlicher Pflanzenanbau stellt dagegen hohe Anforderungen an den Standort in Bezug auf Bodenqualität, Wasserversorgung, Klima etc. Am besten wären hier die Verfahren der künstlichen und modifizierten Photosynthese einzustufen, die – zumindest theoretisch – keine spezifischen Infrastrukturen benötigen, und auch abseits von industrialisierten Gebieten betrieben werden könnten. Hinsichtlich der Anforderungen an die CO_2-Quellen sind diejenigen Verfahren, die atmosphärisches CO_2 nutzen, also die natürliche, die modifizierte und die künstliche Photosynthese am besten einzustufen. Einschränkend ist jedoch zu beachten, dass derzeit höhere Wirkungsgrade und Produktivitäten mit Grünalgen und Cyanobakterien wohl nur bei Begasung mit konzentrierten CO_2-Strömen zu erreichen sind; langfristig könnten CO_2-Konzentrierungsmechanismen in diese Organismen eingebaut werden.

Von hoher Relevanz für einen industriellen Einsatz ist die Eignung für großvolumige Produktion. Für das LanzaTech-Verfahren wurde bereits durch entsprechende Anlagen nachgewiesen, dass es im industrie-relevanten Maßstab umsetzbar ist. Für andere biotechnologische Verfahren bestehen jedoch noch Einschränkungen: so müssen die mit einer Elektrolyse gekoppelte Gasfermentation (Rheticus-Verfahren) sowie die Gasfermentation zunächst noch in industrie-relevante Maßstäbe überführt werden. Im Fall der

biologischen Methanisierung ist der Maßstab in der Regel durch die Größe der Biogasanlage limitiert, sodass nur ein dezentraler Betrieb von Anlagen in kleinerem und mittleren Maßstab möglich ist.

9.2.3.4 Stand und Perspektiven hinsichtlich der industriellen Nutzung

Diese Kategorie umfasst die Kriterien „Geschäftsmodell und Definition konkreter Produkte“ und „Industrie-Interesse“. Hier ist insbesondere das LanzaTech-Verfahren hervorzuheben, da dieses zwar nur in einer spezifischen Nische zur Anwendung kommt, aber in diesem Bereich bereits ein konkretes Geschäftsmodell und entsprechende Produkte definiert sind. Gleiches gilt für die biologische Methanisierung. Im Gegensatz dazu wird Verfahren, die sich in frühen Entwicklungsphasen befinden, wie die Elektrobiosynthese oder der künstlichen Photosynthese, zwar ein großes Spektrum an potenziellen Produkten zugeschrieben, deren Konkretisierung steht jedoch noch aus.

In Bezug auf das Industrieinteresse ist zu betonen, dass zum einen die Planungshorizonte der Unternehmen häufig unter den Zeiträumen liegen, die für die Weiterentwicklung der Verfahren erforderlich sind. Zum anderen lassen sich unter den derzeitigen Rahmenbedingungen CO_2-Minderungsziele und wirtschaftliche Ziele wie Return on investment mit anderen Optionen voraussichtlich eher erreichen als mit biotechnischen Verfahren.

9.2.3.5 Fazit der multikriteriellen vergleichenden Bewertung

Die betrachteten Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Entwicklungsstandes und weisen jeweils spezifische prinzipielle oder auch empirisch nachgewiesene Stärken und Schwächen auf, die sich für spezifische Einsatzkontexte bzw. Anwendungen ergeben. Ein „klarer Favorit“ kann aufgrund dieser Datenlage nicht benannt werden.

9.3 Biotechnische Verfahren im Vergleich mit physikalisch-chemischen Verfahren

Ungeachtet der Bewertung der einzelnen Technologien, wie sie im vorangegangenen Kapitel vorgenommen wurden, stehen biotechnische Verfahren auch in ihrer Gesamtheit in Konkurrenz mit physikalisch-chemischen Verfahren. Aufgrund der großen Heterogenität der biotechnischen Verfahren wurde diese in zwei Gruppen zusammengefasst, nämlich die „Modifizierte Photosynthese“ sowie die „Hybriden Bioverfahren“, wobei letztere Gasfermentation und Elektrobiosynthese umfasst. Um relative Stärken und Schwächen und relevante Einsatzoptionen zu identifizieren, wurden diese beiden Gruppen den Power-to-X-Verfahren in ihrer Gesamtheit (als Referenz für physikalisch-

chemische Verfahren) in einem multikriteriellen Ansatz gegenübergestellt und vergleichend bewertet (Abbildung 9). Es wurden dieselben Kriterien herangezogen wie zur Bewertung der biotechnologischen Verfahren untereinander (Kap. 9.2). Die Kategorie „Stand und Perspektiven für die industrielle Umsetzung“ wurde um die Kriterien „Herstellung einfacher C-Verbindungen“; „Herstellung langkettiger, funktionalisierter C-Verbindungen“ und „Gesellschaftliche Akzeptanz“ ergänzt.

In der Gesamtbetrachtung ergibt sich wiederum ein sehr gemischtes Bild (Abbildung 9): Die photosynthetischen Verfahren sind auf theoretischer Basis in vielen Bereichen den anderen Verfahren überlegen einzustufen (z. B. Bedarf an Prozessenergie, geringe Abhängigkeit von speziellen Standortbedingungen und geringere Anforderungen an den Anlagenstandort, Synthese langkettiger funktionalisierter Kohlenstoffverbindungen als Produkte). Kritisch zu bewerten ist zum einen das Industrieinteresse, das vor allem wegen des geringen Bekanntheitsgrades der Verfahren, des erforderlichen langen Entwicklungszeitraums, der den Planungshorizont der Unternehmen häufig übersteigt, der Favorisierung alternativer Optionen, sowie wegen geringen Handlungsdrucks bzw. fehlender Marktperspektiven unter den herrschenden bzw. absehbaren Rahmenbedingungen derzeit gering ist. Zum anderen kann voraussichtlich nicht ohne weiteres von gesellschaftlicher Akzeptanz von biotechnischen Verfahren mit gentechnisch veränderte Organismen ausgegangen werden, auch wenn die Verfahren in geschlossenen Systemen ablaufen.

Power-to-X-Verfahren sind derzeit noch hinsichtlich ihres Produktspektrums limitiert, da vor allem einfache C_1- und C_2-Verbindungen synthetisiert werden können. Insbesondere in Hinblick auf die Synthese von langkettigen und funktionalisierten Kohlenstoffverbindungen sind biotechnologische Verfahren als überlegen einzustufen. Bislang ist das Industrie-Engagement im Power-to-X-Bereich deutlich höher als für biotechnologische Verfahren, wobei das Rheticus-Projekt ein erstes Beispiel liefert, dass es sich nicht um eine grundlegende Ablehnung von biotechnologischen Verfahren handelt, sondern die Gründe für das geringe Industrie-Engagement vielmehr dem geringen Bekanntheitsgrad der Verfahren und der geringen Zahl von Erfolgsbeispielen zuzuschreiben sein dürfte.

Ein weiterer Vorteil, den biotechnologische Verfahren zumindest prinzipiell für sich beanspruchen können, besteht darin, dass ihnen eine höhere Robustheit und Toleranz gegenüber variablen Zusammensetzungen der CO_2-Quelle und möglichen Kontaminationen (z. B. Katalysatorgiften) zugeschrieben wird als chemischen Katalysatoren. Sie sind in der Lage, sich in gewissem Maße selbst zu regenerieren, und sind in geringerem Maße auf seltene Rohstoffe angewiesen.

		Modifizierte Photo-synthese	Hybride Bio-Verfahren	PtX
Bewertung auf Basis Theorie				
Effizienz (theoret. Maximum)		-1	0	0
Prozessenergiebedarf (Strom, H_2, Aufbereitung)		1	-1	-1
Abhängigkeit von seltenen Rohstoffen		1	0	0
Stand und Perspektiven FuE				
erforderlicher Entwicklungsaufwand bis TRL9		0	0	1
Entwicklungsaufwand kompetitive Raum-Zeit-Ausbeute		-1	-1	0
Eignung für industrielle Umsetzung				
Abhängigkeit von spez. Standortbedingungen		1	-1	-1
Anforderungen an CO_2-Quelle/-Konzentration		1	0	-1
Eignung für großvolumige Anlagen/Massenprodukte		0	0	1
Stand und Perspektiven industrielle Umsetzung				
Herstellung einfache C-Verbindungen		-1	1	1
Herstellung langkettige, funktionalisierte C-Verbindungen		1	1	-1
Industrie-Interesse		-1	0	1
Gesellschaftliche Akzeptanz		-1	-1	0
Legende				
-1	schneidet im Technologievergleich schlechter ab als gelb; Schwäche der Technologie			
0	mittleres Niveau erreicht, aber verbesserungsbedürftig			
1	Schneidet im Technologievergleich besser ab als gelb; Stärke der Technologie			

Abbildung 9: Vergleichende Bewertung biotechnischer und physikalisch-chemischer Ansätze zur CO_2-Nutzung

9.4 Schlussfolgerungen aus dem multikriteriellen Technologievergleich

Ein breites Spektrum an biotechnologischen Ansätzen für die stoffliche Nutzung von CO_2 ist Gegenstand von Forschung und Entwicklung und birgt das Potenzial, zur CO_2-Nutzung und zum CO_2-Recycling im industriellen Maßstab beitragen zu können.

Die im Rahmen dieser Studie untersuchten biotechnischen Technologien sowie als Referenz herangezogenen physikalisch-chemischen Technologien (mit Fokus auf Power-to-X) haben jeweils spezifische Stärken und Schwächen, welchen je nach Anwendungskontext ein unterschiedliches Gewicht beizumessen ist. Aktuell befinden sich die meisten biotechnischen Ansätze noch in der Phase von Forschung und Entwicklung, und es fehlt an empirischen Daten zu ihrem Einsatz außerhalb hochkontrollierter Laborbedingungen. Die hier vorgenommenen Bewertungen beruhen deshalb weitgehend auf Postulaten und Laborwerten. Aufgrund vielfältiger Unwägbarkeiten und Einflüsse (z. B. Temperaturschwankungen, Variationen der Zusammensetzung und Verfügbarkeit der CO_2-Input-Ströme, störende Prozesskomponenten) lässt sich jedoch kaum vorhersagen, inwiefern vielversprechende Technologien ihr Potenzial unter realen Bedingungen und im Wettbewerb mit alternativen Optionen entfalten können. Daher ist es zum einen erforderlich, die Technologien möglichst rasch „raus aus dem Labor“ zu bringen, um diese

empirischen Daten generieren zu können. Zum anderen ist eine regelmäßige Fortschreibung und erneute kritische Überprüfung der in dieser Studie vorgenommenen Einschätzungen und Bewertungen im Lichte neuer Erkenntnisse und geänderter Rahmenbedingungen notwendig.

Vorteile der in dieser Studie analysierten biotechnischen Verfahren mit photoautrophen Mikroorganismen zur CO_2-Nutzung sind – im Vergleich zur CO_2-Nutzung durch landwirtschaftliche Nutzpflanzen – höhere flächenbezogene Wirkungsgrade und Erträge, und es können (bzw. müssen) Flächen genutzt werden, die für die Landwirtschaft nicht geeignet sind.

Auch im Vergleich zu etablierten, industriell relevanten biotechnischen Fermentationsverfahren mit heterotrophen Organismen liegen die Vorteile der Verwendung autotropher Mikroorganismen vor allem in der deutlichen Verkürzung von Prozessketten für die Synthese der industriellen Zielprodukte: CO_2 wird direkt als Kohlenstoffquelle für Produktsynthesen genutzt, ohne den „Umweg“ über den Aufbau von pflanzlicher Biomasse (und ggf. daraus gewonnener Substrate, z. B. Glucose) gehen zu müssen, die als Kohlenstoff- und Energiequelle in die Produktionsprozesse mit heterotrophen Mikroorganismen benötigt wird.

Die Unabhängigkeit von landwirtschaftlichen Nutzflächen stellt einen wichtigen Vorteil dar, um CO_2-neutrale industrielle Produktionen zu ermöglichen und zugleich der Lebens- und Futtermittelproduktion Vorrang einräumen zu können. Gleichzeitig ist ergeben sich jedoch neue Konkurrenzen, insbesondere für die hybriden Verfahren, die auf Strom aus regenerativen Quellen angewiesen sind. Die Bereitstellung von Strom über Photovoltaik kann wiederum zu Flächenkonkurrenzen führen, wobei Solarenergie auch an Standorten gewonnen werden kann, die nicht landwirtschaftlich genutzt werden können.

Im direkten technologischen Vergleich weisen biotechnologische und die physikalisch-chemischen Power-to-X-Verfahren zur CO_2-Nutzung deutliche Komplementaritäten auf. In der Theorie bestechen die modifizierte (und künstliche) Photosynthese durch die direkte Solarenergiewandlung ohne den Umweg über Photovoltaik und Elektrolyse und ihr Potenzial zur Nutzung von atmosphärischem CO_2. Inwieweit modifizierte Photosynthese perspektivisch eine Alternative zu Direct-Air-Capture-Verfahren darstellen könnte, müsste näher untersucht werden. Weitere Vorteile der biotechnologischen Verfahren sind darin zu sehen, dass sie im Vergleich zu rein technischen Power-to-X-Verfahren in einem geringeren Maße von seltenen Rohstoffen abhängig sind. Sie haben tendenziell eine größere Toleranz gegenüber qualitativen und quantitativen Schwankungen in Abgasströmen und gegenüber Verunreinigungen, nicht zuletzt, weil viele biologische

Systeme in einem gewissen Umfang zur Selbstreparatur fähig sind. Dies ist bei chemischen Katalysatoren nicht der Fall.

Deutliche Komplementaritäten von Power-to-X einerseits und biotechnologischen Verfahren zur CO_2-Nutzung andererseits bestehen in Bezug auf das Spektrum der Zielprodukte. Derzeit fokussiert die Power-to-X-Forschung stark auf den Energiesektor, also Fragen der Energienutzung und -speicherung, und forscht vorrangig daran, einfache organische Verbindungen wie Methan als chemische Energieträger und Kraftstoffe bereitzustellen. Dies ist zwar grundsätzlich auch mit biotechnologischen Verfahren möglich, jedoch spielen hier die biotechnologischen Verfahren ihre eigentliche Stärke nicht aus, dass nämlich durch sie vergleichsweise einfach langkettige und hoch funktionalisierte Moleküle bereitgestellt werden können. In Bezug auf das Produktspektrum könnten sich somit biotechnische und physikalisch-chemische Power-to-X-Verfahren synergistisch ergänzen und das Spektrum in Richtung höherwertiger Moleküle erweitert werden.

Den derzeit verfügbaren biotechnischen Optionen zur CO_2-Nutzung und zum CO_2-Recycling dürfte langfristig unterschiedliche Bedeutung beizumessen sein:

- Für Technologien, die bereits einen verhältnismäßig hohen Reifegrad erreicht haben und für die bereits kommerziell betriebene Anlagen installiert sind (z. B. Gasfermentation ohne H_2-Zufuhr (LanzaTech-Verfahren, Kap. 7.1.2.1) und biologische Methanisierung, Kap. 7.3) ist festzuhalten, dass spezifische Nischen bereits erfolgreich bedient werden. Ihr Beitrag zur Erreichung von Klimazielen ist derzeit gering, und möglicherweise stehen die CO_2-Punktquellen, für die sie entwickelt sind, in Abhängigkeit von den klimapolitischen Rahmenbedingungen künftig nur noch in eingeschränktem Maße zur Verfügung. Bis dahin können sie aber als Brückentechnologien die CO_2-Emissionsbilanzen von Verfahren verbessern, die mittelfristig noch auf fossilen Rohstoffen beruhen bzw. bei denen die CO_2-Emissionen nicht anders verringert werden können. Zudem können mit diesen Technologien erste Erfahrungen für industrielle Implementierungen gesammelt werden. Außerdem tragen sie dazu bei, die Bekanntheit und Akzeptanz für biotechnologische Verfahren zu erhöhen und sie können so als Einstieg, Türöffner und Positivbeispiel für weitere Aktivitäten fungieren.
- Für Technologien, für die bislang im Labormaßstab ein Machbarkeitsnachweis erbracht wurde (z. B. modifizierte Photosynthese, hybride Verfahren der Gasfermentation gekoppelt mit Elektrolyse; Elektrobiosynthese) erscheint der Aufbau von industriellen Demonstrationsanlagen, bei denen CO_2 aus industriellen Punktquellen recycelt wird, in einem Zeitraum von 8-10 Jahren erreichbar. Dabei gilt es besonders höherwertige, d. h. längerkettige funktionalisierte organische Moleküle als Zielprodukte zu adressieren, um eine hohe Wertschöpfung zu erreichen, eine Vielzahl von Anwendungen jenseits des Energiesektors zu erschließen und die spezifischen Stärken der biotechnischen Synthese zu nutzen.

- Perspektivisch haben einige biotechnische Verfahren, insbesondere die modifizierte Photosynthese oder auch der Einsatz der Carboanhydrase, das Potenzial, atmosphärisches CO_2 bei geringerem Energieaufwand als derzeitige Direct-Air-Capture-Verfahren nutzen zu können. Möglicherweise könnten damit CO_2-neutrale oder sogar CO_2-negative Prozesse mit hohem Wirkungsgrad realisiert werden, allerdings nur langfristig.

Technologieübergreifend besteht bei den biotechnologischen Verfahren neben grundlegendem Forschungsbedarf insbesondere die Notwendigkeit, zusätzlich anwendungs- und industrierelevante Fragestellungen aufzugreifen, um das Potenzial der Verfahren besser einschätzen zu können, und um industrierelevante Produkte und Prozesse zu entwickeln. Zu den Fragestellungen gehören beispielsweise die Robustheit der Prozesse unter Praxisbedingungen und deren Eignung auch bei variablen Zusammensetzungen der CO_2-Feedströme. Hierfür müssen verschiedene Fachdisziplinen noch stärker vernetzt werden, insbesondere die Expertise aus lebenswissenschaftlichen und ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen (Verfahrenstechnik, Apparate- und Anlagenbau), da sie für die technische Realisierung und industrielle Umsetzung essentiell sind.

Wie anhand des Rheticus-Projekts deutlich wird, ist selbst dann, wenn reife Einzeltechnologien bereitstehen, für die Integration der einzelnen Module in einen stabilen Gesamtprozess noch erheblicher Entwicklungsaufwand zu leisten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass angesichts der großen Herausforderungen durch den Klimawandel und die Notwendigkeit zum Umbau der Industrieproduktion zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft ein breites Spektrum an Technologien zur Verfügung stehen muss, um Lösungen für sehr unterschiedliche Anforderungen bereitstellen zu können. Biotechnische Verfahren könnten das Spektrum der CCU-Technologien sinnvoll ergänzen und erweitern. Angesichts der erforderlichen FuE- und Vorlaufzeiten müssen CCU-Technologien unverzüglich entwickelt werden, um die gesteckten Klimaziele erreichen zu können. Der derzeitige, wenige Jahre betragende FuE-Rückstand der biotechnologischen Verfahren im Vergleich mit Power-to-X-Verfahren erscheint aufholbar. Angesichts der Komplementaritäten der biotechnischen Verfahren einerseits und der Power-to-X-Verfahren andererseits erschiene es zum jetzigen Zeitpunkt verfrüht, bereits auf Optionen zu verzichten, nur weil deren prinzipielle Vorteile noch nicht empirisch gesichert sind. Daher sollten beide Ansätze, biotechnologische Verfahren und physikalisch-chemische Verfahren, angesichts der großen Herausforderungen durch den Klimawandel und die Notwendigkeit zum Umbau der Industrieproduktion weiterverfolgt werden, wobei Anknüpfungspunkte, Synergien und Komplementaritäten weiter aktiv auszuloten und auszuschöpfen sind.

10 Potenziale für und in Baden-Württemberg

In diesem Kapitel werden Potenziale der biotechnischen und bioinspirierten CO_2-Nutzung für und in Baden-Württemberg aufgezeigt, indem eine Bewertung der Stärken, Chancen, Schwächen und Risiken für Baden-Württemberg vorgenommen wird.

Für diese Bewertung wird eine Wertschöpfungsketten- bzw. Wertschöpfungsnetze-Perspektive eingenommen. Sie deckt die Stufen Forschung und Entwicklung (Kap. 10.1), Pilot- und Demonstrationsanlagen (Kap. 10.2) sowie industrielle Implementierung (Kap. 10.3) ab. Zudem werden die Rahmenbedingungen berücksichtigt, die durch Strategien und Aktionspläne des Landes Baden-Württemberg gesetzt werden (Kap. 10.4). Für die genannten Stufen der Wertschöpfungsnetze werden die Akteure bzw. Akteursgruppen in Baden-Württemberg, die bereits im Technologiefeld aktiv sind oder potenziell aktiv werden könnten, jeweils anhand einer Stärken-Schwächen-Chancen-Risiken-Matrix charakterisiert. Zur Einordnung in einen größeren Kontext wird ein Überblick über öffentlich finanzierte Fördermaßnahmen zur CO_2-Nutzung gegeben (Kap. 10.5)

Abschließend werden diese Bewertungen zu einer Gesamt-Stärken-Schwächen-Chancen-Risiken-Matrix für Baden-Württemberg zusammengeführt (Kap. 0). Leitfragen für die Bewertung sind

- Inwieweit sind die FuE-Kompetenzen im Land Baden-Württemberg gut aufgestellt, um das Technologiefeld und einzelne Technologien zu erforschen und weiter auszubauen?
- Bieten sich Pilot-, Demonstrations- oder großtechnische Vorhaben an, die den Stärken und der Akteurslandschaft in Baden-Württemberg Rechnung tragen?
- Inwieweit sind die Technologien passfähig zu industriellen Prozess- und Wertschöpfungsketten im Land Baden-Württemberg?
- Inwieweit tragen Aktivitäten im Technologiefeld zum Erreichen von Nachhaltigkeitszielen bei, die in Strategien und Aktionsplänen des Landes formuliert wurden?

10.1 Forschung und Entwicklung

Für die erfolgreiche Erforschung und Entwicklung der modifizierten Photosynthese, der Gasfermentation sowie der Elektrobiosynthesen sind Forschungserfahrungen mit den entsprechenden Mikroorganismengruppen erforderlich und die Beherrschung der gängigen Methoden zur Entwicklung und Optimierung sowohl von Modellorganismen als auch industriell nutzbarer Produktionsstämme. Für anwendungsorientierte FuE-Arbeiten ist die enge Verzahnung der Stammentwicklung mit der Bioprozessentwicklung und deren aufeinander abgestimmte Entwicklung erforderlich.

Da die hybriden Verfahren auf Verfahrensmodulen der Photovoltaik und Elektrolyse aufbauen, die auch für Power-to-X-Verfahren eingesetzt werden, müssen spätestens bei den FuE-Schritten, bei denen die einzelnen Prozessmodule zu einem Gesamtprozess bzw. Gesamtsystem miteinander integriert werden, auch diese Kompetenzen in die Vorhaben explizit eingebunden werden.

Tabelle 6: Erforderliche Kompetenzen für die erfolgreiche Erforschung und Entwicklung von biotechnischen und bioinspirierten Verfahren zur CO_2-Nutzung

Kompetenzen	
Erforschung relevanter Organismengruppen und Stoffwechselwege	Mikroalgen, Cyanobakterien, Photosynthese
	Archaebakterien, Methan-/Biogassynthese
	Mikroorganismen für Gasfermentationen, Acetogene, CO_2-Fixierungswege
	Mikroorganismen für Elektrobiosynthese
Methoden zur Produktionsstammentwicklung und -optimierung in den relevanten Organismengruppen	Screening nach neuen Organismen und Enzymen Produktionsstammentwicklung durch *metabolic engineering*, Protein-Engineering, Systembiologie, Synthetische Biologie, Bioinformatik
Bioverfahrens- und Bioprozesstechnik	Photobioreaktoren, Gasfermentationsbioreaktoren, Elektrobiosynthesebioreaktoren Entwicklung, Optimierung, Mess-, Steuer- und Regelkonzepte entsprechender Bioprozesse
Photovoltaik	
Elektrolyse	H_2O-Elektrolyse, CO_2-Elektrolyse
Chemische Katalyse	
Produktabtrennung und -aufarbeitung (Downstream Processing)	

Tabelle 7 gibt eine Übersicht über die Stärken, Chancen, Schwächen und Risiken im Bereich Forschung und Entwicklung in Baden-Württemberg. Eine orientierende, keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebende Übersicht über FuE-Einrichtungen in Baden-Württemberg, die einschlägig tätig sind, ist Tabelle 16 zu entnehmen.

Tabelle 7: Stärken, Chancen, Schwächen und Risiken im Bereich FuE in Baden-Württemberg

Stärke	Chance	Schwäche	Risiko
Zahlreiche universitäre und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen und Hochschulen sowie einige KMU, die in der biotechnischen und lebenswissenschaftlichen Forschung exzellent sind und über die erforderlichen Kompetenzen (Organismen, Methoden, Verfahrensentwicklung) verfügen	Hohe Aufgeschlossenheit und Motivation gegenüber Bio-CCU Bereitschaft zur Bearbeitung anwendungsorientierter Forschungsthemen Bestehendes Wissen und Kompetenzen mobilisierbar und in interdisziplinärer Kooperation auf anwendungsorientierte Fragestellungen und auf Industrierelevanz ausrichtbar („raus aus dem Labor“) FuE zu biologischer Methanisierung und modifizierter Photosynthese können auf FuE-Aktivitäten zu Biogas und Mikroalgen[23] anknüpfen, die durch die Forschungsstrategie Bioökonomie initiiert wurden	Bio-CCU bislang nur in einzelnen Forschergruppen explizites Forschungsthema Bio-CCU in nationalen FuE-Förderprogrammen kein expliziter Schwerpunkt, nur punktuelle Förderung einzelner Projekte Fokus derzeit eher auf grundlagenorientierter, weniger anwendungsorientierter Forschung Erforderliche interdisziplinäre Bündelung der Einzelkompetenzen noch ausbaufähig	Verfügbarkeit mittel- und längerfristig wirksamer Anreize zur Erschließung des Bio-CCU-Themas durch die Kompetenzträger erforderlich Generationswechsel steht bei einigen Kompetenzträgern an Systemintegration wissenschaftlich-akademisch weniger attraktiv

23 https://biooekonomie-bw.uni-hohenheim.de/biogas-ziele; https://biooekonomie-bw.uni-hohenheim.de/mikroalgen-ziele

Fortsetzung Tabelle 7

Stärke	Chance	Schwäche	Risiko
Zahlreiche universitäre und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen, Hochschulen sowie einige KMU, die in der Energie- und Klimaforschung exzellent sind und über die erforderlichen Kompetenzen (Photovoltaik, Elektrolyse, Katalyse) verfügen BW-FuE-Akteure in nationalen Power-to-X-Förderprogrammen und in der Power-to-X-Community stark vertreten	Aktueller FuE-Fokus prinzipiell um Bio-CCU-Module ergänz-/komplementierbar	Aktueller FuE-Fokus auf chemischer Katalyse und synthetischen Kraftstoffen	Keine Ergänzung des aktuellen FuE-Fokus um Bio-CCU-Module, andere Schwerpunktsetzung wird favorisiert
Vergleichsweise hoher Organisations- und Vernetzungsgrad der Power-to-X-Community, hohe Sichtbarkeit	Zusammenführung von Bio-CCU-Akteuren und der Power-to-X-Community, Entwicklung eines gemeinsamen Verständnisses, Identifizierung von Chancen und Synergien	Eine „Bio-CCU-Community“ existiert weder national noch in BW Nur punktuelle Vernetzung von Bio-CCU-Akteuren mit Power-to-X-Community	

10.2 Überführung in den Demonstrations- und Pilotmaßstab

Während die in Kapitel 10.1 aufgeführten FuE-Aktivitäten im Labormaßstab durchgeführt werden können bzw. müssen, ist für eine letztlich angestrebte industrielle Implementierung der Verfahren eine Überführung in den Demonstrations- und Pilotmaßstab erforderlich. Dies beinhaltet zum einen eine Maßstabsvergrößerung, aber auch eine zunehmende Integration der verschiedenen Prozessmodule und ihre Abstimmung aufeinander, um das Gesamtsystem zu optimieren. Im Demonstrations- und Pilotmaßstab müssen zudem praxisrelevante Parameter getestet werden, z. B. Langzeitbetrieb unter Verwendung von realen Abgasen aus Industrieprozessen sowie fluktuierende Solarstrommengen.

Tabelle 8: Erforderliche Kompetenzen für das Scale-up sowie die Erprobung in Demonstrations- und Pilotanlagen

Kompetenzen	
Systemintegration und Prozessentwicklung	Integration der Prozessmodule zu einem Gesamtprozess und dessen Optimierung
Scale-up in Demonstrations- und Pilotmaßstab	Demonstrations- und Pilotanlagen

Tabelle 9: Stärken, Chancen, Schwächen und Risiken im Bereich Scale-up, Demonstrations- und Pilotanlagen in Baden-Württemberg

Stärke	Chance	Schwäche	Risiko
Demo- und Pilotvorhaben sind explizit als Maßnahmen im IEKK (M106) und in der Bioökonomiestrategie vorgesehen (M18, M20)	Für biologische Methanisierung, Hybride Verfahren (GF+Elektrolyse/Elektrobiosynthese), modifizierte Photosynthese Pilot-/ Demoreife bis 2030 erreichbar		Die Maßnahmen werden auf andere Demo- und Pilotvorhaben ausgerichtet, nicht auf Bio-CCU
Weiterentwicklung des Biogasanlagenbestandes ist explizit in der Bioökonomiestrategie vorgesehen (M16)			
Weltweit erste integrierte P2Liq-Versuchsanlage zur Synthese von Kraftstoffen am KIT (Fischer-Tropsch zu langkettigen Kraftstoffen)	Ergänzung um Bio-CCU als Option erscheint prinzipiell möglich; interdisziplinäre und einrichtungsübergreifende Kompetenzen und Anlagen bereits existierend mit Fokus P2Liq	Möglichkeiten zur synergistischen Ergänzung um Bio-CCU noch nicht ausgelotet	Vermutete Synergien ergeben sich nicht
Projekt Wasserstoff-Modellregion Südlicher Oberrhein zielt auf die Verknüpfung von Akteuren in der Wasserstoff- und in der Brennstoffzellentechnologie	Ergänzung um Bio-CCU als Option erscheint prinzipiell möglich	Möglichkeiten zur synergistischen Ergänzung um Bio-CCU noch nicht ausgelotet	Vermutete Synergien ergeben sich nicht

10.3 Industrielle Implementierung

Da das Ziel letztlich eine industrielle Implementierung dieser Verfahren ist, sind außerdem im Sinne einer Wertschöpfungskettenperspektive geeignete CO_2-Quellen zu berücksichtigen, Akteure, die entsprechende Anlagen bzw. ihre Komponenten entwerfen, bauen, ausrüsten und betreiben können, sowie Kunden, die entsprechende Produkte aus dem biotechnischen bzw. bioinspirierten CO_2-Recycling abnehmen können.

Industrien in Baden-Württemberg mit hohen CO_2-Emissionen sind fossil befeuerte Kraftwerke[24], Raffinerie, Zement-, Papier- und Glasindustrie sowie die Automobilindustrie (Schmidt et al. 2017; Tabelle 17). Auch biotechnische Fermentationsverfahren emittieren CO_2 und/oder Methan. Entsprechende Unternehmen gehören der Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie an, produzieren Biopharmazeutika[25] oder betreiben Biogasanlagen im Agrar- oder Entsorgungsbereich (z. B. Kläranlagen).

Relevant für biotechnische und bioinspirierte Verfahren zur CO_2-Nutzung ist außerdem der Maschinen- und Anlagenbau, der Komponenten, Module bzw. ganze Systeme bereitstellt, so z. B. Photovoltaik, Elektrolyseure, Bioreaktoren, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik, Chemie- und Biotechnologieanlagenbau. Baden-Württemberg weist besondere Stärken in der Automobilproduktion sowie den entsprechenden Zulieferbetrieben auf. In etwa 90 Unternehmen in Baden-Württemberg ist die Wasserstofftechnologie (z. B. Herstellung von Komponenten und Modulen für Elektrolyse, Wasserstoffspeicherung, Brennstoffzellen, Teilsystem- oder Systemintegration) ein Teil der Unternehmensaktivitäten (Weichenhain et al. 2020). Diese sind zwar meist auf die Nutzung von Wasserstoff im Mobilitätsbereich ausgerichtet. Hier könnten sich perspektivisch aber möglicherweise Synergien zur CO_2-Nutzung in der Industrie mithilfe von Wasserstoff ergeben Die Wasserstoff-Roadmap des Landes sieht mit Maßnahme 24 vor, sinnvolle Transformationspfade in der Industrie für eine klimaneutrale Produktion durch den Einsatz von grünem Wasserstoff auszuloten (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft 2020). Unternehmen, die Energieträger, Chemikalien oder Materialien als Produkte aus dem biotechnischen bzw. bioinspirierten CO_2-Recycling abnehmen könnten, finden sich beispielsweise in der chemischen Industrie, der Kunststoff verarbeitenden Industrie, aber auch in der Kosmetikindustrie[26].

---

24 So ist Baden-Württemberg das Bundesland mit der zweithöchsten installierten Steinkohlekraftwerksleistung (ca. 4,8 GW) mit großen, erst 2014/2015 in Betrieb genommenen Blöcken in Karlsruhe und Mannheim.

25 Biopharma Cluster South Germany; https://biopharmacluster.com

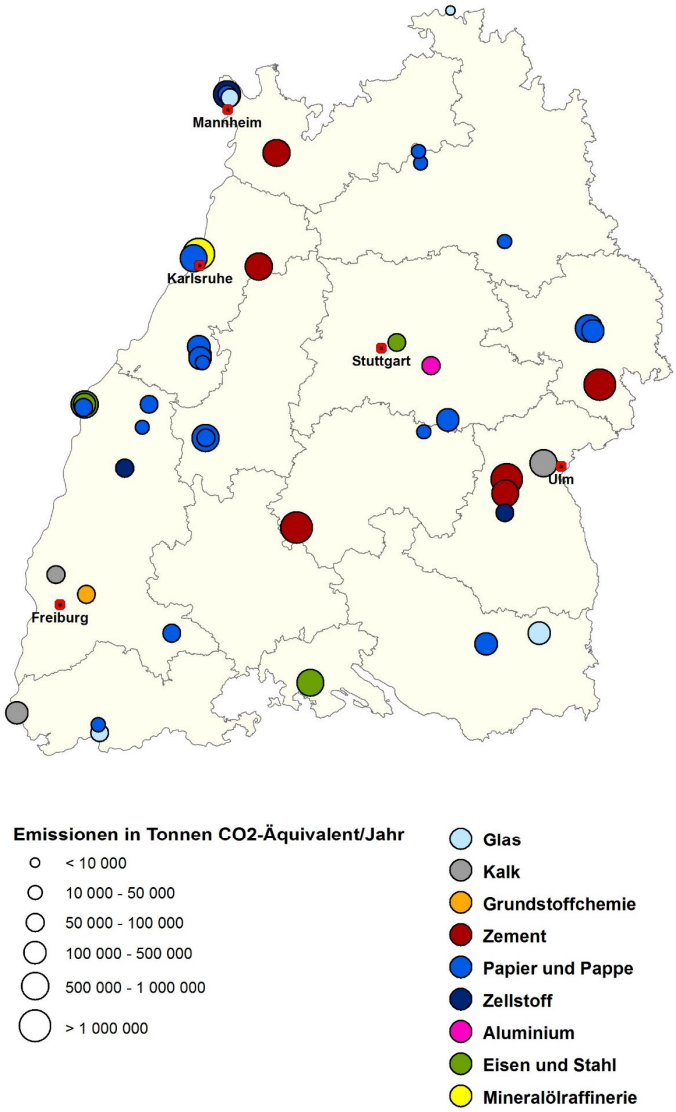
26 Evonik und Beiersdorf kooperieren in einem BMBF-geförderten Forschungsprojekt, um zu prüfen, inwieweit Produkte aus Evoniks Rheticus-Prozess für die Herstellung von Körperpflegeprodukten geeignet sind. Evonik-Presseinformation vom 12.5.2020; https://corporate.evonik.com/en/evonik-and-beiersdorf-engaging-in-joint-research-to-turn-carbon-dioxide-into-care-products-130476.html

Tabelle 10: Stärken, Chancen, Schwächen und Risiken im Bereich industrielle Implementierung in Baden-Württemberg

Stärke	Chance	Schwäche	Risiko
Baden-Württemberg als industriestarkes Land, Unternehmen mit relevanten Kompetenzen in oder potenziellem Interesse an Bio-CCU vorhanden	Handlungsdruck für CO_2-emittierende Industrien nimmt generell zu	Bei Unternehmen mit relevanten Kompetenzen in oder potenziellem Interesse an Bio-CCU ist Bio-CCU als Option kaum bekannt	Industrieinteresse an Bio-CCU ist noch nicht systematisch ausgelotet. Erste Hinweise auf geringes Industrieinteresse: Kurzfristig zu implementierende Ansätze zur Energieeinsparung, zur Decarbonisierung der Energienutzung werden bevorzugt
	CO_2-Recycling gewinnt mittelfristig an Bedeutung, insbesondere für die Chemie- und Fermentationsindustrie wegen der Unmöglichkeit der Decarbonisierung des Rohstoffs für organische Synthesen.	Bio-CCU ist noch nicht unmittelbar industriell einsetzbar.	Potenzielle industrielle Einsatzreife von Bio-CCU liegt möglicherweise jenseits des Planungshorizonts von Unternehmen
	Pilotanlagen zu CCU mit Mikroalgen aus Kraftwerks- und Zementwerksabgasen werden/wurden bereits von Unternehmen aus Baden-Württemberg betrieben		

Fortsetzung Tabelle 10

Stärke	Chance	Schwäche	Risiko
	In Unternehmen der für BW bedeutenden Automobilindustrie (OEMs und Zulieferer) ist Wasserstofftechnologie Teil der Unternehmensaktivitäten; Wasserstoffroadmap für Baden-Württemberg soll zur Zukunftsfestigkeit und Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit beitragen		Risiko, dass Fokus auf Mobilitätsanwendungen des Wasserstoffs liegt und industrielle Anwendungen von Wasserstoff zum CO_2-Recycling von geringem Stellenwert sind
	In der Bioökonomiestrategie vorgesehene Branchendialoge (Maßnahme 24) und Fachinitiativen (Maßnahme 26) als Foren, um Bio-CCU bekannt zu machen und Potenziale und Interessen auch in Unternehmen auszuloten		



Quelle: Schmidt et al. (2017)

Abbildung 10: CO_2-Emissionen einzelner Standorte der Grundstoffindustrie in Baden-Württemberg 2015

10.4 Landesstrategien und -aktionspläne

Für biotechnische und bioinspirierte Verfahren der CO_2-Fixierung und -Nutzung sind in Baden-Württemberg vor allem die Nachhaltigkeitsstrategie (Geschäftsstelle Nachhaltigkeitsstrategie 2014), die Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft und Ministerium für ländlichen Raum und Verbraucherschutz 2019) sowie das Integrierte Energie- und Klimaschutzkonzept (IEKK) relevant, das zum Zeitpunkt dieser Berichtserstellung nur als Entwurf für die Ressortabstimmung vorliegt (IEKK-Entwurf (Stand: 17.12.2019)). Diese Strategien werden im Folgenden kurz charakterisiert und darin enthaltende Maßnahmen aufgeführt, die die biotechnische und bioinspirierte CO_2-Nutzung direkt adressieren, einen Bezug dazu haben oder thematisch angrenzende Bereiche betreffen.

Nachhaltigkeitsstrategie

Baden-Württemberg verfolgt seit 2007 eine Nachhaltigkeitsstrategie, die 2011 neu ausgerichtet wurde ((Geschäftsstelle Nachhaltigkeitsstrategie 2014), S. 4).

Tabelle 11: Zur Umsetzung der Nachhaltigkeitsstrategie Baden-Württemberg formulierte Leitsätze einer nachhaltigen Entwicklung, zu denen biotechnische und bioinspirierte Verfahren der CO_2-Nutzung potenziell Beiträge leisten können

Nr.	Leitsatz nachhaltig handeln in Baden-Württemberg heißt...
II	Klimaschutz als Querschnittsaufgabe wahrzunehmen und umweltbezogene Gefahren infolge des Klimawandels zu minimieren
V	den Einsatz von Ressourcen zu optimieren und das Wirtschaftswachstum vom Verbrauch nicht erneuerbarer Ressourcen zu entkoppeln
I	die Energiewende zügig, sicher und bezahlbar unter Einbindung der Zivilgesellschaft umzusetzen
XI	eine leistungsfähige Wissenschaft und Forschung zu fördern, um Spitzenleistungen zu ermöglichen sowie Innovationen zu unterstützen
VII	den Wandel der Wirtschaft in Richtung Nachhaltigkeit in globaler Verantwortung unter Berücksichtigung der Interessen der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer und unter Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit sowie der Stärkung der Anpassungsfähigkeit voranzutreiben
VI	die Lebensgrundlagen und die vielfältige Natur sowie die einzigartigen Kulturlandschaften des Landes zu schützen und zu erhalten sowie Belastungen für Mensch, Natur und Umwelt auch über das Land hinaus möglichst gering zu halten

Quelle: Eigene Zusammenstellung von Leitsätzen aus Geschäftsstelle Nachhaltigkeitsstrategie (2018)

Sie zielt darauf ab, den Nachhaltigkeitsgedanken fest in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft zu verankern, damit Baden-Württemberg die Folgen des Klimawandels, die Verknappung der natürlichen Ressourcen, die ökologische und soziale Modernisierung der Wirtschaft und den demographischen Wandel bewältigt. Um Nachhaltigkeit zum zentralen Entscheidungskriterium von Regierungs- und Verwaltungshandeln zu machen, bilden 17 Leitsätze den Rahmen für die Umsetzung der Nachhaltigkeitsstrategie durch die Landesministerien (Geschäftsstelle Nachhaltigkeitsstrategie 2018). Biotechnisches und bioinspiriertes CO_2-Recycling leistet potenziell Beiträge zu 6 der 17 Leitsätze (Tabelle 11).

Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg

Die 2019 veröffentlichte Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft und Ministerium für ländlichen Raum und Verbraucherschutz 2019) orientiert sich an den Nachhaltigkeitsleitsätzen und -zielen des Landes und verfolgt vier Ziele:

- Ziel 1: Mit der Landesstrategie sollen mit innovativen biologischen Konzepten erneuerbare oder recycelfähige Rohstoffquellen erschlossen werden. Dadurch soll der Einsatz fossiler Rohstoffe signifikant gesenkt und die Abhängigkeit von Energie- und Rohstoffimporten dauerhaft verringert werden.
- Ziel 2: Die Landesstrategie soll zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen in Baden-Württemberg, zur Schonung natürlicher Ressourcen und zum Erhalt der Biodiversität beitragen.
- Ziel 3: Mit der Landesstrategie soll Baden-Württemberg zu einem Beispielland für eine Transformation hin zu einer nachhaltigen und kreislauforientierten Wirtschaftsform werden.
- Ziel 4: Mit der Landesstrategie sollen die ländlichen Räume in Baden-Württemberg gestärkt werden, indem die regionale Wertschöpfung durch innovative bioökonomische Lösungsansätze erhöht wird und attraktive zukunftsfähige Arbeitsplätze geschaffen werden.

Die biotechnische und bioinspirierte CO_2-Nutzung hat das Potenzial, zumindest zu den ersten drei Zielen, ggf. auch zum 4. Ziel beizutragen.

Innerhalb der Bioökonomiestrategie ist die biotechnische und bioinspirierte CO_2-Nutzung im Strang „Bioökonomie in urbanen und industriellen Räumen“ explizit als Maßnahme Nr. 20 „Bio-CO_2-Recycling“ vorgesehen. Weitere Maßnahmen (Tabelle 12) sind zwar nicht auf die biotechnische und bioinspirierte CO_2-Nutzung beschränkt. Sie könnten aber, sofern sie auf das biotechnische und bioinspirierte CO_2-Recycling ausgerichtet werden, die Entwicklung in Richtung industrieller Implementierung durch Pilot- und

Demonstrationsanlagen (Maßnahme 18) bzw. durch Implementierung der biologischen Methanisierung in Biogasanlagen (Maßnahme 16) weiter vorantreiben. Maßnahmen der Bioökonomiestrategie, die auf Information, Wissensaustausch und Netzwerkbildung abzielen, können ebenfalls die anwendungsorientierte Entwicklung von Verfahren des Bio-CO_2-Recyclings unterstützen (Maßnahmen 24, 26, 28, 29, 35; Tabelle 12). In Kapitel 11.3 werden Empfehlungen gegeben, wie ein Förderkonzept für die biotechnische und bioinspirierte CO_2-Nutzung unter Berücksichtigung dieser Maßnahmen ausgestaltet sein könnte.

Tabelle 12: Maßnahmen in der Landesstrategie „Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg“ mit engem bzw. potenziellem Bezug zur biotechnischen und bioinspirierten CO_2-Nutzung

Nr.	Maßnahme
20	Bio-CO_2-Recycling. Baden-Württemberg wird gemeinsam mit anwendungsnaher Forschung und Industrie einen Entwicklungsschwerpunkt zum biotechnologischen/ bioinspirierten CO_2-Recycling als Beitrag zu den Klimaschutzzielen 2030/2050 aufbauen.
18	Pilot-/Demonstrationsanlagen. Baden-Württemberg wird gezielt die Forschung und Entwicklung von Pilot- beziehungsweise Demonstrationsanlagen fördern mit dem Ziel, biologische und bioinspirierte Verfahren als Leitbild für eine nachhaltige Bioökonomie in modularen „Bio-Fabriken“ zu verwirklichen.
16	Weiterentwicklung des Biogasanlagenbestandes. Baden-Württemberg wird eine Konzeption für eine zukunftsorientierte, wirtschaftlich und ökologisch tragfähige Weiterentwicklung des Biogasanlagenbestandes in Baden-Württemberg nach Auslaufen der garantierten EEG-Vergütung erarbeiten. Ziel ist, die Bestandsanlagen dabei zu unterstützen, beispielsweise durch Diversifizierung der Einsatzstoffe und der Produktpalette, Flexibilisierung der Energiebereitstellung und Effizienzsteigerungen ein wichtiges Element für bioökonomisch geprägte Wertschöpfungsketten in der Fläche zu werden.
24	Branchendialoge. Aufbauend auf bestehenden Netzwerken wird Baden-Württemberg Konzepte entwickeln, mit denen der Wissensaustausch zwischen Unternehmen innerhalb einer Branche im Bereich nachhaltige Bioökonomie initiiert beziehungsweise intensiviert wird.
26	Fachinitiativen. Baden-Württemberg wird zwischen den Räumen regionale Fachinitiativen zur lokalen Vernetzung verschiedener Akteure und regionaler Kreisläufe implementieren sowie Vernetzungen zwischen den Räumen unterstützen.
28	Digitales Portal „Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg“. Baden-Württemberg baut ein digitales Portal auf, das Akteure und bestehende Angebote vernetzt, Beratung vermittelt und über alle drei Räume (ländlich, urban und industriell) sowie die bestehenden Entwicklungslevel erweitert. Insbesondere sollen geschlossene und öffentliche Foren den Fachaustausch ermöglichen, Ausschreibungen und Wettbewerbe inseriert, eine vernetzte Fördermittelberatung und die Beteiligung an Fachgruppen und Initiativen angeboten werden. Darüber hinaus soll Gründern ermöglicht werden hierüber Partner zu akquirieren (auch Chatroom, interne Bereiche für Fachinitiativen, Fördermittelnehmer etc.).

Fortsetzung Tabelle 12

Nr.	Maßnahme
29	Internationaler Bioökonomie-Kongress. Baden-Württemberg führt den internationalen „Bioökonomie-Kongress Baden-Württemberg“ fort und erweitert die Themen und Adressatenkreise durch anwendungsorientierte Panels und Präsentationen unter anderem zu Primärerzeugung, Industrie, Nachhaltigkeit, Umwelt- und Klimaschutz sowie Umsetzungen bei Entsorgern und in Kommunen. Hierdurch sollen die Akteure vernetzt, deren Zusammenarbeit intensiviert und das Wissen zur nachhaltigen Bioökonomie in Forschung, Wirtschaft und Politik / Verwaltung ausgetauscht werden.
35	Informationsinitiativen. Baden-Württemberg wird die Erarbeitung von geeigneten Informationsmaterialen und -konzepten zur Unterstützung einer nachhaltigen Entwicklung in Baden-Württemberg fördern. Ziel ist dabei, den Nutzen einer nachhaltigen kreislauforientierten Bioökonomie für jeden Einzelnen und die Allgemeinheit greifbar zu machen, den Verbraucherinnen und Verbrauchern näherzubringen und auch land- und forstwirtschaftliche Unternehmen, das verarbeitende Gewerbe und die Industrie sowie Dienstleister auf das Zukunftsthema Bioökonomie aufmerksam zu machen. Die Informationsvermittlung wird über geeignete Printmedien, digitale Plattformen, Messen, Fachtagungen, Konferenzbeiträge oder Bildungseinrichtungen implementiert.
1	Ziele und Indikatoren. Die Landesregierung wird qualitative Ziele mit quantifizierbaren Indikatoren für eine nachhaltige Bioökonomie entwickeln, um den Beitrag einer nachhaltigen kreislauforientierten Bioökonomie zu den bestehenden Nachhaltigkeitszielen messbar aufzeigen zu können.
3	(Rechtliche) Rahmenbedingungen. Baden-Württemberg wird mit Hilfe des Ansatzes der „regulatorischen Innovationszone“ prüfen, welche Rahmenbedingungen die Entwicklung und Verbreitung der nachhaltigen kreislauforientierten Bioökonomie in Baden-Württemberg hemmen oder fördern können und wie diese Rahmenbedingungen zielführend weiterentwickelt werden können.
27	Forschungs-, Innovations- und Ausbildungscluster Bioökonomie. Baden-Württemberg wird aufbauend auf den etablierten Netzwerkstrukturen des Forschungsprogramms Bioökonomie Baden-Württemberg die Konzeptionierung und Etablierung eines Forschungs-, Innovations- und Ausbildungsclusters Bioökonomie unterstützen und weiterentwickeln.
30	Ausbildung. Das Wissen über und das Bewusstsein für nachhaltige Bioökonomie soll unter Nutzung der Strukturen der Bildung für nachhaltige Entwicklung im Land verbreitet und gefestigt werden.

Quelle: Eigene Zusammenstellung von Maßnahmen aus Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft und Ministerium für ländlichen Raum und Verbraucherschutz (2019)

Integriertes Energie- und Klimaschutzkonzept (IEKK)

Seit 2013 ist in Baden-Württemberg das Klimaschutzgesetz in Kraft, das verbindliche Ziele zur Treibhausgasminderung im Bundesland festlegt. Das Integrierte Energie- und Klimaschutzkonzept (IEKK) stellt die konzeptionelle Grundlage für die Energie- und Klimapolitik in Baden-Württemberg dar und beinhaltet konkrete Maßnahmen, wie diese

Ziele erreicht werden sollen. Eine aktualisierte Fassung mit Maßnahmen bis 2030, wissenschaftlich basierend auf der Studie von Schmidt et al. (2017), befindet sich zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts in der Ressortabstimmung.

Im IEKK ist als Maßnahme 102 explizit der Aufbau eines anwendungsorientierten Entwicklungsschwerpunkts zum biotechnologischen/bioinspirierten CO_2-Recycling vorgesehen (Tabelle 13), sodass Bioökonomie-, Energie- und Klimaforschung über diese Maßnahme sowie die Maßnahme 20 der Bioökonomiestrategie (Tabelle 12) miteinander verzahnt werden. Gleiches gilt für Pilot- und Demonstrationsvorhaben (Maßnahme 106).

Tabelle 13: Maßnahmen im „Integrierten Energie- und Klimaschutzkonzept Baden-Württemberg“ mit Bezug zur biotechnischen und bioinspirierten CO_2-Nutzung

Nr.	Maßnahme
102	Biotechnologie zum CO_2-Recycling (Bio-CCU und Bio-CCS). Wenngleich bei der Energieerzeugung in der Zukunft gegebenenfalls von einer „Dekarbonisierung“ gesprochen werden kann, so wird die stoffliche Produktion überwiegend weiterhin auf Kohlenstoff angewiesen sein. Dieser wird am Ende einer linearen Prozesskette in Form von CO_2 wieder freigesetzt. Zum einen können Agrar- und Forstsysteme nur in begrenztem Maße Kohlenstoff für industrielle stoffliche Zwecke bereitstellen, zum anderen führt die CO_2-Freisetzung zu den bekannten Klimafolgen. Daher kommt der Nutzung von CO_2 als Kohlenstoffquelle eine wachsende Bedeutung zu. Dies umfasst zum einen das Recycling von CO_2 aus Punktquellen sowie langfristig auch die Nutzung von CO_2 aus der Luft (nach natürlichem Vorbild unter Nutzung der Sonnenenergie). • Aufbau eines anwendungsorientierten Entwicklungsschwerpunktes zum biotechnologischen/bioinspirierten CO_2-Recycling • Empfehlungen des laufenden Forschungsprojektes „Technologie- und Marktstudie bioinspirierte CO_2-Fixierung“ nach Möglichkeit umsetzen • Entsprechend die Forschungsförderung ausrichten • Vernetzung der Akteure stärken • Umsetzung der Maßnahmenempfehlung aus der „Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie“
106	Förderung von Forschung und Entwicklung nach dem Vorbild der „Bioraffinerien“. Über biobasierte / bioinspirierte Verfahren, die beispielsweise lebende Zellen oder Enzyme zur Stoffumwandlung und Stoffproduktion nutzen, ist es unter anderem möglich, neue Rohstoffquellen zu gewinnen. Insbesondere aus Abwässern und biologischen Abfällen sowie Reststoffen und Nebenprodukten aus der Industrie können über entsprechende Verfahren Rohstoffe (zurück-) gewonnen werden. Das Konzept der Bioraffinerie fasst hier eine Vielzahl an Verfahren und Ansätzen integrativ zusammen. • Förderung biobasierter und/oder bioinspirierter Umwelttechnologien in Pilot-/Demonstrationsanlagen, Schwerpunkt Abwässer und biologische Abfälle sowie Reststoffe und Nebenprodukte aus der Industrie • Vernetzung der Akteure und Austausch unter den Akteuren • Maßnahmenempfehlung aus der „Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie“

Fortsetzung Tabelle 13

Nr.	Maßnahme
4	Initiierung klimaschutzrelevanter Forschung. Durch Forschung und Entwicklung in den Unternehmen, Hochschulen und Forschungseinrichtungen sollen Innovationen entwickelt werden, die den Treibhausgasausstoß in den verschiedensten Bereichen senken und zugleich die wirtschaftliche Basis des Landes sichern. Dies gilt insbesondere für die stark von technologischer Transformation und Disruption geprägten Schlüsselbranchen wie die Automobilindustrie. • Forschung zu neuen Mobilitäts- und Antriebskonzepten • Umweltforschung • Bioökonomie-Strategie • Ressourceneffizienzstrategie • Inter- und transdisziplinäre Forschung mit Bezug zur sozial-ökologischen Transformation (Reallabore)
19	Weiterentwicklung synthetischer Brennstoffe. Im Bereich des Verkehrs geht es um die Erforschung und Vorbereitung der Skalierung von Renewable Energy Fuels (reFuels). Dies ist ein übergeordneter Begriff für Kraftstoffe, die auf der Grundlage von Erneuerbaren Energien hergestellt werden. Er umfasst Wasserstoff, synthetische hergestellte Kohlenwasserstoffe und nachhaltige Biokraftstoffe (Advanced Biofuels) im Sinne der Renewable Energy Directive (RED) II. Nachhaltige Biokraftstoffe (Advanced Biofuels) werden in Deutschland vor allem aus biogenen Abfallstoffen gewonnen. Ziel ist es, reFuels-Produktionsanlagen vor allem in Ländern anzustoßen, die über bessere Bedingungen zur Herstellung von erneuerbarem Strom verfügen oder Verfahren wie Direct Air Capture voranzutreiben. Es setzt sich in der Wissenschaft und der Politik zunehmend die Erkenntnis durch, dass ohne reFuels unsere Klimaziele nicht erreichbar sein werden. ReFuels stellen eine No-regret-Maßnahme dar, da diese Stoffe neben dem Luftverkehr, Schiffsverkehr, Güterverkehr auch absehbar in der chemischen Industrie benötigt werden. An dieser Stelle wird auf das Programm reFuels des Verkehrsministeriums im Rahmen des Strategiedialogs Automobilwirtschaft verwiesen; siehe auch Sektor Verkehr).
20	Wasserstoff-Modellregion südlicher Oberrhein (H2-SO). Im Projekt H2-SO werden die Grundlagen für eine Wasserstoff-Modellregion geschaffen. Die ersten Einzelbausteine dafür sind bereits geschaffen (Power-to-Gas-Anlage, Wasserstoff-Fähren, Reststoffverwertung, Wasserstoff-Infrastruktur) und sollen durch die bereits existierenden Netzwerke zu einer Wasserstoff-Modellregion erweitert werden, welche dann zur Entstehung weiterer regionaler Wasserstoff-Erzeugungsanlagen führt. Am Beispiel mehrerer Technologiedemonstrationen in der Stromversorgung, der Gasversorgung, der Mobilität und der Industrie wesentliche aktuelle Hemmnisse benannt und Lösungsvorschläge erarbeitet.

Fortsetzung Tabelle 13

Nr.	Maßnahme
21	Forschung im Programm reFuels. In Wissenschaft und Politik setzt sich zunehmend die Erkenntnis durch, dass ohne reFuels unsere Klimaziele nicht erreichbar sein werden. ReFuels stellen eine No-regret-Maßnahme dar, da diese Stoffe neben dem Luftverkehr, Schiffsverkehr, Güterverkehr auch absehbar in der chemischen Industrie benötigt werden. Auch für die Bestandsflotten sind sie vorübergehend von Bedeutung. Der elektrische Antrieb ist aus heutiger Sicht der effizienteste Antrieb. Doch selbst wenn im Jahr 2030 in Baden-Württemberg ein Drittel aller Pkw elektrisch fahren würden – das wären mehr als 2,2 Millionen, wären immer noch über 4,4 Millionen Pkw fossil angetrieben auf den Straßen unterwegs. Noch wichtiger sind reFuels im Luftverkehr. Auch hier zielen Forschung und Entwicklung auf die Produktion und Nutzung nachhaltiger Kraftstoffe auf Basis erneuerbarer Energien. Vor diesem Hintergrund hat Baden-Württemberg im Rahmen des Strategiedialogs Automobilwirtschaft BW das Programm reFuels aufgesetzt, unter dem z. B. die hier genannten Projekte laufen: • „reFuels – Kraftstoffe neu denken“ und wissenschaftliche Begleitung • „Sustainable Aviation Fuels in BW“ • „Machbarkeitsstudie ReFuels aus Zementwerksabgasen“ • „reFuels aus Direct Air Capture“
77	Weiterentwicklung des Biogasanlagenbestandes als Element zur Implementierung von bioökonomisch geprägten Wertschöpfungsketten. Gute Informationen sind die notwendige Grundlage für zielführende Aktivitäten. Das Land wird sich auf Abnehmer- und Anbieterseite für entsprechende Angebote einsetzen. • Zielgruppenspezifische Informations- und Qualifizierungsangebote

Quelle: Eigene Zusammenstellung von Maßnahmen aus IEKK-Entwurf (Stand: 17.12.2019)

Neben der Initiierung und Stärkung der klimaschutzrelevanten Forschung (Maßnahme 4) ist darüber hinaus im IEKK, ebenso wie in der Bioökonomiestrategie, die Weiterentwicklung des Biogasanlagenbestandes vorgesehen (Maßnahme 77), was Chancen für die biologische Methanisierung eröffnen könnte. Wenngleich in dieser Studie die besonderen Stärken der biotechnischen Verfahren zur CO_2-Nutzung eher in der Synthese längerkettiger, funktionalisierter Kohlenstoffverbindungen als in der Bereitstellung von synthetischen Brenn- und Treibstoffen gesehen werden (Kap. 9.4), so bieten die im IEKK vorgesehenen Maßnahmen zur Weiterentwicklung synthetischer Brennstoffe (Maßnahmen 19, 21) und zur Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft (Maßnahme 20) Potenziale zur Verzahnung der Energie- und Mobilitätsforschung und ihrer Akteure mit der Bioökonomieforschung zum CO_2-Recycling, was über Maßnahmen zur Information, zum Wissensaustausch und zur Netzwerkbildung (Tabelle 12) initiiert werden könnte.

Tabelle 14: Stärken, Chancen, Schwächen und Risiken im Bereich Landesstrategien und -aktionspläne

Stärke	Chance	Schwäche	Risiko
Durch die Nachhaltigkeitsstrategie wird Nachhaltigkeit zum zentralen Entscheidungskriterium von Regierungs- und Verwaltungshandeln gemacht und in Wirtschaft und Gesellschaft verankert	Bio-CCU hat das Potenzial, langfristig zu mindestens 5 der 17 Leitsätze der Nachhaltigkeitsstrategie, zu mindestens 3 der 4 Ziele der Bioökonomiestrategie sowie zum IEKK-Ziel der Verminderung von CO_2-Emissionen in der Industrie beizutragen	Es ist kein nennenswerter Beitrag zu den Klimaschutzzielen 2030 zu erwarten; erst zu den Zielen 2050. Der Beitrag kann derzeit aufgrund fehlender Daten und großer Unsicherheiten noch nicht quantifiziert werden	
In der Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie und dem IEKK sind explizit Maßnahmen zu biotechnischem/bioinspirierten CO_2-Recycling (Maßnahme 20; Maßnahme 102 IEKK) vorgesehen			
Baden-Württemberg gehört national und international zu den Vorreitern bei der expliziten strategische Adressierung von Bio-CCU			

Fortsetzung Tabelle 14

Stärke	Chance	Schwäche	Risiko
Die Entwicklung von Bio-CCU wird vom Ausmaß beeinflusst, welche Rolle erneuerbare Energien, Wasserstoff, die Sektorenkopplung, synthetische Gase, Power2X in einem künftigen Energiesystem spielen werden. Diese Bereiche werden im IEKK explizit strategisch adressiert und mit Maßnahmen unterlegt, sodass dies die Entwicklung von Bio-CCU günstig beeinflussen wird	Die in der Bioökonomiestrategie und im IEKK vorgesehenen Maßnahmen bieten das Potenzial, Forschung und Akteure aus Bioökonomie-, Energie- und Klimaforschung synergistisch zu verzahnen, sofern diese Verzahnung aktiv vorangetrieben wird		Bisher kann nicht abgeschätzt werden, welchen Beitrag Bio-CCU im Vergleich zu potenziell konkurrierenden oder komplementären Ansätzen (synthetische Gase, Power-to-X, Wasserstoffwirtschaft) wird leisten können. Risiko, dass Bio-CCU gegenüber diesen Ansätzen vernachlässigt wird

10.5 Öffentliche FuE-Förderung zur biotechnischen und bioinspirierten CO_2-Nutzung

10.5.1 Deutschland

In Deutschland wurden seit 2016 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mehrere große Fördermaßnahmen zur CO_2-Nutzung initiiert und kürzlich in eine weitere Förderphase überführt. Dies sind die

- Kopernikus-Forschungsinitiative mit dem Verbundprojekt P2X
- Fördermaßnahme CO2Plus – Stoffliche Nutzung von CO_2 zur Verbreiterung der Rohstoffbasis (2016-2019), Fortführung als Fördermaßnahme „CO2-WIN – CO_2 als nachhaltige Kohlenstoffquelle – Wege zur industriellen Nutzung (2020-2023), sowie
- Projekt Carbon2Chem (2016-2020), Fortführung in 2. Förderphase (2020-2024)

Diese Fördermaßnahmen werden im Folgenden kurz charakterisiert. Baden-Württembergische Akteure, die in diesen Projekten beteiligt sind, werden in Kapitel 10.6 näher charakterisiert.

Kopernikus-Forschungsinitiative, Verbundprojekt P2X

Die Kopernikus-Projekte[27] bilden eine der größten deutschen Forschungsinitiativen zum Thema Energiewende. Ihr Ziel ist es, eine klimaneutrale Bundesrepublik im Jahr 2050 zu ermöglichen. Insgesamt werden vier große Verbundvorhaben gefördert, darunter auch das Verbundvorhaben „P2X: Erforschung, Validierung und Implementierung von 'Power-to-X' Konzepten". Es umfasst im Zeitraum 2016-2019 insgesamt 39 Teilprojekte mit einer Gesamtfördersumme von 32 Mio. €[28]. Im P2X-Projekt wird die Umwandlung von CO_2, Wasser und erneuerbarem Strom in Gase, Kraftstoffe, Chemikalien und Kunststoffe erforscht. Biotechnische Verfahren bilden darin keinen Schwerpunkt, sind aber auch nicht ausgeschlossen: Lediglich in den P2X-geförderten Teilprojekten der Siemens AG sowie der Evonik Creavis GmbH wird ein hybrides biotechnisches Verfahren erforscht (Rheticus-Projekt, Kap. 7.1.2.2). In der 2. Förderphase des Rheticus-Projekts wird in Kooperation mit der Beiersdorf AG ausgelotet, inwieweit sich die Produkte als Kosmetikinhaltsstoffe eignen.

7 der 39 P2X-Teilprojekte werden von Einrichtungen aus Baden-Württemberg koordiniert. Das Fördervolumen dieser 7 Teilprojekte beläuft sich auf insgesamt 7,6 Mio. € (2016-

---

27 https://www.kopernikus-projekte.de/

28 Quelle: Förderkatalog des Bundes; https://foerderportal.bund.de/foekat/jsp/StartAction.do?actionMode=list

2019). Damit liegt Baden-Württemberg in Bezug auf den Anteil am gesamten Fördervolumen mit 24 Prozent der Gesamtfördersumme an zweiter Stelle nach Nordrhein-Westfalen (41 %) und vor Bayern (16 %).

Im P2X-Projekt wurde unter anderem die weltweit erste integrierte Anlage in Betrieb genommen, die aus CO_2 aus der Luft und erneuerbarem Strom in vier Schritten Kraftstoff produziert. Die containergroße Anlage steht im Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und stellt circa zehn Liter Kraftstoff pro Tag her; ein Nachfolgemodell mit 20facher Kapazität soll 2022 in Betrieb genommen werden.

CO2Plus-Programm: CO2Plus – Stoffliche Nutzung von CO_2 zur Verbreiterung der Rohstoffbasis

Im Rahmenprogramm „Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA)“ förderte das BMBF von 2016-2019 Projekte in der Fördermaßnahme „CO2Plus – Stoffliche Nutzung von CO_2 zur Verbreiterung der Rohstoffbasis“. Sie zielt auf die stoffliche Nutzung von Kohlenstoffdioxid zur Verbreiterung und Sicherung der Rohstoffbasis der chemischen Industrie und auf die Senkung der Treibhausgasemissionen ab. Das Gesamtfördervolumen von CO2Plus belief sich auf 18,7 Mio. €. Baden-württembergische Einrichtungen erhielten davon 21 Prozent (4 Mio. €), etwa eben so viel wie Einrichtungen aus Bayern (21 %); Einrichtungen aus Nordrhein-Westfalen hatten einen Anteil von 13 Prozent (2,4 Mio. €). Projekte mit biotechnischen Verfahren und Projektbeteiligten aus Baden-Württemberg befassten sich mit der mikrobiellen Elektrosynthese zur Bioplastikproduktion aus Rauchgasen (BioElectroPlast; Projektpartner KIT) sowie mit der Produktion von biobasierten Schmierstoffen aus CO_2 mit Hilfe von Mikroalgen (CO2Lubricants; Projektpartner subitec).

Seit Anfang 2020 wird die Fördermaßnahme CO2Plus unter dem Titel „CO_2 als nachhaltige Kohlenstoffquelle – Wege zur industriellen Nutzung (CO2-WIN)“[29] fortgeführt, allerdings mit stärkerer Anwendungsorientierung als CO2Plus. Langfristiges Ziel ist industrielle Kreislaufführung von Kohlenstoff; der Schwerpunkt der aktuell geförderten Projekte liegt auf der elektrochemischen Umwandlung von CO_2, auf chemischen und biotechnologischen Prozessen zur Produktion nachhaltiger Chemikalien und Kraftstoffe sowie auf der Mineralisierung mittels CO_2 zur Herstellung klimaschonender Baustoffe. Das Gesamtfördervolumen von CO2-WIN beträgt 23 Mio. €. Der größte Anteil mit 23 Prozent des Fördervolumens geht an Einrichtungen in Nordrhein-Westfalen, gefolgt von Einrichtungen in Baden-Württemberg mit 18 Prozent und Sachsen mit 12 Prozent.

29 https://co2-utilization.net/de/

Zwei der CO2-WIN-geförderten Projekte nutzen biotechnische Verfahren: Im Projekt TRANSFORMATE wird CO_2 elektrochemisch zu Ameisensäure reduziert. Ameisensäure-verstoffwechselnde Mikroorganismen wandeln die Ameisensäure in einem zweiten Schritt in Biokunststoffe um. An diesem Projekt ist die Universität Stuttgart als baden-württembergische Einrichtung beteiligt. Im Projekt Bio-UGS[30] – ohne baden-württembergische Projektpartner – wird die mikrobielle Umwandlung von CO_2 mit Wasserstoff zu Methan in Untergrundgasspeichern durch die dort natürlicherweise vorkommenden Mikroorganismengemeinschaften untersucht.

Carbon2Chem

Im Projekt Carbon2Chem[31] werden weltweit einsetzbare Verfahren entwickelt und in die großtechnische Umsetzung überführt, die Hüttengase der Stahlproduktion zu Vorprodukten für Kraftstoffe, Kunststoffe oder Düngemittel umsetzen. In der 1. Förderphase (2016-2020) wurde 2018 ein Technikum am Thyssenkrupp-Standort in Duisburg eingeweiht, wo die Einzelverfahren zusammengeführt und unter Industriebedingungen im Praxisbetrieb mit realen Hüttengasen untersucht werden. In der 2. Förderphase (2020-2024) wird zusätzlich untersucht, inwieweit die Carbon2Chem-Technologie auf andere CO_2-Punktquellen als Stahlwerke (z. B. Kraftwerke, Müllverbrennungsanlagen und Zementwerke) übertragen werden kann. Am Projekt sind ganz überwiegend Akteure aus Nordrhein-Westfalen beteiligt, Einrichtungen aus Baden-Württemberg sind nicht vertreten. Es werden auch keine biotechnischen Verfahrensschritte untersucht. Die BMBF-Förderung für die ersten beiden Förderphasen beläuft sich auf 135 Mio. €.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das BMBF seit 2016 rund 215 Mio.€ an Fördermitteln für FuE-Projekte zur CO_2-Nutzung bereitgestellt hat, davon allein 135 Mio. € für die Umsetzung von Stahlwerksabgasen in Nordrhein-Westfalen. Biotechnische Verfahren werden darin bislang nur punktuell in einzelnen Projekten gefördert. Baden-württembergische Akteure sind in den genannten Förderprogrammen (mit Ausnahme des auf die Stahlindustrie gerichteten Projekts Carbon2Chem) mit großen Anteilen vertreten und haben zusammen seit 2016 15,8 Mio. € an BMBF-Fördermitteln eingeworben, davon gut 1,5 Mio. € in drei Projekten zu biotechnischen Verfahren.

---

30 https://co2-utilization.net/de/projekte/co2-als-baustein-fuer-chemische-grundstoffe-neu/bio-ugs/

31 https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/carbon2chem.php

10.5.2 Förderung EU

Auf Ebene der Europäischen Union wird die CO_2-Nutzung in verschiedenen Programmen gefördert: eher grundlagenorientiert durch den European Research Council, stärker anwendungsorientiert in Horizon2020-Projekten. Zudem gab es mit SUNRISE action[32] und ENERGY-X[33] groß angelegte Initiativen, verschiedene Ansätze zur CO_2-Nutzung und künstlichen Photosynthese als EU-Flagship-Projekt zu beantragen, ehe entschieden wurde, dass es dieses Förderinstrument nicht mehr geben wird. Inzwischen sind die beiden Initiativen zur SUNERGY-Initiative[34] zusammengeführt worden, die eine Förderung im HorizonEurope-Programm als *co-programmed public private partnership* anstrebt. Inhaltlich sollen zwei Stränge verfolgt werden: elektro- und thermochemische Prozesse zur Konversion erneuerbarer Energie zu Brennstoffen und Chemikalien einerseits sowie die direkte Umwandlung von Solarenergie zu Brennstoffen und Chemikalien durch photoelektrochemische, biologische und bio-hybride Prozesse andererseits.

Im H2020-Programm „*Industrial Leadership – Leadership in enabling and industrial technologies – Biotechnology* (H2020-EU.2.1.4)“ gab es einen spezifischen Aufruf zum mikrobiellen CO_2-Recycling (Call BIOTEC-5-2017: *Microbial platforms for CO_2-reuse processes in the low-carbon economy*), aus dem drei Projekte hervorgingen, die im Zeitraum 2018 bis 2021 mit jeweils etwa 7 Mio. € gefördert werden und auf TRL3-5-Niveau angesiedelt sind. Tabelle 15 gibt eine Übersicht über diese Projekte. Lediglich am Projekt BioRECO2VER ist ein deutscher Partner beteiligt, der für die Nachhaltigkeitsbewertung und Dissemination zuständig ist.

Darüber hinaus wird der Bau einer Gasfermentationsanlage in Ghent, bei der CO_2-haltige Stahlwerksabgase mit dem LanzaTech-Prozess zur biotechnischen Ethanolproduktion genutzt werden, von der EU mit 10,2 Mio. € gefördert. An diesem Projekt STEELANOL[35] beteiligt sind ArcelorMittal als Koordinator und Betreiber der Demonstrationsanlage, LanzaTech, Primetals Technologies als Anlagenbauer, sowie E4tech zur Erstellung einer Lebenszyklusanalyse (Kap. 7.1.2.1).

---

32 https://sunriseaction.com/sunrise-initiative/

33 https://www.energy-x.eu/

34 https://www.sunergy-initiative.eu

35 http://www.steelanol.eu/en

Tabelle 15: H2020-Projekte zur biotechnischen CO_2-Nutzung im Aufruf „*Microbial platforms for CO_2-reuse processes in the low-carbon economy*“

Acronym, Projekttitel, Projekt-Homepage	CO_2-Quelle	Biotechnische Ansätze	Produkte	Koordinator
BIOCONCO2: BIOtechnological processes based on microbial platforms for the CONversion of CO_2 from ironsteel industry into commodities for chemicals and plastics https://biocon-co2.eu/	Stahl- und Kraftwerksabgase	Fermentationen mit Clostridien und *Acetobacter*, Multienzymsysteme	C_3- bis C_6-Alkohole, 3-Hydroxypropionsäure, Ameisensäure, Milchsäure	ACONDICIONAMIENTO TARRASENSE ASSOCIACION, Spanien
BioRECO2VER: Biological routes for CO_2 conversion into chemical building blocks http://bioreco2ver.eu/	Raffinerie- und Zementwerksabgase	Fermentation, Elektrobiosynthese, hybrider enzymatischer Prozess zur Anreicherung von CO_2	Isobuten, Milchsäure	VLAAMSE INSTELLING VOOR TECHNOLOGISCH ONDERZOEK N.V. , Belgien
ENGICON: Engineered microbial factories for CO_2 exploitation in an integrated waste treatment platform https://engicoin.eu/	Biogasanlagen, CO_2 aus der Aufbereitung von Biogas zu Biomethan	Cyanobakterien zur Produktion von Milchsäure, Knallgasbakterium *Ralstonia eutropha* zur Produktion des Biokunststoffs PHA und Acetogene zur Produktion von Aceton	Milchsäure, PHA, Aceton	FONDAZIONE ISTITUTO ITALIANO DI TECNOLOGIA, Italien

Quelle: Eigene Zusammenstellung von Informationen aus CORDIS und den Projekthomepages

10.6 Akteure und Aktivitäten in Baden-Württemberg

Im Folgenden wird eine orientierende, exemplarische Übersicht über Akteure in Baden-Württemberg gegeben, die aktuell oder potenziell relevante Kompetenzen für die Entwicklung und industrielle Implementierung von biotechnischen und bioinspirierten Verfahren zur CO_2-Nutzung einbringen könnten. Die Übersicht erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle 16 gibt eine Übersicht über Akteure, die Kompetenzen in biotechnischen Verfahren bzw. Verfahrensschritten sowie in Technologien für hybride Verfahren (Photovoltaik, Elektrolyse, Power-to-X) einbringen. Tabelle 17 listet exemplarisch Unternehmen mit hohen CO_2-Emissionen in Baden-Württemberg auf, die als CO_2-Emittenten perspektivisch für biotechnische Verfahren zum CO_2-Recycling in Betracht kommen könnten. In der Tabelle nicht enthalten sind jedoch Unternehmen der Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie, der Biopharmazeutikaproduktion oder Betreiber von Biogasanlagen im Agrar- oder Entsorgungsbereich (z. B. Kläranlagen), deren Fermentationsverfahren ebenfalls als Punktquellen für CO_2 und/oder Biogas in Frage kommen. Eine bundesweite Übersicht über potenzielle CO_2-Punktquellen für hybride oder Power-to-X-Verfahren zur CO_2-Nutzung geben Fröhlich et al. (2019).

Tabelle 16: Forschungseinrichtungen in Baden-Württemberg mit relevanten Kompetenzen für einen Entwicklungsschwerpunkt zur biotechnischen bzw. bioinspirierten CO_2-Nutzung

Forschungseinrichtung	Ort	Kompetenzen
Universität Freiburg, Institut für Anorganische und Analytische Chemie	Freiburg	Bioanorganik und künstliche Photosynthese; künstliche, biomimetische und lichtgetriebene H_2O-Spaltung
Universität Freiburg, Institut für Biologie III	Freiburg	Cyanobacterien, unter anderem für die Produktion von Biofuels und Aminosäuren
Universität Heidelberg, Anorganisch-Chemisches Institut	Heidelberg	Projekt CO2Form in Fördermaßnahme CO2-Plus; neue Katalysatorsysteme für CO_2 zu Formaldehyd und in silico Optimierung der Katalysatoren
Universität Stuttgart, Institut für Akustik und Bauphysik (IABP), Abt. Ganzheitliche Bilanzierung (GaBi)	Stuttgart	Projekt OptiMeOH in Fördermaßnahme CO2-Plus; Methanolsynthese aus CO_2; LCA
Universität Stuttgart, Institut für Bioverfahrenstechnik	Stuttgart	Gasfermentation
Universität Stuttgart, Institut für Polymerchemie, Lehrstuhl für Makromolekulare Stoffe und Faserchemie	Stuttgart	Projekt CORAL in Fördermaßnahme CO2-Plus; CO_2-Absorbermaterialien für Nutzung CO_2 aus der Luft
Universität Stuttgart, Institut für Technische Chemie	Stuttgart	Projekt TRANSFORMATE in Fördermaßnahme CO2-WIN; elektrochemische CO_2-Reduktion zu Ameisensäure; Projekte ChemAmpere und eForFuel
Universität Tübingen, Interfakultäres Institut für Mikrobiologie und Infektionsmedizin Tübingen (IMIT)	Tübingen	Cyanobacterien
Universität Ulm, Anorganische Chemie I	Ulm	Photokatalyse, heterogene Katalyse und Solarzellenanwendungen
Universität Ulm, Institut für Mikrobiologie und Biotechnologie	Ulm	Gas-Fermentation als Forschungsschwerpunkt, anaerobe Bakterien, CO_2 und Syngas als C-Quellen

Fortsetzung Tabelle 16

Forschungseinrichtung	Ort	Kompetenzen
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Engler-Bunte-Institut, Bereich I Chemische Energieträger – Brennstofftechnologie	Karlsruhe	Projekt OptiMeOH in Fördermaßnahme CO2-Plus; Methanolsynthese aus CO_2; Methanreformierung, Methanolsynthese, innovative Reaktorkonzepte
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fakultät für Chemie und Biowissenschaften, Institut für Angewandte Biowissenschaften	Karlsruhe	Projekt BioElectroPlast in Fördermaßnahme CO2-Plus; Elektrobiosynthese zur Bioplastikproduktion
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Bio- und Lebensmitteltechnik, Bereich III Bioverfahrenstechnik	Karlsruhe	Photobioreaktoren, Algenbiotechnologie
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT)	Karlsruhe	Kopernikus-Projekt P2X, 1. voll integrierte Anlage, die aus CO_2 aus der Luft und erneuerbarem Strom in vier Schritten Kraftstoff produziert
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)	Karlsruhe	Projekt PROPHECY in Fördermaßnahme CO2-Plus; Projekte PRODIGY und CO2SimO; LCA, Effizienz- und Nachhaltigkeitsoptimierung für Verfahren der photokatalytischen oder photoelektrochemischen CO_2-Reduktion
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut, Abt. Gastechnologie	Karlsruhe	Projekt OptiMeOH in Fördermaßnahme CO2-Plus; Methanolsynthese aus CO_2; Druckfermentation, Einbindung von Industriegasen
Hochschule Biberach, Institut für Angewandte Biotechnologie	Biberach	CO_2-fixierende Enzyme und photosynthetische Bakterien (*Rhodospirillum rubrum*)
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Technische Thermodynamik	Stuttgart	Kopernikus-Projekt P2X; Projekte ProMet und HTCoEl in Fördermaßnahme CO2-WIN; Herstellung von Propen aus CO_2 via Methanol, elektrochemische Methoden; Synthesegaserzeugung durch Hochtemperatur-Coelektrolyse
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE)	Freiburg im Breisgau	Kopernikus-Projekt P2X; Projekt DEPECOR in Fördermaßnahme CO2-WIN; Mehrfachsolarzellen; Prototypentwicklung III-V/Si Tandemsolarzelle; Photovoltaik, Wasserstofftechnologien

Fortsetzung Tabelle 16

Forschungseinrichtung	Ort	Kompetenzen
Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (IWM)	Freiburg im Breisgau	Kopernikus-Projekt P2X
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)	Karlsruhe	Innovations- und Systemanalysen Energietechnologien, Biotechnologie, Bioökonomie
Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)	Stuttgart	Projekt C2inCO2 in Fördermaßnahme CO2-WIN; LCA der Calcium-Carbonatisierung mit CO_2
Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik (IGB)	Stuttgart	Industrielle Biotechnologie; Biotechnische Produktionsprozesse für Fein- und Spezialchemikalien; Biogas; Mikroalgen; EU-Projekte CELBICON (Fermentation von Syngas), CO2EXIDE; Elektrosynthese
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)	Stuttgart	Kopernikus-Projekt P2X; Projekt CORAL in Fördermaßnahme CO2-Plus; Verfahrensentwicklung für Nutzung CO_2 aus der Luft; Photovoltaik, Wasserstofftechnologie, Elektrochemische Energietechnologien
CARLA – Catalyst Research Laboratory	Heidelberg	Projekt CO2Form in Fördermaßnahme CO2-Plus; neue Katalysatorsysteme für CO_2 zu Formaldehyd und *in silico* Optimierung der Katalysatoren
Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie an der Universität Hohenheim	Stuttgart-Hohenheim	Biogas, Forschungsbiogasanlage

Tabelle 17: Ausgewählte Unternehmen in Baden-Württemberg mit hohen CO_2-Emissionen

Mineralölraffinerie	
	Mineralölraffinerie Oberrhein GmbH & Co. KG
Zementproduktion	
	HeidelbergCement AG, Heidelberg; Holcim (Süddeutschland) GmbH; Lafarge Zement Wössingen GmbH; SCHWENK Zement KG
Kalk- und Gipsproduktion	
	Hans G. Hauri KG Mineralstoffwerke; Märker Zement GmbH
Zellstoff-, Papier- und Kartonagenproduktion	
	Sappi Ehingen GmbH; Albert Köhler; SCA Hygiene Products GmbH; Arctic Paper Mochenwangen GmbH; Baiersbronn Frischfaser Karton GmbH; FS-Karton GmbH; Glatfelter Gernsbach GmbH & Co. KG; Karl Kurz GmbH & Co. KG; Katz GmbH & Co. KG; Koehler Kehl GmbH; Mayr-Melnhof Gernsbach GmbH; Munksjö Dettingen GmbH; Munksjö Paper GmbH; Papierfabrik August Koehler SE; Papierfabrik Carl Lenz GmbH & Co.; Papierfabrik Palm GmbH & Co.KG; Papierfabrik Scheufelen GmbH + Co. KG; Papierwerke Lenk AG; Schoeller Technocell GmbH & Co.KG; Smurfit Kappa Baden Board GmbH; Stora Enso Maxau GmbH; Texon Möckmühl GmbH
Produktion von Sekundär-Aluminium	
	Aleris Recycling (German Works) GmbH
Metallproduktion oder -verarbeitung	
	Badische Stahlwerke GmbH; Daimler AG; Georg Fischer Automobilguss GmbH
Glasherstellung	
	J. WECK GmbH u. Co. KG; SAINT-GOBAIN GLASS Deutschland GmbH; Schuller GmbH; Verallia Deutschland AG
Chemikalienproduktion	
	Solvay Acetow GmbH

Quelle: Unternehmen, die unter den EU Emissionshandel fallen (Stand 2015); ausgewertet für Schmidt et al. (2017)

10.7 Bewertung von Stärken und Schwächen bezogen auf Baden-Württemberg (SWOT) und Schlussfolgerungen

In diesem Kapitel werden die Bewertungen der vorangegangenen Kapitel zu einer Gesamt-Stärken-Schwächen-Chancen-Risiken-Matrix für Baden-Württemberg zusammengeführt (Tabelle 18). Leitfragen für die Bewertung sind

- Inwieweit sind die FuE-Kompetenzen im Land Baden-Württemberg gut aufgestellt, um das Technologiefeld und einzelne Technologien zu erforschen und weiter auszubauen?
- Bieten sich Pilot-, Demonstrations- oder großtechnische Vorhaben an, die den Stärken und der Akteurslandschaft in Baden-Württemberg Rechnung tragen?
- Inwieweit sind die Technologien passfähig zu industriellen Prozess- und Wertschöpfungsketten im Land Baden-Württemberg?
- Inwieweit tragen Aktivitäten im Technologiefeld zum Erreichen von Nachhaltigkeitszielen bei, die in Strategien und Aktionsplänen des Landes formuliert wurden?

Aus den Bewertungen in Tabelle 18 werden folgende Schlussfolgerungen gezogen und Antworten auf die oben genannten Leitfragen gegeben:

Baden-Württemberg verfügt über zahlreiche universitäre und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen, Hochschulen sowie Unternehmen mit einschlägigen Kompetenzen in der lebenswissenschaftlichen, energie- und klimarelevanten Forschung. Zusammen mit der politischen strategischen Schwerpunktsetzung auf dem CO_2-Recycling mit biotechnischen und bioinspirierten Ansätzen sowohl in der Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie als auch im Integrierten Energie- und Klimaschutzkonzept weist Baden-Württemberg sehr gute Voraussetzungen auf, eine Vorreiterrolle in diesem Technologiefeld einzunehmen, es mitzugestalten und mittelfristig auch wirtschaftlich davon zu profitieren.

Während die Power-to-X- und Wasserstofftechnologien-Communities in Baden-Württemberg bereits gut aufgestellt und vernetzt sind und Entwicklungen zur Pilot- und Demonstrationsanlagenreife vorangetrieben haben, muss das Aufgreifen von biologischen Verfahren zur CO_2-Nutzung in Forschung und Entwicklung und die Bildung einer entsprechenden, mit den Power-to-X- und Wasserstofftechnologien vernetzten Community aktiv herbeigeführt werden, um die in Baden-Württemberg vorhandenen Potenziale tatsächlich zu erschließen.

In der baden-württembergischen Wirtschaft können biotechnische oder bioinspirierte Verfahren zur CO_2-Nutzung perspektivisch als Option von Interesse sein für CO_2-

emittierende Industrien als Nutzende des CO_2-Recyclings, für Komponenten-, Maschinen- und Anlagenbau als Ausrüster von CO_2-Recyclingprozessen, für die Chemieindustrie als Nutzer von CO_2 als Rohstoff sowie für die verarbeitende Industrie als Verarbeiter von Chemikalien und Materialien auf Basis von recyceltem CO_2. Allerdings sind diese Optionen und ihre Potenziale bei Unternehmen bisher kaum bekannt.

Die Schlussfolgerung aus dieser Stärken-Chancen-Schwächen-Risikoanalyse ist, dass die vorgesehene Einrichtung des anwendungsorientierten Entwicklungsschwerpunkts zügig vorangetrieben werden sollte, dieser aber um Maßnahmen zur Information, zur aktiven Einbindung von Kompetenzträgern und Stakeholdern und zur Vernetzung ergänzt werden muss, um die im Land vorhandenen Potenziale zu heben. Entsprechende Maßnahmen sind in der Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie sowie im Integrierten Energie- und Klimaschutzkonzept vorgesehen. Empfehlungen, wie der Entwicklungsschwerpunkt ausgestaltet und mit weiteren Maßnahmen flankiert werden kann, werden in Kapitel 11.3 gegeben.

Tabelle 18: Stärken, Chancen, Schwächen und Risiken für biotechnische und bioinspirierte Verfahren zur CO_2-Nutzung in Baden-Württemberg

Stärke	Chance	Schwäche	Risiko
Baden-Württemberg nimmt eine Vorreiterrolle ein bei der strategischen Priorisierung von Bio-CCU und ihrer Flankierung durch mehrere Maßnahmen der Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie und des Integrierten Energie- und Klimaschutzkonzeptes	Bio-CCU haben das Potenzial, mittel- bis langfristig eine Option zur Erreichung von Zielen der Landesstrategien und Aktionspläne darzustellen, insbesondere: Förderung von Wissenschaft und Forschung und Unterstützung von Innovationen; Erschließung von CO_2 als recyclefähiger Rohstoffquelle; Erreichen der in Baden-Württemberg gesteckten Klimaschutzziele, v.a. in der Industrie; Unterstützung des Wandel hin zu einer nachhaltigen und kreislauforientierten Wirtschaft unter Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit und Anpassungsfähigkeit		Bio-CCU bedarf der aktiven, mittelfristigen öffentlichen FuE-Förderung und politischen Unterstützung, um das Potenzial und den Problemlösungsbeitrag dieser Option im Vergleich zu konkurrierenden bzw. komplementären Ansätzen zum CO_2-Recycling (z. B. synthetische Gase, Power-to-X, Wasserstoffwirtschaft) vergleichend bewerten zu können und um industrielle Einsatzreife zu erlangen

Fortsetzung Tabelle 18

Stärke	Chance	Schwäche	Risiko
Baden-Württemberg verfügt über zahlreiche universitäre und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen, Hochschulen sowie Unternehmen, die über einschlägige Kompetenzen in der lebenswissenschaftlichen, energie- und klimarelevanten Forschung verfügen, um das Technologiefeld des CO_2-Recyclings insgesamt voranzubringen	Durch Mobilisierung der Akteure mit einschlägigen lebenswissenschaftlichen Kompetenzen, ihrer Ausrichtung auf anwendungsorientierte Fragestellungen mit Industrierelevanz sowie ihrer Vernetzung mit der Power-to-X-Community kann Baden-Württemberg national und international eine Vorreiterrolle bei FuE zu Bio-CCU einnehmen. Entsprechende Maßnahmen sind in der LS!NB und im IEKK vorgesehen	Bio-CCU ist bislang nur in einzelnen Forschergruppen explizites Forschungsthema, es gibt nur eine punktuelle Vernetzung von Bio-CCU-Akteuren mit Power-to-X-Community	Ohne mittel- und längerfristig wirksame Anreize wird das Potenzial von Bio-CCU in Baden-Württemberg wahrscheinlich kaum erschlossen; andere Technologien zur CO_2-Nutzung würden wahrscheinlich bevorzugt verfolgt
Pilot- und Demonstrationsvorhaben als essenzielle Voraussetzung für eine Weiterentwicklung bis zu einer industriellen Implementierungsreife sind explizit als Maßnahmen in der LS!NB und dem IEKK vorgesehen, ebenso wie Weiterentwicklung des Biogasanlagenbestandes	Für biologische Methanisierung und bestimmte hybride Verfahren der Gasfermentation erscheint Demonstrationsreife (TRL6-7) bis 2030 erreichbar; für modifizierte Photosynthese und Elektrobiosynthese Pilotreife (TRL4-5)	Möglichkeiten zur Bildung interdisziplinärer Konsortien und/oder der prinzipiell möglichen, synergistischen Ergänzung bestehender Versuchs-, Pilot- und Demonstrationsanlagen zur chemisch-katalytischen CO_2-Nutzung mit Bio-CCU sind noch nicht ausgelotet	Vermutete Synergien zu bestehenden Versuchs-, Pilot- und Demonstrationsvorhaben ergeben sich nicht; die Maßnahmen werden auf andere Verfahren ausgerichtet, nicht auf Bio-CCU

Fortsetzung Tabelle 18

Stärke	Chance	Schwäche	Risiko
Baden-Württemberg ist ein industriestarkes Land, dessen Unternehmen über relevante Kompetenzen für Bio-CCU als Technologie-Provider oder -nutzer verfügen und davon potenziell profitieren könnten	Bio-CCU kann perspektivisch als Option von Interesse sein für CO_2-emittierende Industrien als Nutzende des CO_2-Recyclings, für Komponenten-, Maschinen- und Anlagenbau als Ausrüster von CO_2-Recyclingprozessen, für die Chemieindustrie als Nutzer von CO_2 als Rohstoff sowie für die verarbeitende Industrie als Verarbeiter von Chemikalien und Materialien auf Basis von recyceltem CO_2. Schnittmengen zur Wasserstoff-technologie im Energie- und Mobilitätssektor, mögliche künftige Unternehmensaktivitäten in der für BW bedeutenden Automobilindustrie (OEMs und Zulieferer) werden ausgelotet (Wasserstoffroadmap) Durch Einbringen von Bio-CCU in Fachinitiativen, Branchendialoge, Kongresse und Informations-initiativen kann diese Option bekannt gemacht, Potenziale und Interessen in Unternehmen ausgelotet werden	Bei Unternehmen mit relevanten Kompetenzen in oder potenziellem Interesse an Bio-CCU ist Bio-CCU als Option bislang kaum bekannt Bio-CCU kann erst mittel- bis langfristig industrielle Einsatzreife erlangen	Industrieinteresse an Bio-CCU ist noch nicht systematisch ausgelotet. Erste Hinweise auf geringes Industrieinteresse: Kurzfristig zu implementierende Ansätze zur Energieeinsparung, zur Decarbonisierung der Energienutzung werden bevorzugt Potenzielle industrielle Einsatzreife von Bio-CCU liegt möglicherweise jenseits des Planungshorizonts von Unternehmen Mögliche Schnittmengen zur Wasserstofftechnologie im Energie- und Mobilitätssektor könnten sich als gering erweisen

11 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

11.1 Potenziale der biotechnischen und bioinspirierten Verfahren

Um die Herausforderungen des Klimawandels zu meistern und die international vereinbarten Klimaschutzziele zu erreichen, müssen große Anstrengungen unternommen werden, die Nutzung fossiler Rohstoffe und Energieträger zugunsten erneuerbarer und klimagasneutraler Energieträger zu reduzieren. Zur Deckung des stofflichen Kohlenstoffbedarfs der industriellen Produktion muss zudem eine Kreislaufführung des Kohlenstoffs – unter anderem durch die Nutzung von Kohlenstoffdioxid (CO_2) als Rohstoff – erreicht werden.

National und international werden seit einigen Jahren erhebliche FuE-Anstrengungen unternommen, CO_2-Emissionen aus industriellen Punktquellen durch Power-to-X-Verfahren nutzbar zu machen.

Sie nutzen Strom zum Beispiel aus Solarenergie, um elektrolytisch Wasserstoff (H_2) herzustellen. Dieser dient als Reduktionsmittel, um CO_2 chemisch-katalytisch zu reduzieren und zu Produkten, meist Energieträgern und Basischemikalien, umzusetzen. Obwohl sich einige wenige erste Power-to-X-Ansätze bereits in der industriellen Umsetzung befinden, sind noch erhebliche FuE-Anstrengungen erforderlich, und es sind noch viele Fragen offen, die technologische Designs, Verlauf, Umfang und Standorte der industriellen Implementierung, Kosten, Einpassung in industrielle Wertschöpfungsnetze etc. betreffen. Vor diesem Hintergrund bestehen Bedarf und Möglichkeiten, das verfügbare Spektrum der CCU-Technologien zu erweitern. In dieser Studie wurde ein Screening nach biotechnischen Verfahren der CO_2-Nutzung und des CO_2-Recyclings bzw. nach entsprechenden hybriden Verfahren, die biotechnische und physikalisch-chemische Prozessmodule kombinieren, durchgeführt. Dabei lag der Schwerpunkt auf Verfahren, die von der natürlichen Photosynthese inspiriert sind und die innerhalb weniger Jahre Pilot- und Demonstrationsanlagenreife erlangen könnten. Anhand dieser Kriterien wurden die modifizierte Photosynthese, verschiedene Varianten der Gasfermentation sowie perspektivisch die Elektrobiosynthese als vielversprechend identifiziert.

Jeder diese Ansätze weist spezifische Stärken und Schwächen auf, sodass zum jetzigen Zeitpunkt keiner der Ansätze eindeutig über andere favorisiert werden kann. Besondere Stärken der modifizierten Biosynthese liegen darin, dass alle Teilschritte der Photosynthese und der Zielproduktsynthese in einem System integriert sind, höhere flächenbezogene Wirkungsgrade und Produktivitäten als mit dem landwirtschaftlichen Pflanzenbau erzielt werden können und die Produktion auf landwirtschaftlich nicht nutzbaren Flächen

erfolgen kann Es liegen Erfahrungen mit technologisch weit entwickelten Freilandbioreaktoranlagen vor, die Ausrichtung auf autotroph hergestellte höherwertige Chemikalien jenseits von Lebensmittelergänzungs- oder Futtermitteln ist derzeit aber noch gering. Unter den hybriden Verfahren ist die anaerobe Gasfermentation für ausgewählte Anwendungen, insbesondere für die Umsetzung von Stahlwerksabgasen zu Alkoholen sowie die biologische Methanisierung zur Aufwertung von Biogas bis zur Marktreife entwickelt; für andere Anwendungskontexte besteht noch Entwicklungsbedarf. Die Elektrobiosynthese birgt das Potenzial besonders hoher Wirkungsgrade und Effizienzen, ist bislang aber nur im Labormaßstab untersucht worden, bedarf noch der Aufklärung grundlegender Forschungsfragen und der Entwicklung von Reaktor- und Prozesskonzepten für eine Hochskalierung auf größere Maßstäbe.

Allen biotechnischen Verfahren zur CO_2-Nutzung ist gemein, dass hier im Gegensatz zu industriellen biotechnischen Produktionsverfahren stark verkürzte Produktionsketten vorliegen und keine biomassebasierten Substrate als Kohlenstoff- und Energiequelle erforderlich sind. Somit würden sie den Ausbau der industriellen Biotechnologie im Rahmen einer nachhaltigen Bioökonomie ermöglichen, ohne die Konkurrenz um Flächen und Biomasse für Ernährung, energetische und industrielle Anwendungen zu verschärfen. Im Vergleich zu den physikalisch-chemischen Power-to-X-Verfahren sind die hier untersuchten biotechnischen Verfahren in einem geringeren Maße von seltenen Rohstoffen abhängig und weisen tendenziell eine größere Toleranz gegenüber qualitativen und quantitativen Schwankungen in Abgasströmen und gegenüber Verunreinigungen auf. Viele biologische Systeme sind zudem in einem gewissen Umfang zur Selbstreparatur fähig, was bei chemischen Katalysatoren nicht der Fall ist.

Deutliche Komplementaritäten von Power-to-X einerseits und biotechnologischen Verfahren zur CO_2-Nutzung andererseits bestehen in Bezug auf das Spektrum der Zielprodukte. Derzeit fokussiert die Power-to-X-Forschung stark auf den Energiesektor, also Fragen der Energienutzung und -speicherung, und forscht vorrangig daran, einfache organische Verbindungen wie Methan oder Methanol als chemische Energieträger und Kraftstoffe bereitzustellen. Dies ist zwar grundsätzlich auch mit biotechnologischen Verfahren möglich, jedoch spielen hier die biotechnologischen Verfahren ihre eigentliche Stärke nicht aus, dass nämlich durch sie vergleichsweise einfach langkettige und hoch funktionalisierte Moleküle bereitgestellt werden können. In Bezug auf das Produktspektrum könnten sich somit biotechnische und physikalisch-chemische Power-to-X-Verfahren synergistisch ergänzen und das Spektrum in Richtung höherwertiger Moleküle erweitert werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass angesichts der großen Herausforderungen durch den Klimawandel und die Notwendigkeit zum Umbau der Industrieproduktion zu

einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft ein breites Spektrum an Technologien zur Verfügung stehen muss, um Lösungen für sehr unterschiedliche Anforderungen bereitstellen zu können. Biotechnische Verfahren könnten das Spektrum der CCU-Technologien sinnvoll ergänzen und erweitern. Angesichts der erforderlichen FuE- und Vorlaufzeiten müssen CCU-Technologien unverzüglich entwickelt werden, um die gesteckten Klimaziele erreichen zu können. Der derzeitige, wenige Jahre betragende FuE-Rückstand der biotechnologischen Verfahren im Vergleich mit Power-to-X-Verfahren erscheint aufholbar, sofern Anreize zum Aufgreifen anwendungs- und industrierelevanter Fragestellungen gesetzt und die Vernetzung der relevanten lebens- und ingenieurwissenschaftlichen Kompetenzen aktiv unterstützt wird.

Die hier vorgenommenen Bewertungen der biotechnischen und hybriden Verfahren müssen mangels empirisch gesicherter anwendungsbezogener Daten jedoch weitgehend auf Postulaten und Laborwerten beruhen. Daher ist unsicher, inwiefern diese Technologien ihr Potenzial unter realen, industriell relevanten Bedingungen und im Wettbewerb mit alternativen Optionen entfalten können. Deshalb ist es zum einen erforderlich, die Technologien möglichst rasch „raus aus dem Labor“ zu bringen, um diese empirischen Daten generieren zu können. Zum anderen ist eine regelmäßige Fortschreibung und erneute kritische Überprüfung der in dieser Studie vorgenommenen Einschätzungen und Bewertungen im Lichte neuer Erkenntnisse und geänderter Rahmenbedingungen notwendig.

11.2 Potenziale für Baden-Württemberg

Baden-Württemberg verfügt mit seinen universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen, Hochschulen sowie Unternehmen über hervorragende, einschlägige Kompetenzen in der lebenswissenschaftlichen, energie- und klimarelevanten Forschung mit Relevanz für die biotechnische und bioinspirierte CO_2-Nutzung. Zusammen mit der frühzeitigen politisch-strategischen Schwerpunktsetzung auf dem CO_2-Recycling mit biotechnischen und bioinspirierten Ansätzen sowohl in der Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie als auch im Integrierten Energie- und Klimaschutzkonzept weist Baden-Württemberg sehr gute Voraussetzungen auf, eine Vorreiterrolle in diesem Technologiefeld einzunehmen, es national und international mitzugestalten und mittelfristig auch wirtschaftlich davon zu profitieren.

Wegen vieler Unsicherheiten ist heute noch nicht absehbar, in welchem Maße Baden-Württemberg selbst Standort für entsprechende industrielle CO_2-Recycling-Anlagen sein wird und welchen Beitrag sie somit für das Erreichen der Klimaschutzziele des Landes leisten können. Baden-württembergische Akteure können sich aber als national und international wichtige Kompetenzträger und gesuchte Kooperationspartner positionieren

mit dem Ziel der Technologieführerschaft. Während die Power-to-X- und Wasserstofftechnologien-Communities in Baden-Württemberg bereits sehr gut aufgestellt und vernetzt sind und Entwicklungen zur Pilot- und Demonstrationsanlagenreife vorangetrieben haben, muss das Aufgreifen von biologischen Verfahren zur CO_2-Nutzung in Forschung und Entwicklung und die Bildung einer entsprechenden Community noch aktiv herbeigeführt werden, um die in Baden-Württemberg vorhandenen Potenziale tatsächlich zu erschließen. Essenziell erscheint hier die Ausrichtung auf anwendungs- und industrierelevante FuE-Fragestellungen, der Schulterschluss mit den Power-to-X- und Wasserstofftechnologien-Communities, um Synergien und Komplementaritäten auszuloten und die möglichst frühzeitige Einbindung von Unternehmen. Im Folgenden wird ein Konzept vorgestellt, wie dies angegangen werden könnte.

11.3 Empfehlungen für ein Konzept zur Förderung in Baden-Württemberg

Aus der Charakterisierung der drei in dieser Studie vertiefend analysierten Ansätze der modifizierten Photosynthese, der verschiedenen Verfahren der Gasfermentation sowie der Elektrobiosynthese, ergibt sich ein mehrjähriger FuE-Bedarf, um diese Verfahren bis zur Anwendungsreife entwickeln zu können (Kap. 6 bis 8).

Die Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg sieht mit der Maßnahme 20 explizit einen Entwicklungsschwerpunkt zum biotechnologischen/bioinspirierten CO_2-Recycling vor, der gemeinsam mit anwendungsnaher Forschung und Industrie aufgebaut werden soll. Die Landesstrategie weist zudem aus, dass Maßnahmen gezielt dort ansetzen sollen, wo keine ausreichenden Anreize auf übergeordneter Ebene vorhanden sind. Dies ist für die biotechnischen und bioinspirierten Verfahren zur CO_2-Nutzung der Fall: wie die Darstellung der Förderlandschaft in Deutschland und der EU ergab (Kap. 10.5), werden FuE-Projekte zur biotechnischen oder bioinspirierten CO_2-Nutzung bislang nur in einzelnen Projekten gefördert; einen größeren Förderschwerpunkt gibt es noch nicht. Demgegenüber werden chemisch-technische Verfahren zur CO_2-Nutzung (Power-to-X) schon seit einigen Jahren sowohl national als auch international in größerem Umfang gefördert, sodass sich hier bereits eine interdisziplinäre Community aus einschlägig tätigen Forschungseinrichtungen und Unternehmen herausbilden, ein gemeinsames Verständnis entwickeln und größere Sichtbarkeit erlangen konnte. Hierin sind Akteure aus Baden-Württemberg substanziell vertreten. Eine entsprechende Community hat sich bislang für die biotechnischen und bioinspirierten Verfahren zur CO_2-Nutzung noch nicht gebildet bzw. aufgrund fehlender Anreize nicht bilden können.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich Anforderungen an den angestrebten Entwicklungsschwerpunkt zum biotechnologischen/bioinspirierten CO_2-Recycling in Baden-Württemberg, die in Tabelle 19 aufgeführt sind.

Tabelle 19: Anforderungen an einen Entwicklungsschwerpunkt zum biotechnologischen/bioinspirierten CO_2-Recycling in Baden-Württemberg

Anforderungen
Anwendungsorientierte und industrierelevante Forschung und Entwicklung mit dem Ziel, in wenigen Jahren das Entwicklungsstadium von Pilotanlagen (TRL 4-5) oder Demonstrationsanlagen (TRL 6-7) erreichen zu können
Gemeinsame Erarbeitung der anwendungsorientierten und industrierelevanten FuE-Themen und -Ziele durch Forschungseinrichtungen und Industrie
Disziplinen- und einrichtungsübergreifende Zusammenführung der erforderlichen Kompetenzen
Mit zunehmender Reife der biotechnischen Ansätze zunehmende Rolle von Unternehmen in den geförderten Projekten
Förderinstrumentarium muss dem aktuell unterschiedlichen Entwicklungsstand und der wahrscheinlich unterschiedlichen Entwicklungsgeschwindigkeit der verschiedenen biotechnischen und bioinspirierten Ansätze Rechnung tragen
Unterstützung der Konsortien- und Netzwerkbildung
Offenheit zum Aufgreifen neuer FuE-Themen und Integration neuer FuE-Kompetenzen und -Akteure
Im Förderschwerpunkt sollte eine vergleichende Bewertung der biotechnischen und bioinspirierten Verfahren zur CO_2-Nutzung mit komplementären oder konkurrierenden Ansätzen angestrebt werden
FuE-Themen und -Ziele, die für die FuE erforderlichen Kompetenzen sowie das Förderinstrumentarium sollen angesichts der sich dynamisch verändernden Rahmenbedingungen (z. B. Klimaschutzziele, Entwicklung anderer Technologien, Akteurslandschaft, internationale Entwicklungen) regelmäßig überprüft und angepasst werden

Um diesen Anforderungen Rechnung zu tragen, wird hier ein Konzept aus mehreren, zeitlich gestaffelten und miteinander verbundenen Modulen vorgeschlagen (Abbildung 11), das einen Zeitraum von etwa 8 bis 10 Jahren abdeckt. Insgesamt umfasst das Konzept mehrere, in der Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie vorgesehene Maßnahmen und richtet diese fachlich-inhaltlich auf die biotechnischen und bioinspirierten Verfahren zur CO_2-Nutzung aus. Die in der folgenden Erläuterung des Gesamtkonzepts erwähnten Maßnahmen sind in Tabelle 12 erläutert.

Kern des vorgeschlagenen Konzepts für den anwendungsorientierten Entwicklungsschwerpunkt zur biobasierten und bioinspirierten CO_2-Nutzung sind FuE-Projekte, die als interdisziplinäre Verbundprojekte angelegt sind und die verschiedenen erforderlichen Kompetenzen (Kap. 10.1) der bio- und bioverfahrenstechnischen FuE, der regenerativen

Stromerzeugung und Elektrolyse, der chemischen Katalyse, des Scale-up, der Systemintegration sowie der Nachhaltigkeitsbewertung zusammenführen. Sie werden in mehreren aufeinanderfolgenden Förderphasen durchgeführt. Dabei ist das Ziel, durch das Durchlaufen dieser Förderphasen den jeweiligen Ansatz bis zur Pilotanlagenreife (TRL 4-5) und ggf. auch zur Demonstrationsanlagenreife (TRL 6-7) zu bringen. Dies sollte zumindest für einige Ansätze, wie z. B. für die biologische Methanisierung und für einige Gasfermentationen im Verlauf von 8-10 Jahren erreichbar sein.

Wegen des derzeit unterschiedlichen Entwicklungsstandes der verschiedenen Ansätze ist vorgesehen, dass weniger weit entwickelte Ansätze (z. B. modifizierte Photosynthese, Elektrobiosynthese) das Startmodul der Verbundprojekte ggf. wiederholt durchlaufen können. Weiter entwickelte Ansätze rücken in das Folgemodul vor, an das sich ein weiteres Modul der Erprobung in einer Pilot-, ggf. auch Demonstrationsanlage anschließen kann. Da aus heutiger Sicht in Baden-Württemberg mehrere verschiedene Standorte (z. B. im Raum Stuttgart, Karlsruhe und Freiburg) günstige Voraussetzungen für derartige Pilotanlagen aufweisen – und im Verlauf der Zeit ggf. weitere hinzukommen werden – wird in diesem Konzept vorgeschlagen, für den Standort einer solchen Pilot- oder ggf. auch Demonstrationsanlage einen Wettbewerb zwischen potenziellen Standorten durchzuführen, nachdem die Anforderungen an einen solchen Standort und eine entsprechende Anlage spezifiziert worden sind.

Über den gesamten Zeitraum präsentiert sich der Entwicklungsschwerpunkt regelmäßig im Rahmen des Internationalen Bioökonomiekongresses (Maßnahme 29 der der Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie) und bindet im Rahmen dieser (oder ggf. weiterer) Fachveranstaltungen auch internationale Expertise ein. Wenn auch ein Großteil der Fördernehmer in den Verbundprojekten baden-württembergische Akteure sein werden, wird empfohlen, die Projektpartner nicht strikt auf dieses Bundesland zu begrenzen. Vielmehr sollten die Projekte auch für Akteure außerhalb Baden-Württembergs offen sein, sofern diese eine spezifische, essenzielle Expertise in das jeweilige Verbundprojekt einbringen, die das Konsortium insgesamt stärkt.

Da sich weder in Baden-Württemberg noch national eine wissenschaftliche Community zur biobasierten und bioinspirierten CO_2-Nutzung herausgebildet hat und sich zudem die wissenschaftlich-technischen, politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die CO_2-Nutzung im Zeitverlauf deutlich ändern dürften, kann der Entwicklungsschwerpunkt aber nicht auf eine reine FuE-Förderung beschränkt bleiben.

Vielmehr muss er zum einen die Herausbildung einer solchen wissenschaftlichen Community unterstützen und sie auch mit Kompetenzträgern der nicht-biotechnischen Ansätze (Photovoltaik, Elektrolyse, chemische Katalyse, Wasserstofftechnologien) sowie

relevanten Unternehmen vernetzen. Es wird daher empfohlen, den eigentlichen FuE-Verbundprojekten zwei weitere Module vorzuschalten:

- Themenfindungs- und Konsortienbildungsmodul. In den im Rahmen dieser Studie geführten Interviews wurde deutlich, dass FuE-Konsortien, in denen alle oder die meisten Partner erstmals zusammenarbeiten und ein für das Gesamt-Konsortium neues FuE-Thema bearbeiten, eine gewisse „Findungsphase“ brauchen, bis die unterschiedlichen Kompetenzen tatsächlich synergistisch zusammenarbeiten können und aus der Interdisziplinarität ein echter Mehrwert entsteht, der deutlich über ein „Nebeneinander verschiedener disziplinärer Teilprojekte unter dem Dach eines Verbundprojekts“ hinausgeht. Zudem arbeitet ein Teil der Forschungseinrichtungen mit einschlägigen Kompetenzen noch nicht spezifisch auf entsprechenden anwendungsorientierten, industrierelevanten FuE-Fragestellungen. Daher wird vorgeschlagen, potenzielle Fördernehmer für die erste Tranche der Verbundprojekte sowie potenziell relevante Unternehmen (z. B. CO_2-Emittenten, Biogasanlagenbetreiber, Komponentenhersteller) zunächst in Workshops zusammenzubringen, um anwendungsorientierte, industrierelevante FuE-Themen zu identifizieren und Anforderungen an die zu entwickelnden Anwendungen zu spezifizieren. Die Workshops dienen zugleich dem Ausloten von Kooperationspotenzialen und möglicher Konsortien für die ersten Verbundprojekte. Die Workshops sollten von einer „neutralen“ Einrichtung[36] moderiert werden, die selber keinen Antrag für ein Verbundprojekt stellen wird. Die identifizierten FuE-Themen sollten dann in mehreren, etwa 6 Monate dauernden geförderten Vorprojekten konkret zu Projektanträgen für Verbundprojekte ausgearbeitet werden. Hieraus wird dann im Wettbewerb eine kleinere Anzahl zur eigentlichen Verbundprojektförderung ausgewählt. Die Workshops in diesem Modul können ggf. in eine Fachinitiative (Maßnahme 26 der Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie) unter Federführung einer einschlägig tätigen Forschungseinrichtung oder auch in einen Branchendialog (Maßnahme 24) überführt und der Wissensaustausch und das Community-Building so verstetigt werden.
- Informationsmodul: Da die biotechnischen und bioinspirierten Verfahren zur CO_2-Nutzung bisher in potenziell relevanten Unternehmen als Option zum CO_2-Recycling kaum bekannt sein dürften und daher in strategische Überlegungen kaum einbezogen werden, wird vorgeschlagen, ein Informationsmodul vor Beginn des eigentlichen Entwicklungsschwerpunkts und über einen gewissen Zeitraum begleitend zu den (an)laufenden Verbundprojekten zu implementieren. Dieses Informationsmodul umfasst mehrere Maßnahmen der Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie und richtet diese inhaltlich auf die biotechnischen und bioinspirierten Verfahren zur CO_2-Nutzung aus. Ziel ist es, die Optionen zur biologischen und bioinspirierten CO_2-Nutzung bei allen Stakeholder entlang der relevanten Wertschöpfungsketten (Forschung, Wirtschaft, Nicht-Regierungsorganisationen, interessierte Öffentlichkeit, Politik), bekannt

---

36 Dies könnte beispielsweise eine Landesgesellschaft, ein Projektträger, eine wissenschaftliche Fachgesellschaft o.Ä. übernehmen.

zu machen, auf ihre strategische Einbettung in die LS!NB und das IEKK hinzuweisen, und Interesse an der Thematik und an dem Entwicklungsschwerpunkt zu wecken. Potenzielle Fördernehmer aus Wissenschaft und Wirtschaft sollen zur Teilnahme an Workshops im Rahmen des Themenfindungs- und Konsortienbildungsmoduls bzw. einer entsprechenden Fachinitiative (Maßnahme 26) bzw. zum Aufgreifen der Thematik in einem Branchendialog (Maßnahme 24) motiviert werden. In der Anfangsphase sollte die Information zu Optionen zur biologischen und bioinspirierten CO_2-Nutzung vorrangig über kurze Vorträge mit anschließender Möglichkeit zu Fragen und Diskussion erfolgen. Die Vorträge sollten auf ohnehin stattfindenden virtuellen oder physischen Veranstaltungen von Forschungseinrichtungen, Verbänden, Netzwerken und Initiativen[37] gehalten werden. Die Vorträge sollten durch weitere Informationsmaterialien ergänzt werden; eine erste Broschüre wurde im Rahmen dieser Studie erstellt (Hüsing et al. 2020). Sie könnte ergänzt werden beispielsweise durch Internetseiten, ggf. Medieninformationen, redaktionelle Beiträge in verschiedenen online- und Printmedien, die beispielsweise im Rahmen der Maßnahme 35 „Informationsinitiativen“ erarbeitet werden.

Zusätzlich zum Community Building und der Vernetzung bedarf es in regelmäßigen Abständen der strategischen Reflexion, inwieweit die Ausrichtung der FuE-Arbeiten und die Zusammensetzung der in den Entwicklungsschwerpunkt eingebundenen Kompetenzträger angesichts der sich ändernden politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, der sich entwickelnden konkurrierenden oder komplementären Technologien und auch nationalen und internationalen Entwicklungen noch adäquat ist oder aber der Nachjustierung bedarf. Deshalb sollen derartige (vergleichende) Bewertungen Bestandteil der geförderten Verbundprojekte sein, zusätzlich aber auf projektübergreifender Ebene beispielsweise in Form von Statusseminaren oder Zwischenevaluationen bzw. -begutachtungen beim anstehenden Wechsel zu weiteren Modulen durchgeführt werden. Möglicherweise ergibt sich daraus auch Prüfungsbedarf bei den rechtlichen Rahmenbedingungen für das CO_2-Recycling (Kap. 5.4.2.5). Solche hemmenden oder fördernden Rahmenbedingungen könnten ggf. mit dem Ansatz der „regulatorischen Innovationszone“, der in der Maßnahme 3 „(Rechtliche) Rahmenbedingungen“ vorgesehen ist, geprüft und weiterentwickelt werden. Zudem könnte die strategische Reflexion und Einordnung der Aktivitäten im Entwicklungsschwerpunkt durch Interaktion mit der Maßnahme 1 „Ziele und Indikatoren“ unterstützt werden, durch die mit quantifizierbaren Indikatoren der

37 Exemplarisch seien genannt: Veranstaltungen von Landesgesellschaften im Bereich der Umwelttechnik und Bioökonomie, von baden-württembergischen Universitäten, Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen, von Unternehmensverbänden in Baden-Württemberg, z. B. Initiativkreis der Wirtschaftsinitiative Nachhaltigkeit, Landesverband der Baden-Württembergischen Industrie e. V. (LVI), Industrie- und Handelskammertag Baden-Württemberg, Landesverbände der Chemischen Industrie (VCI), der Deutschen Maschinen- und Anlagenbauer (VDMA), des Zentralverbands Elektrotechnik und Elektroindustrie ZVEI; Wasserstoffroadmap; Strategiedialog Automobilwirtschaft BW; Wasserstoff-Modellregion südlicher Oberrhein.

Beitrag der Bioökonomie zu den bestehenden Nachhaltigkeitszielen gemessen werden soll.

Darüber hinaus könnte die Sichtbarkeit und Vorreiterrolle Baden-Württembergs als Forschungs-, Innovations-, Ausbildungs- und Wirtschaftsstandort für nachhaltige Bioökonomie weiter gestärkt werden, wenn die Themen und Aktivitäten des Entwicklungsschwerpunkts zum biotechnischen CO_2-Recycling auch in die Ausbildung sowie in die Vermittlung von Wissen über und in die Stärkung des Bewusstseins für nachhaltige Bioökonomie einfließen würden (Maßnahmen 27 „Forschungs-, Innovations- und Ausbildungscluster Bioökonomie“ und Maßnahme 30 „Ausbildung“).

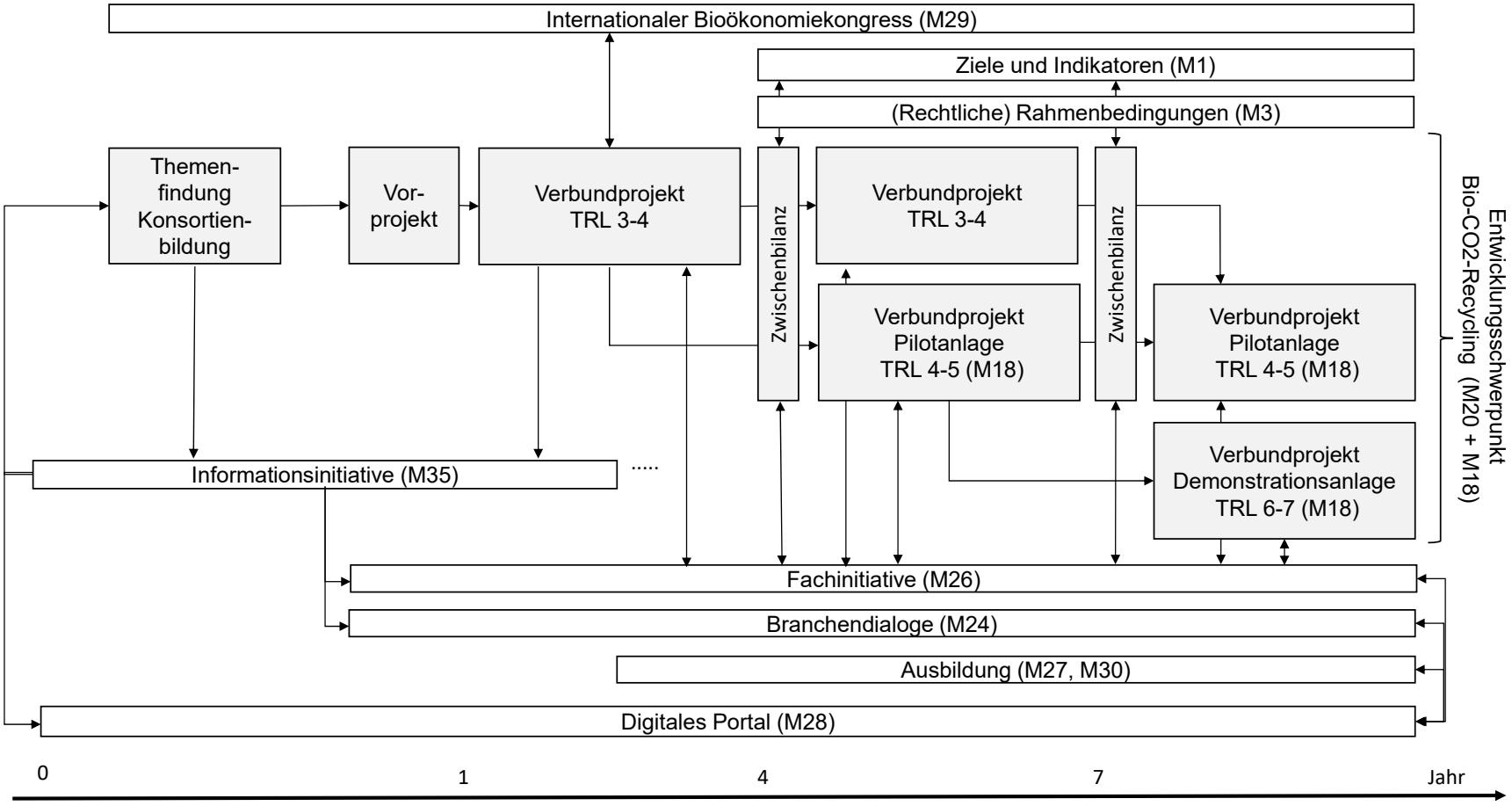


Abbildung 11: Förderkonzept zur biologischen und bioinspirierten CO_2-Nutzung in Baden-Württemberg und seine Vernetzung mit weiteren Maßnahmen (M) der Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie

12 Literaturverzeichnis

Agarwal, Arun S.; Zhai, Yumei; Hill, Davion; Sridhar, Narasi (2011): The electrochemical reduction of carbon dioxide to formate/formic acid. Engineering and economic feasibility. In: *ChemSusChem* 4 (9), S. 1301–1310. DOI: 10.1002/cssc.201100220.

Alshalif, Abdullah Faisal; 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. In: *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 101 (3), S. 1–20. DOI: 10.1080/19648189.2020.1713899.

Amthor, Jeffrey S.; Bar-Even, Arren; Hanson, Andrew D.; Millar, A. Harvey; Stitt, Mark; Sweetlove, Lee J.; Tyerman, Stephen D. (2019): Engineering Strategies to Boost Crop Productivity by Cutting Respiratory Carbon Loss. In: *The Plant Cell* 31 (2), S. 297. DOI: 10.1105/tpc.18.00743.

Antoniewicz, Maciek R. (2019): Synthetic methylotrophy. Strategies to assimilate methanol for growth and chemicals production. In: *Current opinion in biotechnology* 59, S. 165–174. DOI: 10.1016/j.copbio.2019.07.001.

Artz, Jens; Müller, Thomas E.; Thenert, Katharina; Kleinekorte, Johanna; Meys, Raoul; Sternberg, André et al. (2018): Sustainable Conversion of Carbon Dioxide. An Integrated Review of Catalysis and Life Cycle Assessment. In: *Chemical reviews* 118 (2), S. 434–504. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00435.

Aryal, Nabin; Ammam, Fariza; Patil, Sunil A.; Pant, Deepak (2017): An overview of cathode materials for microbial electrosynthesis of chemicals from carbon dioxide. In: *Green Chem.* 19 (24), S. 5748–5760. DOI: 10.1039/C7GC01801K.

Ausfelder, Florian; Dura, Hanna Ewa (Hg.) (2018): Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien. Herausforderungen - Potenziale - Methoden - Auswirkungen. 1. Roadmap des Kopernikus-Projektes "Power-to-X": Flexible Nutzung erneuerbarer Ressourcen (P2X). DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. Frankfurt/M., zuletzt geprüft am 25.10.2019.

Bajracharya, Suman; ter Heijne, Annemiek; Dominguez Benetton, Xochitl; Vanbroekhoven, Karolien; Buisman, Cees J. N.; Strik, David P. B. T. B.; Pant, Deepak (2015): Carbon dioxide reduction by mixed and pure cultures in microbial electrosynthesis using an assembly of graphite felt and stainless steel as a cathode. In: *Bioresource technology* 195, S. 14–24. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.05.081.

Bajracharya, Suman; Yuliasni, Rustiana; Vanbroekhoven, Karolien; Buisman, Cees J. N.; Strik, David P. B. T. B.; Pant, Deepak (2017): Long-term operation of microbial electrosynthesis cell reducing CO2 to multi-carbon chemicals with a mixed culture avoiding methanogenesis. In: *Bioelectrochemistry (Amsterdam, Netherlands)* 113, S. 26–34. DOI: 10.1016/j.bioelechem.2016.09.001.

Bar-Even, Arren (2018): Daring metabolic designs for enhanced plant carbon fixation. In: *Plant science : an international journal of experimental plant biology* 273, S. 71–83. DOI: 10.1016/j.plantsci.2017.12.007.

Bar-Even, Arren; Noor, Elad; Lewis, Nathan E.; Milo, Ron (2010): Design and analysis of synthetic carbon fixation pathways. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107 (19), S. 8889–8894. DOI: 10.1073/pnas.0907176107.

Bengelsdorf, Frank R.; Dürre, Peter (2017): Gas fermentation for commodity chemicals and fuels. In: *Microbial biotechnology* 10 (5), S. 1167–1170. DOI: 10.1111/1751-7915.12763.

Bennett, R. Kyle; Steinberg, Lisa M.; Chen, Wilfred; Papoutsakis, Eleftherios T. (2018): Engineering the bioconversion of methane and methanol to fuels and chemicals in native and synthetic methylotrophs. In: *Current opinion in biotechnology* 50, S. 81–93. DOI: 10.1016/j.copbio.2017.11.010.

Bernhardsgrütter, Iria; Schell, Kristina; Peter, Dominik M.; Borjian, Farshad; Saez, David Adrian; Vöhringer-Martinez, Esteban; Erb, Tobias J. (2019): Awakening the Sleeping Carboxylase Function of Enzymes: Engineering the Natural CO2-Binding Potential of Reductases. In: *Journal of the American Chemical Society* 141 (25), S. 9778–9782. DOI: 10.1021/jacs.9b03431.

Bernhardsgrütter, Iria; Stoffel, Gabriele Mm; Miller, Tarryn E.; Erb, Tobias J. (2021): CO2-converting enzymes for sustainable biotechnology: from mechanisms to application. In: *Current opinion in biotechnology* 67, S. 80–87. DOI: 10.1016/j.copbio.2021.01.003.

Bhagat, C.; Dudhagara, P.; Tank, S. (2018): Trends, application and future prospectives of microbial carbonic anhydrase mediated carbonation process for CCUS. In: *Journal of applied microbiology* 124 (2), S. 316–335. DOI: 10.1111/jam.13589.

Blankenship, Robert E.; Tiede, David M.; Barber, James; Brudvig, Gary W.; Fleming, Graham; Ghirardi, Maria et al. (2011): Comparing photosynthetic and photovoltaic efficiencies and recognizing the potential for improvement. In: *Science (New York, N.Y.)* 332 (6031), S. 805–809. DOI: 10.1126/science.1200165.

Blasco-Gómez, Ramiro; Batlle-Vilanova, Pau; Villano, Marianna; Balaguer, Maria Dolors; Colprim, Jesús; Puig, Sebastià (2017): On the Edge of Research and Technological Application. A Critical Review of Electromethanogenesis. In: *International journal of molecular sciences* 18 (4). DOI: 10.3390/ijms18040874.

Borrel, Guillaume; Adam, Panagiotis S.; Gribaldo, Simonetta (2016): Methanogenesis and the Wood-Ljungdahl Pathway: An Ancient, Versatile, and Fragile Association. In: *Genome biology and evolution* 8 (6), S. 1706–1711. DOI: 10.1093/gbe/evw114.

Bose, Himadri; Satyanarayana, Tulasi (2017): Microbial Carbonic Anhydrases in Biomimetic Carbon Sequestration for Mitigating Global Warming. Prospects and Perspectives. In: *Frontiers in microbiology* 8, S. 1615. DOI: 10.3389/fmicb.2017.01615.

Brigham, Christopher J. (2019): Perspectives for the biotechnological production of biofuels from CO2 and H2 using Ralstonia eutropha and other 'Knallgas' bacteria. In: *Applied microbiology and biotechnology*. DOI: 10.1007/s00253-019-09636-y.

Bringezu, Stefan; Kaiser, Simon; Turnau, Sebastian (2020): Zukünftige Nutzung von CO2 als Rohstoffbasis der deutschen Chemie- und Kunststoffindustrie. Eine Roadmap. Hg. v. Universität Kassel und Center For Environmental Systems Research (CESR). Kassel, zuletzt geprüft am 06.08.2020.

Bruinsma, J. (2009): The resource outlook to 2050: By how much do land, water and crop yields need to increase by 2050? Food and Agriculture Organization of the United Nations. Online verfügbar unter ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/012/ak971e/ak971e00.pdf.

Bundesministerium für Bildung und Forschung; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2020): Nationale Bioökonomiestrategie. Hg. v. Bundesministerium für Bildung und Forschung und Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Berlin.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2014): Nationale Politikstrategie Bioökonomie. Nachwachsende Ressourcen und biotechnologische Verfahren als Basis für Ernährung, Industrie und Energie. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft BMWi (2020): Nationales Reformprogramm 2020 - Die Nationale Wasserstoffstrategie. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=16, zuletzt geprüft am 24.07.2020.

Cheng, Shaoan; Logan, Bruce E. (2007): Sustainable and efficient biohydrogen production via electrohydrogenesis. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104 (47), S. 18871–18873. DOI: 10.1073/pnas.0706379104.

Cheng, Shaoan; Xing, Defeng; Call, Douglas F.; Logan, Bruce E. (2009): Direct Biological Conversion of Electrical Current into Methane by Electromethanogenesis. In: *Environ. Sci. Technol.* 43 (10), S. 3953–3958. DOI: 10.1021/es803531g.

Claassens, Nico J.; Cotton, Charles A. R.; Kopljar, Dennis; Bar-Even, Arren (2019a): Making quantitative sense of electromicrobial production. In: *Nat Catal* 2 (5), S. 437–447. DOI: 10.1038/s41929-019-0272-0.

Claassens, Nico J.; He, Hai; Bar-Even, Arren (2019b): Synthetic Methanol and Formate Assimilation via Modular Engineering and Selection Strategies. In: Methylotrophs and Methylotroph Communities: Caister Academic Press.

Claassens, Nico J.; Sousa, Diana Z.; Dos Santos, Vitor A. P. Martins; Vos, Willem M. de; van der Oost, John (2016): Harnessing the power of microbial autotrophy. In: *Nature reviews. Microbiology* 14 (11), S. 692–706. DOI: 10.1038/nrmicro.2016.130.

Claassens, Nico Joannes; Sánchez-Andrea, Irene; Sousa, Diana Zita; Bar-Even, Arren (2018): Towards sustainable feedstocks. A guide to electron donors for microbial carbon fixation. In: *Current opinion in biotechnology* 50, S. 195–205. DOI: 10.1016/j.copbio.2018.01.019.

Cotton, Charles Ar; Edlich-Muth, Christian; Bar-Even, Arren (2018): Reinforcing carbon fixation. CO2 reduction replacing and supporting carboxylation. In: *Current opinion in biotechnology* 49, S. 49–56. DOI: 10.1016/j.copbio.2017.07.014.

Dabral, Saumya; Schaub, Thomas (2019): The Use of Carbon Dioxide (CO2) as a Building Block in Organic Synthesis from an Industrial Perspective. In: *Adv. Synth. Catal.* 361 (2), S. 223–246. DOI: 10.1002/adsc.201801215.

Dau, Holger; Kurz, Philipp; Weitze, Marc-Denis (2019): Künstliche Photosynthese. Berlin, Heidelberg: Springer.

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina; Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften (2018): Künstliche Photosynthese. Forschungsstand, wissenschaftlich-technische Herausforderungen und Perspektiven. 1. Auflage. München, Halle (Saale), Mainz: acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina; Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften e.V (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), zuletzt geprüft am 08.02.2019.

Deutzmann, Jörg S.; Spormann, Alfred M. (2017): Enhanced microbial electrosynthesis by using defined co-cultures. In: *The ISME journal* 11 (3), S. 704–714. DOI: 10.1038/ismej.2016.149.

Ducat, Daniel C.; Silver, Pamela A. (2012): Improving carbon fixation pathways. In: *Current opinion in chemical biology* 16 (3-4), S. 337–344. DOI: 10.1016/j.cbpa.2012.05.002.

Dürre, Peter (2017): Gas fermentation - a biotechnological solution for today's challenges. In: *Microbial biotechnology* 10 (1), S. 14–16. DOI: 10.1111/1751-7915.12431.

Edel, Miriam; Horn, Harald; Gescher, Johannes (2019): Biofilm systems as tools in biotechnological production. In: *Applied microbiology and biotechnology* 103 (13), S. 5095–5103. DOI: 10.1007/s00253-019-09869-x.

Emerson, David Frederic; Stephanopoulos, Gregory (2019): Limitations in converting waste gases to fuels and chemicals. In: *Current opinion in biotechnology* 59, S. 39–45. DOI: 10.1016/j.copbio.2019.02.004.

Erb, Tobias J.; Zarzycki, Jan (2016): Biochemical and synthetic biology approaches to improve photosynthetic CO2-fixation. In: *Current opinion in chemical biology* 34, S. 72–79. DOI: 10.1016/j.cbpa.2016.06.026.

Erb, Tobias J.; Zarzycki, Jan (2018): A short history of RubisCO. The rise and fall (?) of Nature's predominant CO2 fixing enzyme. In: *Current opinion in biotechnology* 49, S. 100–107. DOI: 10.1016/j.copbio.2017.07.017.

European Commission (2020): A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. COM(2020) 301 final. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. European Commission. Brussels.

European Commission, Directorate-General for Research & Innovation (2016): Artificial Photosynthesis: Potential and Reality. Publications Office of the European Union. Luxembourg, zuletzt geprüft am 06.03.2019.

Fasihi, Mahdi; Efimova, Olga; Breyer, Christian (2019): Techno-economic assessment of CO2 direct air capture plants. In: *Journal of Cleaner Production* 224, S. 957–980. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.086.

Fast, Alan G.; Papoutsakis, Eleftherios T. (2012): Stoichiometric and energetic analyses of non-photosynthetic CO2-fixation pathways to support synthetic biology strategies for production of fuels and chemicals. In: *Current Opinion in Chemical Engineering* 1 (4), S. 380–395. DOI: 10.1016/j.coche.2012.07.005.

Fermin, David J.; Marken, Frank (2018): Chapter 1. Introduction to the Electrochemical and Photo-electrochemical Reduction of CO2. In: Frank Marken und David Fermin (Hg.): Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide. Cambridge: Royal Society of Chemistry, S. 1–16.

Fradette, Louis; Lefebvre, Sylvain; Carley, Jonathan (2017): Demonstration Results of Enzyme-Accelerated CO2 Capture. In: *Energy Procedia* 114, S. 1100–1109. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1263.

Frietsch, Rainer; Schmoch, Ulrich (2010): Transnational patents and international markets. In: *Scientometrics* 82 (1), S. 185–200. DOI: 10.1007/s11192-009-0082-2.

Fröhlich, Thomas; Blömer, Sebastian; Münter, Daniel; Brischke, Lars-Arvid (2019): CO2-Quellen für die PtX-Herstellung in Deutschland - Technologien, Umweltwirkung, Verfügbarkeit. ifeu paper 03/2019. ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung. Heidelberg.

Fuchs, Georg (2011): Alternative pathways of carbon dioxide fixation: insights into the early evolution of life? In: *Annual review of microbiology* 65, S. 631–658. DOI: 10.1146/annurev-micro-090110-102801.

Fund, Christin; El-Chichakli, Beate; Patermann, Christian (2018): Bioeconomy Policy (Part III): Update Report of National Strategies around the World. A report from the German Bioeconomy Council. Bioeconomy Council. Berlin.

Geres, Roland; Kohn, Andreas; Lenz, Sebastian; Ausfelder, Florian; Bazzanella, Alexis Michael; Möller, Alexander (2019): Roadmap Chemie 2050. Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. Hg. v. FutureCamp Climate GmbH und DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., zuletzt geprüft am 09.10.2019.

Geschäftsstelle Nachhaltigkeitsstrategie (2014): Nachhaltigkeitsstrategie Baden-Württemberg. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Stuttgart. Online verfügbar unter https://www.nachhaltigkeitsstrategie.de/fileadmin/Downloads/N-Service/publikationen/N-Strategie_Broschuere_web.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2019.

Geschäftsstelle Nachhaltigkeitsstrategie (2018): Leitsätze einer nachhaltigen Entwicklung. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Stuttgart. Online verfügbar unter https://www.nachhaltigkeitsstrategie.de/fileadmin/Downloads/informieren/Leitsaetze_und_Indikatoren/Leitsaetze_einer_nachhaltigen_Entwicklung_neu.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2019.

Giddings, Cloelle G. S.; Nevin, Kelly P.; Woodward, Trevor; Lovley, Derek R.; Butler, Caitlyn S. (2015): Simplifying microbial electrosynthesis reactor design. In: *Frontiers in microbiology* 6, S. 468. DOI: 10.3389/fmicb.2015.00468.

Gimkiewicz, Carla; Hegner, Richard; Gutensohn, Mareike F.; Koch, Christin; Harnisch, Falk (2017): Study of Electrochemical Reduction of CO2 for Future Use in Secondary Microbial Electrochemical Technologies. In: *ChemSusChem* 10 (5), S. 958–967. DOI: 10.1002/cssc.201601675.

Gonzales, Jake N.; Matson, Morgan M.; Atsumi, Shota (2019): Nonphotosynthetic Biological CO2 Reduction. In: *Biochemistry* 58 (11), S. 1470–1477. DOI: 10.1021/acs.biochem.8b00937.

Haas, Thomas; Krause, Ralf; Weber, Rainer; Demler, Martin; Schmid, Guenter (2018): Technical photosynthesis involving CO2 electrolysis and fermentation. In: *Nat Catal* 1 (1), S. 32–39. DOI: 10.1038/s41929-017-0005-1.

Handler, Robert M.; Shonnard, David R.; Griffing, Evan M.; Lai, Andrea; Palou-Rivera, Ignasi (2016): Life Cycle Assessments of Ethanol Production via Gas Fermentation. Anticipated Greenhouse Gas Emissions for Cellulosic and Waste Gas Feedstocks. In: *Ind. Eng. Chem. Res.* 55 (12), S. 3253–3261. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b03215.

Heinrich, Daniel; Raberg, Matthias; Steinbüchel, Alexander (2018): Studies on the aerobic utilization of synthesis gas (syngas) by wild type and recombinant strains of Ralstonia eutropha H16. In: *Microbial biotechnology* 11 (4), S. 647–656. DOI: 10.1111/1751-7915.12873.

Hennacy, Jessica H.; Jonikas, Martin C. (2020): Prospects for Engineering Biophysical CO2 Concentrating Mechanisms into Land Plants to Enhance Yields. In: *Annual review of plant biology* 71, S. 461–485. DOI: 10.1146/annurev-arplant-081519-040100.

Hirth, Thomas; et al. (2013): Bioökonomie im System aufstellen. Konzept für eine baden-württembergische Forschungsstrategie "Bioökonomie". Stuttgart.

Hoppe, Wieland; Bringezu, Stefan; Wachter, Nadine (2018): Economic assessment of CO2-based methane, methanol and polyoxymethylene production. In: *Journal of CO2 Utilization* 27, S. 170–178. DOI: 10.1016/j.jcou.2018.06.019.

Hüsing, Bärbel; Aichinger, Heike; Marscheider-Weidemann, Frank; Moll, Cornelius; Wietschel, Martin (2020): CO2 und Sonnenenergie – Potenziale für die Bioökonomie. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). Karlsruhe. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/BWCO219001_Broschuere.pdf, zuletzt aktualisiert am 18.08.2020.

IEKK-Entwurf (Stand: 17.12.2019).

Jiang, Yong; May, Harold D.; Lu, Lu; Liang, Peng; Huang, Xia; Ren, Zhiyong Jason (2019): Carbon dioxide and organic waste valorization by microbial electrosynthesis and electro-fermentation. In: *Water research* 149, S. 42–55. DOI: 10.1016/j.watres.2018.10.092.

Jonkers, H. M.; Schlangen, H.E.J.G. (2009): Selbstheilen des Betons mit Hilfe von Bakterien / Bacteria-based Self-healing Concrete. In: *Restoration of Buildings and Monuments* 15 (4), S. 255–266. DOI: 10.1515/rbm-2009-6304.

Jourdin, Ludovic; Grieger, Timothy; Monetti, Juliette; Flexer, Victoria; Freguia, Stefano; Lu, Yang et al. (2015): High Acetic Acid Production Rate Obtained by Microbial Electrosynthesis from Carbon Dioxide. In: *Environmental science & technology* 49 (22), S. 13566–13574. DOI: 10.1021/acs.est.5b03821.

Kaiser, Simon; Bringezu, Stefan (2020): Use of carbon dioxide as raw material to close the carbon cycle for the German chemical and polymer industries. In: *Journal of Cleaner Production* 271, S. 122775. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122775.

Karthikeyan, Rengasamy; Singh, Rajesh; Bose, Arpita (2019): Microbial electron uptake in microbial electrosynthesis. A mini-review. In: *Journal of industrial microbiology & biotechnology* 46 (9-10), S. 1419–1426. DOI: 10.1007/s10295-019-02166-6.

Khetkorn, Wanthanee; Rastogi, Rajesh P.; Incharoensakdi, Aran; Lindblad, Peter; Madamwar, Datta; Pandey, Ashok; Larroche, Christian (2017): Microalgal hydrogen production - A review. In: *Bioresource technology* 243, S. 1194–1206. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.07.085.

Khosravitabar, Fatemeh (2020): Microalgal biohydrogen photoproduction: scaling up challenges and the ways forward. In: *J Appl Phycol* 32 (1), S. 277–289. DOI: 10.1007/s10811-019-01911-9.

Klankermayer, Jürgen; Wesselbaum, Sebastian; Beydoun, Kassem; Leitner, Walter (2016): Selektive katalytische Synthesen mit Kohlendioxid und Wasserstoff: Katalyse-Schach an der Nahtstelle zwischen Energie und Chemie. In: *Angew. Chem.* 128 (26), S. 7416–7467. DOI: 10.1002/ange.201507458.

Kornienko, Nikolay; Zhang, Jenny Z.; Sakimoto, Kelsey K.; Yang, Peidong; Reisner, Erwin (2018): Interfacing nature’s catalytic machinery with synthetic materials for semi-artificial photosynthesis. In: *Nature nanotechnology* 13 (10), S. 890–899. DOI: 10.1038/s41565-018-0251-7.

Krajewska, Barbara (2018): Urease-aided calcium carbonate mineralization for engineering applications. A review. In: *Journal of advanced research* 13, S. 59–67. DOI: 10.1016/j.jare.2017.10.009.

Krause, Ralf; Reinisch, David; Reller, Christian; Eckert, Helmut; Hartmann, David; Taroata, Dan et al. (2020): Industrial Application Aspects of the Electrochemical Reduction of CO 2 to CO in Aqueous Electrolyte. In: *Chemie Ingenieur Technik* 92 (1-2), S. 53–61. DOI: 10.1002/cite.201900092.

Krieg, Thomas; Madjarov, Joana; Rosa, Luis F. M.; Enzmann, Franziska; Harnisch, Falk; Holtmann, Dirk; Rabaey, Korneel (2019): Reactors for Microbial Electrobiotechnology. In: *Advances in biochemical engineering/biotechnology* 167, S. 231–271. DOI: 10.1007/10_2017_40.

Krieg, Thomas; Sydow, Anne; Faust, Sonja; Huth, Ina; Holtmann, Dirk (2018): CO2 to Terpenes. Autotrophic and Electroautotrophic α-Humulene Production with Cupriavidus necator. In: *Angewandte Chemie (International ed. in English)* 57 (7), S. 1879–1882. DOI: 10.1002/anie.201711302.

Kubis, Armin; Bar-Even, Arren (2019): Synthetic biology approaches for improving photosynthesis. In: *Journal of experimental botany* 70 (5), S. 1425–1433. DOI: 10.1093/jxb/erz029.

LanzaTech (Hg.) (2018): World’s First Commercial Waste Gas to Ethanol Plant Starts Up. Online verfügbar unter https://www.lanzatech.com/2018/06/08/worlds-first-commercial-waste-gas-ethanol-plant-starts/, zuletzt geprüft am 15.07.2020.

Li, Han; Opgenorth, Paul H.; Wernick, David G.; Rogers, Steve; Wu, Tung-Yun; Higashide, Wendy et al. (2012): Integrated electromicrobial conversion of CO2 to higher alcohols. In: *Science (New York, N.Y.)* 335 (6076), S. 1596. DOI: 10.1126/science.1217643.

Liew, FungMin; Martin, Michael E.; Tappel, Ryan C.; Heijstra, Björn D.; Mihalcea, Christophe; Köpke, Michael (2016): Gas Fermentation-A Flexible Platform for Commercial Scale Production of Low-Carbon-Fuels and Chemicals from Waste and Renewable Feedstocks. In: *Frontiers in microbiology* 7, S. 694. DOI: 10.3389/fmicb.2016.00694.

Lindblad, Peter; Fuente, David; Borbe, Friederike; Cicchi, Bernardo; Conejero, J. Alberto; Couto, Narciso et al. (2019): CyanoFactory, a European consortium to develop technologies needed to advance cyanobacteria as chassis for production of chemicals and fuels. In: *Algal Research* 41, S. 101510. DOI: 10.1016/j.algal.2019.101510.

Lips, D.; Schuurmans, J. M.; Branco dos Santos, F.; Hellingwerf, K. J. (2018): Many ways towards ‘solar fuel’. Quantitative analysis of the most promising strategies and the main challenges during scale-up. In: *Energy & Environmental Science* 11 (1), S. 10–22. DOI: 10.1039/C7EE02212C.

Long, Nguyen; Lee, Jintae; Koo, Kee-Kahb; Luis, Patricia; Lee, Moonyong (2017): Recent Progress and Novel Applications in Enzymatic Conversion of Carbon Dioxide. In: *Energies* 10 (4), S. 473. DOI: 10.3390/en10040473.

Miao, Rui; Xie, Hao; Liu, Xufeng; Lindberg, Pia; Lindblad, Peter (2020): Current processes and future challenges of photoautotrophic production of acetyl-CoA-derived solar fuels and chemicals in cyanobacteria. In: *Current opinion in chemical biology* 59, S. 69–76. DOI: 10.1016/j.cbpa.2020.04.013.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (2020): Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg. Klimaschutz und Wertschöpfung kombinieren. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Referat 24. Stuttgart.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft; Ministerium für ländlichen Raum und Verbraucherschutz (2019): Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft und Ministerium für ländlichen Raum und Verbraucherschutz. Stuttgart.

Naseem, Muhammad; Osmanoglu, Özge; Dandekar, Thomas (2020): Synthetic Rewiring of Plant CO2 Sequestration Galvanizes Plant Biomass Production. In: *Trends in biotechnology* 38 (4), S. 354–359. DOI: 10.1016/j.tibtech.2019.12.019.

Noreña-Caro, Daniel; Benton, Michael G. (2018): Cyanobacteria as photoautotrophic biofactories of high-value chemicals. In: *Journal of CO2 Utilization* 28, S. 335–366. DOI: 10.1016/j.jcou.2018.10.008.

Otto, A.; Markewitz, P.; Robinius, M. (2017): CO2-Nutzung. In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Technologiebericht. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Ou, Xunmin; Zhang, Xu; Zhang, Qian; Zhang, Xiliang (2013): Life-cycle analysis of energy use and greenhouse gas emissions of gas-to-liquid fuel pathway from steel mill off-gas in China by the LanzaTech process. In: *Front. Energy* 7 (3), S. 263–270. DOI: 10.1007/s11708-013-0263-9.

Peplow, Mark (2015): Industrial biotechs turn greenhouse gas into feedstock opportunity. In: *Nature Biotechnology* 33 (11), S. 1124–1125. DOI: 10.1038/nbt1115-1123.

Pérez, Adam A.; Chen, Que; Hernández, Hugo Pineda; Branco Dos Santos, Filipe; Hellingwerf, Klaas J. (2019): On the use of oxygenic photosynthesis for the sustainable production of commodity chemicals. In: *Physiologia plantarum* 166 (1), S. 413–427. DOI: 10.1111/ppl.12946.

Pohlmann, Anne; Fricke, Wolfgang Florian; Reinecke, Frank; Kusian, Bernhard; Liesegang, Heiko; Cramm, Rainer et al. (2006): Genome sequence of the bioplastic-producing "Knallgas" bacterium Ralstonia eutropha H16. In: *Nature Biotechnology* 24 (10), S. 1257–1262. DOI: 10.1038/nbt1244.

Posten, Clemens (2009): Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae. In: *Eng. Life Sci.* 9 (3), S. 165–177. DOI: 10.1002/elsc.200900003.

Prévoteau, Antonin; Carvajal-Arroyo, Jose M.; Ganigué, Ramon; Rabaey, Korneel (2020): Microbial electrosynthesis from CO2: forever a promise? In: *Current opinion in biotechnology* 62, S. 48–57. DOI: 10.1016/j.copbio.2019.08.014.

Reed, John; Geller, Jil; McDaniel, Robert (2017): CO2 Conversion by Knallgas Microorganism. Energy Research and Development Division FINAL PROJECT REPORT. Hg. v. California Energy Commission. Kiverdi, Inc. (CEC-500-2017-005). Online verfügbar unter https://ww2.energy.ca.gov/2017publications/CEC-500-2017-005/CEC-500-2017-005.pdf, zuletzt geprüft am 23.10.2019.

Reiner, Johannes Eberhard; Geiger, Katharina; Hackbarth, Max; Fink, Marielle; Lapp, Christian Jonas; Jung, Tobias et al. (2020): From an extremophilic community to an electroautotrophic production strain: identifying a novel Knallgas bacterium as cathodic biofilm biocatalyst. In: *The ISME journal* 14 (5), S. 1125–1140. DOI: 10.1038/s41396-020-0595-5.

Reller, Christian; Krause, Ralf; Volkova, Elena; Schmid, Bernhard; Neubauer, Sebastian; Rucki, Andreas et al. (2017): Selective Electroreduction of CO 2 toward Ethylene on Nano Dendritic Copper Catalysts at High Current Density. In: *Adv. Energy Mater.* 7 (12), S. 1602114. DOI: 10.1002/aenm.201602114.

Salimijazi, Farshid; Parra, Erika; Barstow, Buz (2019): Electrical energy storage with engineered biological systems. In: *Journal of biological engineering* 13 (1), S. 38. DOI: 10.1186/s13036-019-0162-7.

Schmidt, Maike; Fuchs, Anna-Lena; Kelm, Tobias; Abdalla, Nabil; Bergk, Fabian; Fehrenbach, Horst, Jamet, Marie, Lambrecht, Udo et al. (2017): Energie- und Klimaschutzziele 2030. Zentrum für sonnenergie- und Wasserstoffforschung Baden-Württemberg (ZSW); Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu); Öko-Institut e.V.; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI); Hamburg Institut Research (HIR). Stuttgart. Online verfügbar unter https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/Aktuelles/2017/20170928_Endbericht_Energie-_und_Klimaschutzziele_2030.pdf.

Schwander, Thomas; Schada von Borzyskowski, Lennart; Burgener, Simon; Cortina, Niña Socorro; Erb, Tobias J. (2016): A synthetic pathway for the fixation of carbon dioxide in vitro. In: *Science (New York, N.Y.)* 354 (6314), S. 900–904. DOI: 10.1126/science.aah5237.

Sharma, Tanvi; Sharma, Swati; Kamyab, Hesam; Kumar, Ashok (2020): Energizing the CO2 utilization by chemo-enzymatic approaches and potentiality of carbonic anhydrases: A review. In: *Journal of Cleaner Production* 247, S. 119138. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119138.

Siemens AG; Evonik Industries AG (10.10.2019): CO2 soll saubere Arbeit leisten: Forschungsprojekt Rheticus startet in Phase 2. München, Essen. Martini, Florian; Schulze, Edda. Online verfügbar unter https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/forschungsprojekt-rheticus.

Skraly, Frank A.; Ambavaram, Madana M. R.; Peoples, Oliver; Snell, Kristi D. (2018): Metabolic engineering to increase crop yield. From concept to execution. In: *Plant science : an international journal of experimental plant biology* 273, S. 23–32. DOI: 10.1016/j.plantsci.2018.03.011.

Steelanol (Hg.): Home | Steelanol. Online verfügbar unter http://www.steelanol.eu/en, zuletzt geprüft am 15.07.2020.

sunfire GmbH (15.01.2019): Durchbruch für Power-to-X: Sunfire nimmt erste Co-Elektrolyse in Betrieb und startet die Skalierung. Jendrischik, Martin, +49 (0) 341 52 57 60 50 - presse@sunfire.de. Online verfügbar unter https://www.sunfire.de/de/unternehmen/news/detail/durchbruch-fuer-power-to-x-sunfire-nimmt-erste-co-elektrolyse-in-betrieb-und-startet-die-skalierung, zuletzt geprüft am 18.08.2020.

Takors, Ralf; Kopf, Michael; Mampel, Joerg; Bluemke, Wilfried; Blombach, Bastian; Eikmanns, Bernhard et al. (2018): Using gas mixtures of CO, CO2 and H2 as microbial substrates. The do's and don'ts of successful technology transfer from laboratory to

production scale. In: *Microbial biotechnology* 11 (4), S. 606–625. DOI: 10.1111/1751-7915.13270.

Tóth, Szilvia Z.; Yacoby, Iftach (2019): Paradigm Shift in Algal H2 Production. Bypassing Competitive Processes. In: *Trends in biotechnology* 37 (11), S. 1159–1163. DOI: 10.1016/j.tibtech.2019.05.001.

Trudeau, Devin L.; Edlich-Muth, Christian; Zarzycki, Jan; Scheffen, Marieke; Goldsmith, Moshe; Khersonsky, Olga et al. (2018): Design and in vitro realization of carbon-conserving photorespiration. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115 (49), E11455. DOI: 10.1073/pnas.1812605115.

Tschörtner, Jenny; Lai, Bin; Krömer, Jens O. (2019): Biophotovoltaics. Green Power Generation From Sunlight and Water. In: *Frontiers in microbiology* 10, S. 866. DOI: 10.3389/fmicb.2019.00866.

Ulmer, Ulrich; Dingle, Thomas; Duchesne, Paul N.; Morris, Robert H.; Tavasoli, Alexandra; Wood, Thomas; Ozin, Geoffrey A. (2019): Fundamentals and applications of photocatalytic CO2 methanation. In: *Nature communications* 10 (1), S. 3169. DOI: 10.1038/s41467-019-10996-2.

Umweltbundesamt (Hg.) (2020): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2020. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2018. Dessau-Roßlau (CLIMATE CHANGE, 22/2020). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-15-climate-change_22-2020_nir_2020_de_0.pdf, zuletzt geprüft am 24.07.2020.

Viebahn, Peter; Zelt, Ole; Fischedick, Manfred; Hildebrand, Jan; Heib, Sascha; Becker, Daniela et al. (2018): Technologien für die Energiewende - Politikbericht. Teilprojekt A im Rahmen des strategischen BMWi-Leitprojekts "Trends und Perspektiven der Energieforschung". Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Wuppertal (Wuppertal Report). Online verfügbar unter http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bsz:wup4-opus-70802.

Weber, Andreas P.M.; Bar-Even, Arren (2019): Update. Improving the Efficiency of Photosynthetic Carbon Reactions. In: *Plant Physiology* 179 (3), S. 803. DOI: 10.1104/pp.18.01521.

Weichenhain, Uwe; Lange, Simon; Koolen, Jan; Benz, Anja; Hartmann, Sandra; Heilert, Daniela et al. (2020): Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg. Roland Berger GmbH. München. Online verfügbar unter https://www.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/6_Wirtschaft/Ressourceneffizienz_und_Umwelttechnik/Wasserstoff/200724-Potentialstudie-H2-Baden-Wuerttemberg.pdf.

Wey, Laura T.; Bombelli, Paolo; Chen, Xiaolong; Lawrence, Joshua M.; Rabideau, Clayton M.; Rowden, Stephen J. L. et al. (2019): The Development of Biophotovoltaic Systems for Power Generation and Biological Analysis. In: *ChemElectroChem* 6 (21), S. 5375–5386. DOI: 10.1002/celc.201900997.

Work, Victoria H.; D'Adamo, Sarah; Radakovits, Randor; Jinkerson, Robert E.; Posewitz, Matthew C. (2012): Improving photosynthesis and metabolic networks for the competitive production of phototroph-derived biofuels. In: *Current opinion in biotechnology* 23 (3), S. 290–297. DOI: 10.1016/j.copbio.2011.11.022.

Yang, Xue; Yuan, Qianqian; Luo, Hao; Li, Feiran; Mao, Yufeng; Zhao, Xin et al. (2019): Systematic design and in vitro validation of novel one-carbon assimilation pathways. In: *Metabolic engineering* 56, S. 142–153. DOI: 10.1016/j.ymben.2019.09.001.

Yishai, Oren; Goldbach, Leander; Tenenboim, Hezi; Lindner, Steffen N.; Bar-Even, Arren (2017): Engineered Assimilation of Exogenous and Endogenous Formate in Escherichia coli. In: *ACS synthetic biology* 6 (9), S. 1722–1731. DOI: 10.1021/acssynbio.7b00086.

Yishai, Oren; Lindner, Steffen N.; La Gonzalez de Cruz, Jorge; Tenenboim, Hezi; Bar-Even, Arren (2016): The formate bio-economy. In: *Current opinion in chemical biology* 35, S. 1–9. DOI: 10.1016/j.cbpa.2016.07.005.

Yu, Hong; Liao, James C. (2018): A modified serine cycle in Escherichia coli coverts methanol and CO2 to two-carbon compounds. In: *Nature communications* 9 (1), S. 3992. DOI: 10.1038/s41467-018-06496-4.

Anhang

Im Rahmen von telefonischen Interviews sowie des Validierungsworkshops am 13.11.2019 wurden Expertinnen und Experten in die Erarbeitung und Bewertung der Projektergebnisse aus den nachfolgend aufgeführten Einrichtungen eingebunden. Ihnen sei für ihre Beiträge herzlich gedankt.

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg im Breisgau
BASF SE, Ludwigshafen
BIOPRO Baden-Württemberg GmbH, Stuttgart
CO2 Value Europe
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Stuttgart
Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB, Stuttgart und Straubing
Heidelberg Cement, Heidelberg
Hochschule Biberach, Biberach
Infraserv GmbH & Co. Höchst KG, Frankfurt/Main
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe
Max Planck Institut für Terrestrische Mikrobiologie, Marburg
MicroPyros GmbH, Straubing
Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart
Siemens Corporate Technologies
Universität Hohenheim, Stuttgart
Universität Stuttgart, Stuttgart
Universität Ulm, Ulm
Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI), Frankfurt/M.

Nachfolgend ist die Agenda des Validierungsworkshops am 13.11.2019 aufgeführt.

Workshop

Biotechnische und bioinspirierte CO_2-Fixierung und -nutzung Künstliche Photosynthese

am 13. November 2019

im Fraunhofer ISI, Breslauer Str. 48, 76139 Karlsruhe

bis 10:30 h	Anreise
10:30-11:00 h	Begrüßung, Einführung in die Thematik, Ziel und Ablauf des Workshops, Vorstellungsrunde
11:00-13:00 h	Block 1: Übersicht über biotechnische und bioinspirierte Ansätze und ihre vergleichende Bewertung
	Impulsvortrag ISI
	Diskussion Block 1: • Werden Leistungsfähigkeit, Entwicklungsstand und -perspektiven der Ansätze zutreffend eingeschätzt? • Welche Anwendungen, welche Produkte, welche Wertschöpfungsketten sind vielversprechend? • Was sind erfolgskritische Faktoren für die Weiterentwicklung bis zur industriellen Anwendungsreife?
13:00-13:30 h	Mittagspause mit Imbiss
13:30-14:30 h	Block 2: Vergleichende Bewertung biotechnischer und bioinspirierter Ansätze mit künftigen Energietechnologien
	Impulsvortrag ISI
	Diskussion Block 2: • Wie ist der zeitliche Verlauf wichtiger Meilensteine? • Worin liegen Komplementaritäten, worin Synergien zwischen bio- und physikalisch-chemisch-technischen Ansätzen?
14:30-14:45 h	Kaffeepause
14:45-16:15 h	Block 3: Handlungsoptionen für die weitere Umsetzung der biotechnischen und bioinspirierten Technologien im Rahmen einer nachhaltigen Bioökonomie
	Impulsvortrag ISI
	Diskussion Block 3: • Wie könnte ein anwendungsnaher Entwicklungsschwerpunkt zum biotechnologischen/bioinspirierten CO_2-Recycling ausgestaltet sein? • Wie können welche Unternehmen aktiv eingebunden werden? • Was sind Implikationen speziell für Baden-Württemberg?
16:15 h	Ausblick, nächste Schritte, Ende des Workshops