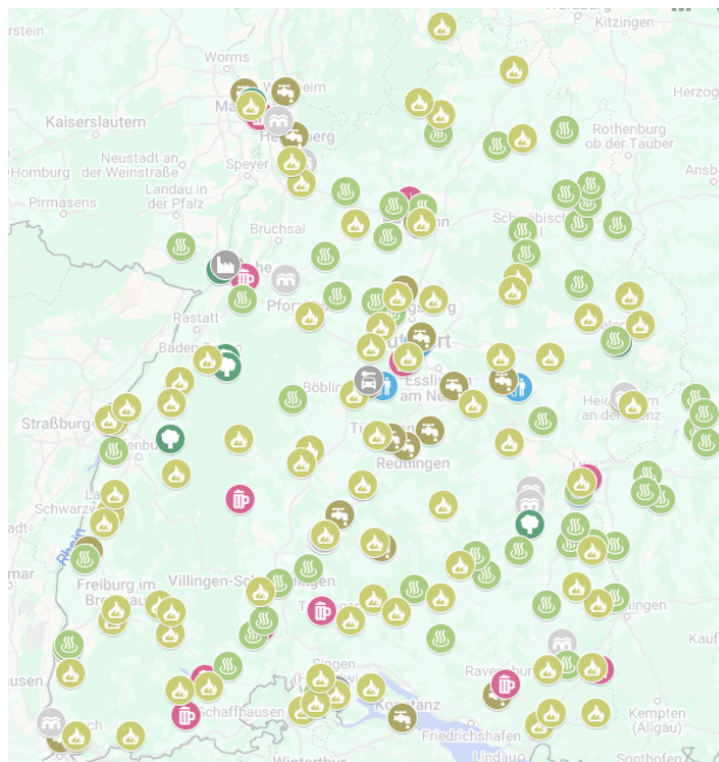


Potenzialanalyse von CCU in Baden-Württemberg

Abschlussbericht

Erstellt für das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg



Autoren: Pia Skoczinski, Kaj Seeger und Achim Raschka

September 2025

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	10
1 Einleitung	12
2 Identifizierung geeigneter CO₂-Quellen in Baden-Württemberg	12
2.1 Genutze Software und Datenbanken	13
2.2 Klassifizierung und Zuordnung der identifizierten CO ₂ -Quellen	15
2.3 Identifizierte CO ₂ -Quellen	16
2.4 Abfall und Wasser	18
2.5 Biogas- und Biomethaneinspeiseanlagen.....	20
2.6 Biomassekraftwerke	22
2.7 Eisen, Stahl und Ferrolegierung.....	23
2.8 Futter- und Nahrungsmittel.....	24
2.9 Nicht-metallische Mineralien.....	26
2.10 Sonstige	27
2.11 Zellstoff- und Papier	28
3 Technologische Konzepte für die CO₂-Umwandlung.....	30
3.1 Technologieübersicht zur Umwandlung von CO₂	30
3.1.1 Chemische Umwandlung von CO ₂	32
3.1.2 Biotechnologische Umwandlung von CO ₂	34
3.2 Steckbriefe – Chemische Umwandlung von CO₂.....	36
3.2.1 Elektrochemie	36
3.2.2 rWGS (<i>reverse Water Gas Shift</i>)	38
3.2.3 Fischer-Tropsch Synthese	40

3.2.4	Hydrierung	42
3.2.5	Mineralisierung.....	45
3.2.6	Polycarbonatsynthese	47
3.2.7	<i>Methanol-to-Olefins</i> (MTO).....	51
3.2.8	Steamcracken von CO ₂ -basiertem Naphtha.....	53
3.2.9	Polyurethane.....	55
3.2.10	Zusammenfassung der technologischen Konzepte für die chemische Umwandlung von CO ₂	57
3.3	Steckbriefe – Biotechnologische Umwandlung von CO₂.....	59
3.3.1	Acetogenes Bakteriensystem	59
3.3.2	Archaea-basiertes System.....	62
3.3.3	Cyanobakterielles System	64
3.3.4	Mikroalgen System	66
3.3.5	Zusammenfassung der technologischen Konzepte für die biotechnologische Umwandlung von CO ₂	68
4	Mögliche CO₂-Anwendungen und Wertschöpfungsketten.....	70
4.1	Produkte, Märkte und Industrien – Chemische und biotechnologische Umwandlung von CO₂	70
4.2	Wertschöpfungsketten – Chemische und biotechnologische Umwandlung von CO₂	73
4.2.1	Wertschöpfungskette 1 – Synthetische Kraftstoffe, Wachse, Naphtha, DME, Olefine und Polyolefine.....	74
4.2.2	Wertschöpfungskette 2 – Synthesegas	75
4.2.3	Wertschöpfungskette 3 – Methanol	76
4.2.4	Wertschöpfungskette 4 – Methan	77
4.2.5	Wertschöpfungskette 5 – Butanol, Ethanol und Ethylen	78
4.2.6	Wertschöpfungskette 6 – Polycarbonate, Polycarbonatpolyole und Polyurethane	79
4.2.7	Wertschöpfungskette 7 – Kohlenmonoxid	80
4.2.8	Wertschöpfungskette 8 – Kalziumkarbonat	81

4.2.9	Wertschöpfungskette 9 – Farbstoffe und Proteine	81
4.3	Akteure und potentielle Akteure im Bereich CO₂-Nutzung in Baden-Württemberg.....	82
4.3.1	Akteure im Bereich CO ₂ -Nutzung in Baden-Württemberg.....	82
4.3.2	Potentielle Akteure im Bereich CO ₂ -Nutzung in Baden-Württemberg.....	93
4.4	Bewertung der verschiedenen technologischen Konzepte zur Umwandlung von CO₂	98
4.4.1	Vollständigkeit Prozesskette und Prozesskategorisierung	98
4.4.2	Bewertungshintergrund und Methodik	106
5	Notwendige Rahmenbedingungen und Handlungsoptionen	117
5.1	Technologische Rahmenbedingungen	118
5.2	Politische / Rechtliche Rahmenbedingungen	126
5.3	Marktbezogene Rahmenbedingungen	131
5.4	Kompetenzrelevante Rahmenbedingungen	135
5.5	Handlungsoptionen und Empfehlungen.....	136
6	Fazit.....	139

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Identifizierte CO ₂ -Quellen in Baden-Württemberg und ihre totalen und biogenen CO ₂ -Emissionen.....	17
Abbildung 2: Kartierung der identifizierten CO ₂ -Quellen pro Gruppe.....	18
Abbildung 3: Kartierung der identifizierten CO ₂ -Quellen in der Gruppe Abfall und Wasser.	20
Abbildung 4: Kartierung der identifizierten CO ₂ -Quellen in der Gruppe Biogas- und Biomethaneinspeiseanlagen.....	21
Abbildung 5: Kartierung der identifizierten CO ₂ -Quellen in der Gruppe Biomassekraftwerke.	23
Abbildung 6: Kartierung der identifizierten CO ₂ -Quellen in der Gruppe Eisen, Stahl und Ferrolegierung.	24
Abbildung 7: Kartierung der identifizierten CO ₂ -Quellen in der Gruppe Futter- und Nahrungsmittel.....	26
Abbildung 8: Kartierung der identifizierten CO ₂ -Quellen in der Gruppe Nicht-metallische Mineralien.....	27
Abbildung 9: Kartierung der identifizierten CO ₂ -Quellen in der Gruppe Sonstige.....	28
Abbildung 10: Kartierung der identifizierten CO ₂ -Quellen in der Gruppe Zellstoff- und Papier.	29
Abbildung 11: Übersicht der verschiedenen CO ₂ -Umwandlungstechnologien und Produkte.....	30
Abbildung 12: Übersicht der verschiedenen CO ₂ -Umwandlungstechnologien zu Chemikalien und Polymeren.....	31
Abbildung 13: Legende – Wertschöpfungsketten.....	73
Abbildung 14: Wertschöpfungskette 1 – Synthetische Kraftstoffe, Wachse, Naphtha, DME, Olefine und Polyolefine.....	74
Abbildung 15: Wertschöpfungskette 2 – Synthesegas.....	76
Abbildung 16: Wertschöpfungskette 3 – Methanol.....	77
Abbildung 17: Wertschöpfungskette 4 – Methan.....	77
Abbildung 18: Wertschöpfungskette 5 – Butanol, Ethanol und Ethylen.....	78
Abbildung 19: Wertschöpfungskette 6 – Polycarbonate, Polycarbonatpolyole und Polyurethane.....	79
Abbildung 20: Wertschöpfungskette 7 – Kohlenmonoxid.....	81
Abbildung 21: Wertschöpfungskette 8 – Kalziumkarbonat.....	81
Abbildung 22: Wertschöpfungskette 9 – Farbstoffe und Proteine.....	82
Abbildung 23: Potenzial der technologischen Konzepte in Baden-Württemberg. Magenta: Chemische Umwandlung von CO ₂ ; Grün: Biotechnologische Umwandlung von CO ₂	116
Abbildung 24: Geplantes CO ₂ -Startnetz von OGE.....	121
Abbildung 25: Geplantes und genehmigtes H ₂ -Kernnetz in Deutschland.....	122
Abbildung 26: Geplantes und genehmigtes H ₂ -Kernnetz in Baden-Württemberg.	123

Abbildung 27: Übersicht Gesetze, Direktiven und Strategien die für CCU gelten..... 126

Abbildung 28: Themenüberblick gesellschaftliche Akzeptanz von CCU..... 134

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der verschiedenen, genutzten Datenbanken und Software zur Identifizierung von CO ₂ -Quellen.....	13
Tabelle 2: Gruppen und Zuordnung der identifizierten CO ₂ -Quellen.....	15
Tabelle 3: Identifizierte CO ₂ -Quellen pro Gruppe und CO ₂ -Emissionen.....	17
Tabelle 4: Übersicht der identifizierten CO ₂ -Quellen in der Gruppe Abfall und Wasser.....	19
Tabelle 5: Übersicht der identifizierten CO ₂ -Quellen in der Gruppe Biogas- und Biomethaneinspeiseanlagen.....	20
Tabelle 6: Übersicht der identifizierten CO ₂ -Quellen in der Gruppe Biomassekraftwerke.....	22
Tabelle 7: Übersicht der identifizierten CO ₂ -Quellen in der Gruppe Eisen, Stahl und Ferrolegierung.....	23
Tabelle 8: Übersicht der identifizierten CO ₂ -Quellen in der Gruppe Futter- und Nahrungsmittel.....	24
Tabelle 9: Übersicht der identifizierten CO ₂ -Quellen in der Gruppe Nicht-metallische Mineralien.....	26
Tabelle 10: Übersicht der identifizierten CO ₂ -Quellen in der Gruppe Sonstige.....	27
Tabelle 11: Übersicht der identifizierten CO ₂ -Quellen in der Gruppe Zellstoff- und Papier.....	29
Tabelle 12: Technologieüberblick – Chemische Umwandlung von CO ₂	32
Tabelle 13: Übersicht der verwendeten Mikroorganismen für die biotechnologische Umwandlung von CO ₂	34
Tabelle 14: Technologieüberblick – Biotechnologische Umwandlung von CO ₂	34
Tabelle 15: Vor- und Nachteile chemischer und biotechnologischer Umwandlung von CO ₂	35
Tabelle 16: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO ₂ – Elektrochemie.....	37
Tabelle 17: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO ₂ – rWGS (<i>reverse Water Gas Shift</i>).....	39
Tabelle 18: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO ₂ – Fischer-Tropsch Synthese.....	41
Tabelle 19: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO ₂ – Hydrierung zu Methan.....	43
Tabelle 20: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO ₂ – Hydrierung zu Methanol.....	44
Tabelle 21: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO ₂ – Mineralisierung.....	46
Tabelle 22: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO ₂ – Polycarbonatsynthese – Aromatische Polycarbonate.....	48
Tabelle 23: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO ₂ – Polycarbonatsynthese – Aliphatische Polycarbonate.....	49
Tabelle 24: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO ₂ – Polycarbonatsynthese – Polycarbonatpolyole.....	50
Tabelle 25: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO ₂ – <i>Methanol-to-Olefins</i> (MTO).....	52

Tabelle 26: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO ₂ – Steamcracken von CO ₂ -basiertem Naphtha.....	54
Tabelle 27: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO ₂ – Polyurethane.....	56
Tabelle 28: Zusammenfassung der technologischen Konzepte für die chemische Umwandlung von CO ₂	58
Tabelle 29: Steckbrief – Biotechnologische Umwandlung von CO ₂ – Acetogenes Bakteriensystem.....	61
Tabelle 30: Steckbrief – Biotechnologische Umwandlung von CO ₂ – Archaea-basiertes System.	63
Tabelle 31: Steckbrief – Biotechnologische Umwandlung von CO ₂ – Cyanobakterielles System.....	65
Tabelle 32: Steckbrief – Biotechnologische Umwandlung von CO ₂ – Mikroalgen System.....	67
Tabelle 33: Zusammenfassung der technologischen Konzepte für die biotechnologische Umwandlung von CO ₂	69
Tabelle 34: Übersicht Produkte, Märkte und Industrien – Chemische Umwandlung von CO ₂	70
Tabelle 35: Übersicht Produkte, Märkte und Industrien – Biotechnologische Umwandlung von CO ₂	72
Tabelle 36: Übersicht Akteure im Bereich CO ₂ -Nutzung in Baden-Württemberg.	82
Tabelle 37: Detaillierte Auflistung und Expertise der Akteure im Bereich CO ₂ -Nutzung in Baden-Württemberg – Forschungsinstitute und Universitäten.....	83
Tabelle 38: Detaillierte Auflistung und Expertise der Akteure im Bereich CO ₂ -Nutzung in Baden-Württemberg – Start-ups.....	85
Tabelle 39: Detaillierte Auflistung und Expertise der Akteure im Bereich CO ₂ -Nutzung in Baden-Württemberg – Unternehmen.	86
Tabelle 40: Detaillierte Auflistung und Expertise der Akteure im Bereich CO ₂ -Nutzung in Baden-Württemberg – Netzwerke, Stiftungen, Vereine und Verbände.....	89
Tabelle 41: Detaillierte Auflistung und Expertise der Akteure im Bereich CO ₂ -Nutzung in Baden-Württemberg – Ministerien und Stadtverwaltung.....	90
Tabelle 42: Detaillierte Auflistung und Expertise der Akteure im Bereich CO ₂ -Nutzung in Baden-Württemberg – Beratung und Finanzierung.....	90
Tabelle 43: Detaillierte Auflistung und Expertise der Akteure im Bereich CO ₂ -Nutzung in Baden-Württemberg – Parteien.....	92
Tabelle 44: Alleinige Technologieanbieter aus Wertschöpfungsketten, kein Sitz in Baden-Württemberg.	92
Tabelle 45: Übersicht potentielle Akteure im Bereich CO ₂ -Nutzung in Baden-Württemberg.....	93
Tabelle 46: Detaillierte Auflistung potentieller Akteure und Produktabnehmer im Bereich CO ₂ -Nutzung in Baden-Württemberg und anliegend – Chemische, Kunststoff und Material Industrie.	94
Tabelle 47: Detaillierte Auflistung potentieller Akteure und Produktabnehmer im Bereich CO ₂ -Nutzung in Baden-Württemberg und anliegend – Farb, Klebstoff und Lack Industrie.....	95
Tabelle 48: Detaillierte Auflistung potentieller Akteure und Produktabnehmer im Bereich CO ₂ -Nutzung in Baden-Württemberg und anliegend – Arznei, Heilmittel Industrie.....	96

Tabelle 49: Detaillierte Auflistung potentieller Akteure und Produktabnehmer im Bereich CO ₂ -Nutzung in Baden-Württemberg und anliegend – Kosmetik und Lebensmittelindustrie.	97
Tabelle 50: Prozessvollständigkeit – Chemische Umwandlung von CO ₂	99
Tabelle 51: Prozessvollständigkeit – Biotechnologische Umwandlung von CO ₂	101
Tabelle 52: Übersicht <i>Stand Alone</i> -Prozesse.	103
Tabelle 53: Übersicht <i>Multiple Step</i> -Prozesse.	105
Tabelle 54: Prozessindikator – Punktevergabe.	106
Tabelle 55: Prozessindikator – Punktevergabe für die verschiedenen technologischen Konzepte.	106
Tabelle 56: TRL-Indikator – Punktevergabe.	107
Tabelle 57: TRL-Indikator – Punktevergabe für die verschiedenen technologischen Konzepte.	108
Tabelle 58: Energieaufwandindikator – Punktevergabe.	108
Tabelle 59: Energieaufwandindikator – Punktevergabe für die verschiedenen technologischen Konzepte.	109
Tabelle 60: Strominputindikator – Punktevergabe.	110
Tabelle 61: Strominputindikator – Punktevergabe für die verschiedenen technologischen Konzepte.	110
Tabelle 62: Indikator für Anzahl CO ₂ -basierter Hauptprodukte, Folgeprodukte und Produktabnehmer – Punktevergabe.	111
Tabelle 63: Indikator für Anzahl CO ₂ -basierter Hauptprodukte – Punktevergabe für die verschiedenen technologischen Konzepte.	111
Tabelle 64: Indikator für Anzahl CO ₂ -basierter Folgeprodukte / Verwendungsoptionen – Punktevergabe für die verschiedenen technologischen Konzepte.	112
Tabelle 65: Indikator für Anzahl Produktabnehmer – Punktevergabe für die verschiedenen technologischen Konzepte.	112
Tabelle 66: Gesamtbewertung der technologischen Konzepte.	114
Tabelle 67: Notwendige Rahmenbedingungen für die Etablierung von CCU in Baden-Württemberg.	117
Tabelle 68: Zusätzlich benötigte Rohstoffe und vor- und nachgeschaltete Prozesse.	119
Tabelle 69: In Betrieb befindliche H ₂ -Pipelines.	121
Tabelle 70: Geplantes und genehmigtes H ₂ -Kernnetz in Baden-Württemberg.	123
Tabelle 71: Beispiele für CO ₂ -Modellregionen / -Projekte / -Initiativen in Deutschland und Europa.	124
Tabelle 72: Weltweite Kapazitäten für CO ₂ -Produkte.	132
Tabelle 73: Preispannen und Durchschnittspreise für H ₂ in Europa.	133

Zusammenfassung

Die vorliegende Potenzialanalyse von *Carbon Capture & Utilisation* (CCU) in Baden-Württemberg betrachtet CCU als eine der drei zentralen Säulen (neben Biomassenutzung und Recycling) einer nachhaltigen, fossilfreien chemischen Industrie der Zukunft in Baden-Württemberg. Angesichts der Tatsache, dass 70 % der Treibhausgasemissionen aus fossilem Kohlenstoff stammen, ist der Übergang zu einem Kohlenstoffkreislauf in der Chemie- und Werkstoffindustrie essentiell für die Defossilisierung. In dieser Analyse werden zunächst geeignete Abgas-Punktquellen für Kohlenstoff (im Folgenden kurz: CO₂-Quellen genannt) in der Region identifiziert und nach Industriezweigen wie z. B. Abfall und Wasser, Biomassekraftwerke sowie Zellstoff- und Papierindustrie kategorisiert. Des Weiteren werden technologische Konzepte zur chemischen und biotechnologischen CO₂-Umwandlung detailliert erläutert, in spezifische Wertschöpfungsketten eingeordnet und deren Potenzial zur Etablierung von CCU anhand verschiedener Indikatoren bewertet. Darüber hinaus werden die relevanten, derzeit aktiven, sowie potentielle zukünftige Akteure im CCU-Bereich in Baden-Württemberg identifiziert und aufgelistet. Abschließend werden sowohl die notwendigen Rahmenbedingungen (technologisch, politisch/rechtlich, marktbezogen, kompetenzrelevant) als auch konkrete Handlungsoptionen und Empfehlungen für die erfolgreiche Etablierung von CCU-Technologien in der Region dargelegt.

Identifizierte CO₂-Quellen in Baden-Württemberg

Im Fokus der Analyse stehen dauerhaft verfügbare CO₂-Punktquellen (biogen, teilbiogen und andere Quellen mit dem Potenzial, längerfristig als Punktquellen nutzbar zu sein) mit CO₂-Emissionen von mindestens 10.000 Tonnen pro Jahr. Einzelne kleinere relevante Anlagen (ab 1.000 Tonnen/Jahr) werden zusätzlich berücksichtigt. Insgesamt konnten 196 Anlagen identifiziert werden. Die Gesamt-CO₂-Emissionen dieser Punktquellen belaufen sich auf rund 11 Millionen Tonnen, wovon 2,6 Millionen Tonnen als biogene Emissionen ausgewiesen sind. Allerdings kann die tatsächliche biogene Gesamt-CO₂-Menge höher liegen, da nicht für alle CO₂-Quellen und Anlagen Daten verfügbar sind.

Die höchsten Gesamt-CO₂-Emissionen stammen aus der Verarbeitung/Herstellung von nicht-metallischen Mineralien (Zementwerke, Kalk, Glasherstellung) mit 3,5 Millionen Tonnen. Sonstige Quellen, wie die Mineralölraffinerie Oberrhein (Miro) und die Daimler AG haben 2,8 Millionen Tonnen fossile Gesamt-CO₂-Emissionen. An dritter Stelle folgen die Quellen Abfall und Wasser (Müllverbrennungsanlagen, kommunale Abwasserbehandlungsanlagen) mit 1,7 Millionen Tonnen Gesamt-CO₂-Emissionen (davon ca. 760.000 Tonnen biogen) und Biomassekraftwerke mit 1,4 Millionen Tonnen Gesamt-CO₂-Emissionen, die nahezu 100 % biogen sind.

Technologische Konzepte und deren Bewertung

Die betrachteten technologischen Konzepte für die CO₂-Umwandlung weisen einen *Technology Readiness Level* (TRL) von mindestens 5 auf und beinhalten Verfahren zur chemischen und biotechnologischen CO₂-Umwandlung. Die chemische CO₂-Umwandlung umfasst Prozesse wie die rWGS -Reaktion (*reverse Water Gas Shift*) zur Herstellung von Synthesegas, die Fischer-Tropsch Synthese zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen, Wachsen und Naphtha, die Hydrierung zur Herstellung von Methan oder Methanol, die Mineralisierung zur Bildung von Kalziumkarbonat, sowie die Polycarbonat- und Polyurethansynthese. Die biotechnologische CO₂-Umwandlung nutzt Biokatalysatoren wie acetogene Bakterien (z. B. für Ethanol, Butanol), Archaeen (z. B. für Methan) oder Mikroalgen (z. B. für Farbstoffe und Proteine). Ein wesentlicher Vorteil biotechnologischer Verfahren ist die Möglichkeit, gemischte Abgase, die neben CO₂, auch H₂, N₂, CO oder weitere Bestandteile enthalten, zu verwenden, während die chemische

Umwandlung oft hochreines CO₂ erfordert.

Die technologischen Konzepte wurden anhand eines festgesetzten Bewertungsschemas, welches sieben Indikatoren beinhaltet, bewertet. So konnte den einzelnen technologischen Konzepten pro Indikator eine Punktzahl zugeordnet werden. Die maximal erreichbare Punktzahl lag bei 52,5 Punkten. Die Fischer-Tropsch Synthese zeigte das höchste Potenzial mit 36,5 Punkten. Obwohl es sich um einen *Multiple Step*-Prozess handelt (benötigt vorgeschaltete rWGS zur Synthesegasherstellung), weist es einen hohen TRL von 9 auf und der Energieaufwand ist vergleichsweise gering (3,4 MWh/Tonne Produkt, exklusive Synthesegasproduktion). Die Hydrierung lag mit 35,5 Punkten auf dem zweiten Platz. Die Hydrierung ist ein *Stand Alone*-Prozess (benötigt H₂) und generiert mit 17 Verwendungsoptionen eine hohe Anzahl an Folgeprodukten (z. B. Methanol, Essigsäure, Formaldehyd).

Das acetogene Bakteriensystem belegte mit 30,5 Punkten Platz 5. Dieses biotechnologische Konzept verzeichnet die höchste Anzahl an potenziellen Produktabnehmern in Baden-Württemberg (34), insbesondere in der Lack-, Arznei- und Heilmittelindustrie, die Butanol und Ethanol als Lösungsmittel nachfragen.

Akteure und Wertschöpfungsketten

Es wurden neun Wertschöpfungsketten auf Basis der CO₂-Hauptprodukte erstellt. In Baden-Württemberg und den umliegenden Regionen wurden 137 aktive oder potentiell interessierte Akteure identifiziert. Dazu zählen Forschungseinrichtungen (z. B. KIT, Fraunhofer ISE/IGB), Start-ups (z. B. INERATEC für rWGS/Fischer-Tropsch Synthese, ICODOS für Methanol-Hydrierung) und Unternehmen (z. B. Mineralölraffinerie Oberrhein (Miro), Flughafen Stuttgart, Schwenk Zement).

Notwendige Rahmenbedingungen und Handlungsempfehlungen

Die Etablierung von CCU in Baden-Württemberg erfordert die Schaffung spezifischer Rahmenbedingungen durch entsprechende Handlungsoptionen technologischer, politisch/rechtlicher und kompetenzrelevanter Natur. Was die technologischen Handlungsempfehlungen betrifft, so muss a) eine konsistente Strategie für erneuerbare Energien und grünen Wasserstoff sichergestellt werden, b) eine H₂-Infrastruktur etabliert werden (das geplante H₂-Kernnetz in Baden-Württemberg umfasst 556,5 km), c) eine CO₂-Infrastruktur etabliert werden, da derzeit weder in Baden-Württemberg noch in Deutschland eine CO₂-Pipeline in Betrieb ist, und d) eine gleichwertige Förderung der chemischen und biotechnologischen CO₂-Umwandlung gewährleistet sein.

Die notwendigen politischen / rechtlichen Handlungsempfehlungen umfassen a) das Einsetzen für eine schnelle Verabschiedung des novellierten Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes (KSpTG) im Bundesrat durch die Landesregierung, b) sollten die Finanzierungsmöglichkeiten des EU *Clean Industrial Deal State Aid Framework* (CISAF) und des *Net Zero Industry Act* (NZIA) vollständig genutzt werden, und c) die Klärung der Zertifizierung von CO₂-Stoffströmen und schneller, einheitlicher Genehmigungsverfahren für Anlagen und Infrastruktur, sowie die d) Stärkung der lokalen Nachfrage durch Programme der öffentlichen Beschaffung (z. B. im Bausektor).

Als kompetenzrelevante Handlungsoption wird eine enge Abstimmung und Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Ministerien in Baden-Württemberg, die für CCU relevant sind, empfohlen. Zudem die Etablierung und Erweiterung eines CCU-Netzwerks / Stakeholder-Austauschs, beispielsweise durch Nutzung der Carbon Management Geschäftsstelle der Umwelttechnik BW und die offenere Gestaltung der Förderung und Informationsbereitstellung von CCU auch abseits des starken Fokus auf die biotechnologische CO₂-Nutzung.

1 Einleitung

Carbon Capture & Utilisation (CCU) ist viel mehr als nur eine Technologie zur Reduzierung von CO₂: Es ist eine der drei Säulen einer nachhaltigen, fossilfreien chemischen Industrie der Zukunft. 70 % der Treibhausgasemissionen stammen aus fossilem Kohlenstoff, der für Energie und Chemieprodukte aus dem Boden gewonnen wird. Für den Energiesektor gibt es mit erneuerbaren Energien eine gute Strategie zur Dekarbonisierung. Für Chemikalien und Materialien kann dies jedoch nicht funktionieren, da die meisten von ihnen auf Kohlenstoff basieren und die Nachfrage nach Kohlenstoff für diese weiterhin vorhanden ist und sogar steigt. Die zentrale Herausforderung besteht also darin, den Kohlenstoffbedarf mit alternativen Quellen zu decken. Biomasse, CO₂ und das Recycling kohlenstoffhaltiger Abfallströme (Bio- und Kunststoffabfälle) sind erforderlich, um fossilen Kohlenstoff mit diesen erneuerbaren Kohlenstoffquellen zu ersetzen. Das Äquivalent zur Dekarbonisierung im Energiesektor ist also ein Übergang zu erneuerbarem Kohlenstoff in der Chemie- und Werkstoffindustrie – und beides bedeutet eine Defossilisierung.

Mehrere Zukunftsszenarien für eine klimaneutrale chemische Industrie im Jahr 2050 zeigen, dass 25 bis 30 % der Nachfrage nach Chemikalien und Materialien aus der Verwendung von CO₂ stammen können. Das Potenzial von CCU wurde bereits von mehreren globalen Marken erkannt, die ihr Rohstoffportfolio entsprechend erweitern. Entlang der Wertschöpfungskette ist eine Zusammenarbeit entscheidend, um Kosten und Nutzen in Einklang zu bringen.

Auch politisch gibt es verschiedenen Strategien, Gesetze und Direktiven, die CCU als förderungswürdige strategische Netto-Null-Technologie ansehen und damit eine offizielle Referenz und Grundlage für die Unterstützung und Förderung des Einsatzes sauberer Technologien wie CCU in ganz Europa bieten.

Das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg hat diese vorliegende Studie in Auftrag gegeben, um die Potenziale für *Carbon Capture & Utilisation* (CCU) in Baden-Württemberg im Hinblick auf den Transformationsprozess zu einem klimaneutralen und zirkulären Wirtschaften darstellt und auf deren Basis Handlungsempfehlungen für die Landesregierung entwickelt werden können. Nach Darstellung der aktuellen Marktbedingungen im Bereich CCU in Baden-Württemberg wird analysiert, welche Rolle diese Technologie in Baden-Württemberg künftig spielen kann und welche durch die Landesregierung umsetzbaren Rahmenbedingungen / Marktanreize notwendig und umsetzbar sind, um entsprechende CCU-Projekte im Land realisieren zu können.

2 Identifizierung geeigneter CO₂-Quellen in Baden-Württemberg

Der Fokus für die Identifizierung geeigneter CO₂-Quellen für die CO₂-Nutzung in Baden-Württemberg liegt auf dauerhaft verfügbaren Punktquellen und nicht auf solchen Quellen, die planmäßig im Rahmen des Kohleausstiegs wegfallen (z. B. Kraftwerke). Zu diesen dauerhaft verfügbaren Punktquellen zählen sowohl biogene, teilbiogene als auch andere Quellen mit dem Potenzial, längerfristig als Punktquellen nutzbar zu sein. Biogene CO₂-Quellen sind Anlagen der Bioethanolproduktion, der Zellstoff- und Papierproduktion, der Lebens- und Futtermittelproduktion, Brauereien und die anaerobe Vergärung im Rahmen der Biogasherstellung. Zu teilbiogenen und andere CO₂-Quellen gehören Müllverbrennungsanlagen und andere Anlagen mit Emissionen, die nur teilweise oder nicht biogen sind, bsp. Anlagen der Zement- und Kalkindustrie, Raffinerien und Eisen- und Stahlwerke. Als geeignete CO₂-Quellen wurden Anlagen mit einer

CO₂-Emissionsmenge von mindestens 10.000 Tonnen CO₂ pro Jahr festgelegt. Darüber hinaus werden exemplarisch auch kleinere Anlagen mit einer Emissionsmenge von mehr als 1.000 Tonnen CO₂ pro Jahr betrachtet, wenn diese als relevant eingeschätzt werden (z. B. größere Biogasanlagen, Klärschlammverbrennung, Brauereien). Anzumerken ist, dass ebenfalls ganze Abgasströme, die Kohlenstoff in Form von CO₂, aber auch CO enthalten, wie im Falle von z. B. Müllverbrennungsanlagen oder Kläranlagen, verwertet werden können und deshalb ebenfalls Bestandteil dieser Studie sind.

2.1 Genutze Software und Datenbanken

Für die Identifizierung der CO₂-Quellen werden frei verfügbare Datenbanken und Informationen zu CO₂-Emissionen sowie interne Datenbanken und Tools verwendet. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der fünf verschiedenen Datenbanken und der Software, die genutzt werden, um die in Baden-Württemberg vorhandenen geeigneten CO₂-Quellen zu identifizieren.

Tabelle 1: Übersicht der verschiedenen, genutzten Datenbanken und Software zur Identifizierung von CO₂-Quellen.

Datenbank / Software	Referenz	Informationen
CaptureMap (Software)	https://www.capturemap.no	Kostenpflichtige Software, die CO ₂ -Emittenten und deren CO ₂ -Emissionen auf Anlagenebene in globalem Maßstab kartiert. Diese Software nutzt Daten aus der deutschen (Thru.de), sowie europäischen Emissionsdatenbank (European Industrial Emissions Portal), dem EU Emissions Trading System (EU ETS) und anderen weltweiten Datenbanken nutzt.
Thru.de (Umweltdaten)	https://app.thru.de/karte/	Frei verfügbare deutsche Emissionsdatenbank (früher: Pollutant Release and Transfer Register (PRTR)) für Emissionen von Industriebetrieben in Luft, Wasser und Boden, Abwasser und deren entsorgte Abfallmengen. Grundsätzlich müssen alle Betriebe über ihre Schadstoffemissionen berichten, die eine Tätigkeit ausüben, die die EU in der Europäischen E-PRTR-Verordnung nennt. Berichtspflichtig sind etwa Kraftwerke, Raffinerien, Chemiebetriebe oder die Lebensmittelindustrie, aber auch Deponien und Kläranlagen. Diese Betriebe müssen aber nur dann über ihre Freisetzungen berichten, wenn sie eine gewisse Kapazität überschreiten und wenn sie zudem eine erhebliche Menge eines Schadstoffs in die Umwelt freisetzen oder sehr viel Abfall außerhalb ihres Betriebes entsorgen.
LUBW (Kartendienst)	https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/	Verzeichnis der Biomassefeuerungsanlagen in Baden-Württemberg.

<p>Fachverband Biogas (Anlagenregister)</p>	<p>https://members.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE-Alle-Betreiber-sortiert-nach-Betreiber</p>	<p>Anlagenregister (Selbstverzeichnis) Störfallverordnung von Biogasanlagen in Deutschland. Mengenschwelle 10 t/d Biogas.</p>
<p>dena Biomethaneinspeiseatlas</p>	<p>https://www.dena.de/biogas-partner/biomethan/einspeiseatlas/</p>	<p>Übersicht bestehender und geplanter Biomethananlagen in Deutschland.</p>
<p>LUBW (Energieatlas)</p>	<p>https://www.energieatlas-bw.de/biomasse/bestehende-biogasanlagen#Teaser_Anker</p>	<p>Übersicht bestehender und geplanter Biomethananlagen in Deutschland.</p>

CaptureMap ist eine kostenpflichtige Software, die CO₂-Emittenten und deren CO₂-Emissionen auf Anlagenebene in globalem Maßstab kartiert. Diese Software nutzt Daten aus der deutschen (Thru.de), sowie europäischen Emissionsdatenbank (European Industrial Emissions Portal), dem EU Emissions Trading System (EU ETS) und anderen weltweiten Datenbanken. Durch den Abgleich und die Verrechnung der pro Anlage verzeichneten Gesamt-CO₂-Emissionen in den jeweiligen europäischen Emissionsdatenbanken und der fossilen CO₂-Emissionen können in dieser Software ebenfalls die (kalkulierten) biogenen CO₂-Emissionen angegeben werden. Im **Thru.de**, der freiverfügbaren deutschen Emissionsdatenbank (früher: Pollutant Release and Transfer Register (PRTR)), ist dies nicht der Fall. Hier werden lediglich Gesamt-CO₂-Emissionen der einzelnen Anlagen verzeichnet und nicht auch die biogenen CO₂-Emissionen, wenn diese denn vom Betreiber angegeben worden sind. Generell ist Thru.de eine Datenbank für verschiedene Emissionen: Emissionen von Industriebetrieben in Luft, Wasser und Boden, Abwasser und deren entsorgte Abfallmengen. Grundsätzlich müssen alle Betriebe über ihre Schadstoffemissionen berichten, die eine Tätigkeit ausüben, die die EU in der Europäischen E-PRTR-Verordnung nennt. Berichtspflichtig sind etwa Kraftwerke, Raffinerien, Chemiebetriebe oder die Lebensmittelindustrie, aber auch Deponien und Kläranlagen. Diese Betriebe müssen aber nur dann über ihre Freisetzung berichten, wenn sie eine gewisse Kapazität überschreiten und wenn sie zudem eine erhebliche Menge eines Schadstoffs in die Umwelt freisetzen oder sehr viel Abfall außerhalb ihres Betriebes entsorgen.

Schwierigkeiten gibt es bei der Identifizierung und Kartierung von Biogasanlagen und der von ihnen emittierten biogenen CO₂-Menge, da diese Anlagen nicht flächendeckend in öffentlich zugänglichen verfügbaren Datenbanken (z. B. <https://app.thru.de/karte/>) registriert sind. Deswegen wird hier das Anlagenregister (Selbstverzeichnis) Störfallverordnung von Biogasanlagen in Deutschland des **Fachverbandes Biogas** genutzt. Hier sind zwar keine CO₂-Emissionsmengen verzeichnet, aber die produzierte Menge an Biogas, woraus sich die emittierten CO₂-Mengen berechnen lassen. Diese Anlagen und Daten wurden dann mit den Daten im **dena Biomethaneinspeiseatlas** und den Baden-Württemberg-

spezifischen Daten zu Biogas- und Biomethaneinspeiseanlagen des **Energieatlas der LUBW** (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg) abgeglichen und vervollständigt. Somit ist zwar keine Vollständigkeit aller Biogas- und Biomethaneinspeiseanlagen in Baden-Württemberg gegeben, aber eine große Annäherung an diese durch die Analyse aller frei zugänglichen Datenbanken für Biogas- und Biomethaneinspeiseanlagen.

Alle in Baden-Württemberg sich in Betrieb befindlichen Biomassekraftwerke oder Biomassefeuerungsanlagen sind im **Kartendienst des LUBW** mit ihren Gesamt-CO₂-Emissionen, die in diesem Fall den biogenen CO₂-Emissionen entspricht, verzeichnet.

2.2 Klassifizierung und Zuordnung der identifizierten CO₂-Quellen

Zu den im Fokus der zu identifizierenden CO₂-Quellen in Baden-Württemberg liegenden dauerhaft verfügbaren Punktquellen zählen sowohl biogene, teilbiogene als auch andere Quellen mit dem Potenzial, längerfristig als Punktquellen nutzbar zu sein. Diese CO₂-Quellen sind je nach verwendeter Datenbank und Software (2.1; Tabelle 1) unterschiedlich benannt. Tabelle 2 zeigt die in dieser Analyse erstellten Gruppen gemäß der Klassifizierung / Zuordnung der einzelnen CO₂-Quellen in den jeweiligen Datenbanken und Software.

Tabelle 2: Gruppen und Zuordnung der identifizierten CO₂-Quellen.

CO ₂ -Quelle	Informationen
Abfall und Wasser	Beinhaltet Müllverbrennungsanlagen für die Verbrennung nicht gefährlicher Abfälle > 3 t/h, Beseitigung oder Verwertung von gefährlichen Abfällen > 10 t/d. Beinhaltet Kommunale Abwasserbehandlungsanlagen > 100.000 Einwohnergleichwerten mit > 1.000 Tonnen CO ₂ -Emissionen.
Biogas- und Biomethaneinspeiseanlagen	Beinhaltet Biogasanlagen und Biomethaneinspeiseanlagen mit > 1.000 Tonnen CO ₂ -Emissionen. Hofbiogasanlagen, meist mit einer Leistung von 75 kW und einer resultierenden CO ₂ -Emissionsmenge von < 100 Tonnen sind nicht enthalten.
Biomassekraftwerke	Beinhaltet Biomassefeuerungsanlagen.
Eisen, Stahl und Ferrolegierung	Beinhaltet Eisen- und Stahlwerke, sowie Gießereien.
Futter- und Nahrungsmittel	Beinhaltet Anlagen zur Herstellung von Futter- und Nahrungsmittel, z. B. Molkereien und Molkeverarbeitungsanlagen und Zuckerfabriken und Brauereien.
Nicht-metallische Mineralien	Beinhaltet Zementwerke und Kalkverarbeitende Industrie, für die Herstellung von Zementklinker > 500 t/d in Drehrohröfen oder > 50 t/d in anderen Öfen oder Herstellung von Kalk > 50 t/d. Herstellung von

	Glas und Glasfasern >20 t/d. Schmelzen mineralischer Stoffe und Herstellung v. Mineralfasern > 20 t/d.
Sonstige	Beinhaltet Mineralöl- und Gasraffinerien. Automobilhersteller.
Zellstoff und Papier	Beinhaltet Zellstoff-, Papier- und Kartonfabriken für die Herstellung von Papier und Pappe und sonstigen primären Holzprodukten > 20 t/d.

Müllverbrennungsanlagen und kommunale Abwasserbehandlungsanlagen sind in der Gruppe **Abfall und Abwasser** enthalten. Hier fallen Müllverbrennungsanlagen für die Verbrennung nicht gefährlicher Abfälle > 3 t/h und der Beseitigung oder Verwertung von gefährlichen Abfällen > 10 t/d darunter, sowie kommunale Abwasserbehandlungsanlagen > 100.000 Einwohnergleichwerten mit > 1.000 Tonnen CO₂-Emissionen. Die Gruppe **Biogas- und Biomethaneinspeiseanlagen** beinhaltet Biogasanlagen und Biomethaneinspeiseanlagen mit > 1.000 Tonnen CO₂-Emissionen. Hofbiogasanlagen, meist mit einer Leistung von 75 kW und einer resultierenden CO₂-Emissionsmenge von < 100 Tonnen, sind nicht enthalten, da sie unter den festgelegten CO₂-Emissionsschwellenwert von 1.000 Tonnen fallen. Biomassefeuerungsanlagen sind in der Gruppe **Biomassekraftwerke** verzeichnet. Eisen- und Stahlwerke sowie Gießereien sind unter **Eisen, Stahl und Ferrolegierung** zusammengefasst. Die Gruppe **Futter- und Nahrungsmittel** beinhaltet Anlagen zur Herstellung von Futter- und Nahrungsmitteln, z. B. Molkereien und Molkeverarbeitungsanlagen und Zuckerfabriken und Brauereien. Unter **Nicht-metallische Mineralien** fallen Zementwerke und die kalkverarbeitende Industrie, für die Herstellung von Zementklinker > 500 t/d in Drehrohröfen oder > 50 t/d in anderen Öfen oder Herstellung von Kalk > 50 t/d. Herstellung von Glas und Glasfasern >20 t/d. Schmelzen mineralischer Stoffe und Herstellung v. Mineralfasern > 20 t/d. Mineralöl- und Gasraffinerien sowie Automobilhersteller sind unter **Sonstige** zusammengefasst. Die Gruppe **Zellstoff und Papier** beinhaltet Zellstoff-, Papier- und Kartonfabriken für die Herstellung von Papier und Pappe und sonstigen primären Holzprodukten > 20 t/d.

2.3 Identifizierte CO₂-Quellen

Die Gesamt-CO₂-Emissionen der als dauerhaft verfügbar identifizierten CO₂-Punktquellen (196 Anlagen) liegen bei rund 11 Millionen Tonnen, biogene CO₂-Emissionen liegen bei 2,6 Millionen Tonnen (Tabelle 3).

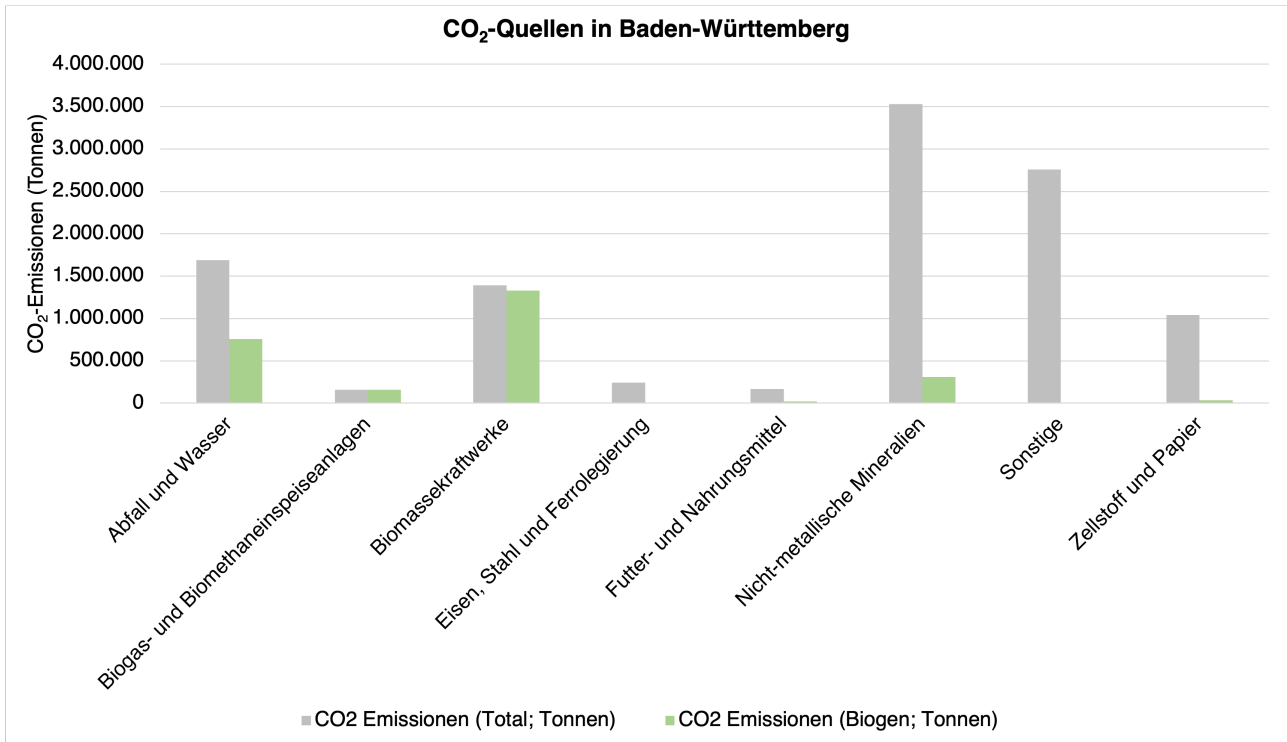


Abbildung 1: Identifizierte CO₂-Quellen in Baden-Württemberg und ihre totalen und biogenen CO₂-Emissionen.

Bei dem Volumen der biogenen CO₂-Emissionen ist zu beachten, dass, wie in Kapitel 2.1 bereits erwähnt, nicht von allen identifizierten CO₂-Quellen die biogene CO₂-Emissionsmenge bekannt ist und somit die eigentliche biogene Gesamt-CO₂-Menge deutlich höher liegen kann. Die höchsten Gesamt-CO₂-Emissionen, mit 3,5 Millionen Tonnen stammen von Zementwerken und der kalkverarbeitenden Industrie, sowie aus der Glasherstellung (Nicht-metallische Mineralien, Abbildung 1; Tabelle 3), gefolgt von der Mineralölraffinerie Miro und der Daimler AG (Sonstige) mit 2,8 Millionen Tonnen.

Tabelle 3: Identifizierte CO₂-Quellen pro Gruppe und CO₂-Emissionen.

CO ₂ -Quelle	Anzahl Anlagen	CO ₂ -Emissionen (Total; Tonnen)	CO ₂ -Emissionen (Biogen; Tonnen)
Abfall und Wasser	28	1.687.906	757.000
Biogas- und Biomethaneinspeiseanlagen	55	158.618	158.618
Biomassekraftwerke	77	1.393.097	1.330.098
Eisen, Stahl und Ferrolegierung	2	242.843	k.A.
Futter- und Nahrungsmittel	13 (33)	167.310	20.840
Nicht-metallische Mineralien	11 (1)	3.530.000	309.000
Sonstige	2	2.759.000	0

Zellstoff und Papier	8	1.040.000	33.000
Total	196	10.978.775	2.608.556

Müllverbrennungsanlagen und kommunale Abwasserbehandlungsanlagen kommen auf eine Gesamt-CO₂-Emissionsmenge von 1,7 Millionen Tonnen und Biomassekraftwerke mit fast 100 % biogenen CO₂-Emissionen emittieren 1,4 Millionen Tonnen. Einen ebenfalls großen Emissionsanteil hat die Gruppe Zellstoff und Papier mit 1 Millionen Tonnen Gesamt-CO₂-Emissionen. Biogas- und Biomethaneinspeiseanlagen, Futter und Nahrungsmittel sowie Eisen, Stahl und Ferrolegierungen haben jeweils Gesamt-CO₂-Emissionen von unter 300.000 Tonnen. Eine ausführliche Übersicht der identifizierten Anlagen, deren Adressen, totalen und biogenen CO₂-Emissionen, Referenzjahr und Datenbank ist in der begleitenden *Excel-tabelle 25-08-05_Modul 1* enthalten. Diese identifizierten 196 Anlagen wurden ebenfalls kartiert, um eine Übersicht zur regionalen Verteilung zu erhalten (Abbildung 2).

Abfall und Wasser



Abfall



Wasser



Eisen, Stahl und Ferrolegierung

Futter- und Nahrungsmittel



Futter- und Nahrungsmittel



Brauereien



Nicht-metallische Mineralien

Sonstige



Raffinerie



Automobilhersteller



Biogas- und Biomethaneinspeiseanlagen



Biomassekraftwerke



Zellstoff und Papier

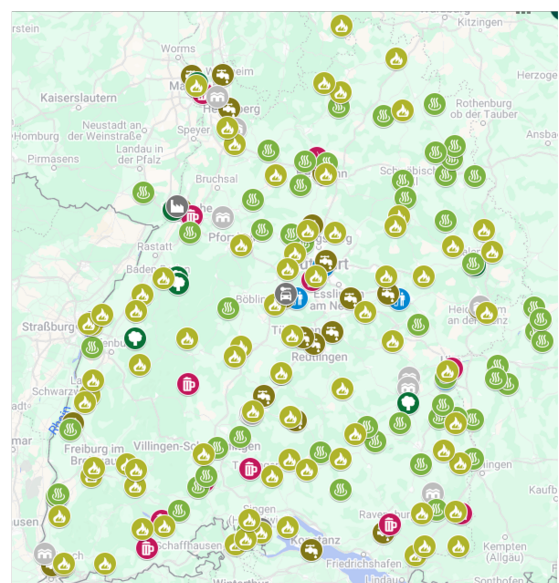


Abbildung 2: Kartierung der identifizierten CO₂-Quellen pro Gruppe.

2.4 Abfall und Wasser

In der Gruppe Abfall und Wasser wurden 28 Anlagen identifiziert, davon sechs Müllverbrennungsanlagen und 26 kommunale Abwasserbehandlungsanlagen (Tabelle 4; Abbildung 3). Die Gesamt-CO₂-Emissionen liegen bei 1,7 Millionen Tonnen, die biogenen CO₂-Emissionen bei ca. 760.000 Tonnen (Tabelle 4).

Tabelle 4: Übersicht der identifizierten CO₂-Quellen in der Gruppe Abfall und Wasser.

CO ₂ -Quelle	Anzahl Anlagen	CO ₂ -Emissionen (Total; Tonnen)	CO ₂ -Emissionen (Biogen; Tonnen)
Abfall und Wasser	28	1.687.906	757.000
Definition	<p><u>Abfall:</u> Beinhaltet Müllverbrennungsanlagen für die Verbrennung nicht gefährlicher Abfälle > 3 t/h, Beseitigung oder Verwertung von gefährlichen Abfällen > 10 t/d.</p> <p><u>Wasser:</u> Beinhaltet Kommunale Abwasserbehandlungsanlagen > 100.000 Einwohnergleichwerten mit > 1.000 Tonnen CO₂-Emissionen.</p>		
Referenz	<p><u>Abfall:</u> https://app.thru.de/detail-suche/suche Referenzjahr: 2021-2023 Bundesland: Baden-Württemberg Freisetzung / Stoff in Luft: Kohlenstoffdioxid (CO₂)</p> <p><u>Wasser:</u> https://app.thru.de/detail-suche/suche Referenzjahr: 2015, 2023 Bundesland: Baden-Württemberg Branche und Tätigkeit: Abfall- und Abwasserbewirtschaftung, Kommunale Abwasserbehandlungsanlagen > 100 000 Einwohnergleichwerten http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/documents/10184/519877/Abwasseranteile_MNQ_MQ_JAWM_2015.xlsx/12ae259d-bad9-4b8a-8610-967f09e631be</p>		
Zusätzliche Informationen	<p><u>Abfall:</u> Teilweise sind die Volumina biogener CO₂-Emissionen pro Anlage verfügbar, teilweise nicht. Nähere Informationen sind der begleitenden <i>Excel-tabelle</i> zu entnehmen.</p> <p><u>Wasser:</u> Die CO₂-Emissionen wurden anhand der durchschnittlichen Abwassermenge von 2010-2014 berechnet (0,1 kg CO₂ pro m³ Abwasser). Kläranlagen mit berechneten CO₂-Emissionen < 1.000 Tonnen sind nicht enthalten.</p>		

Für Müllverbrennungsanlagen sind für die CO₂-Emissionen die Referenzjahre 2021 bis 2023 angegeben. In diesen Datensätzen der jeweiligen verwendeten Datenbank (Tabelle 4) sind teilweise die Volumina biogener CO₂-Emissionen pro Anlage verfügbar, teilweise nicht. Nähere Informationen sind der begleitenden

Excelltabelle 25-08-05_Modul 1 zu entnehmen. Die CO₂-Emissionen für kommunale Abwasserbehandlungsanlagen stammen aus den Jahren 2015 und 2023 (Tabelle 4) und wurden anhand der durchschnittlichen Abwassermenge von 2010 bis 2014 berechnet (0,1 kg CO₂ pro m³ Abwasser). Kommunale Abwasserbehandlungsanlagen mit berechneten CO₂-Emissionen < 1.000 Tonnen sind nicht enthalten.

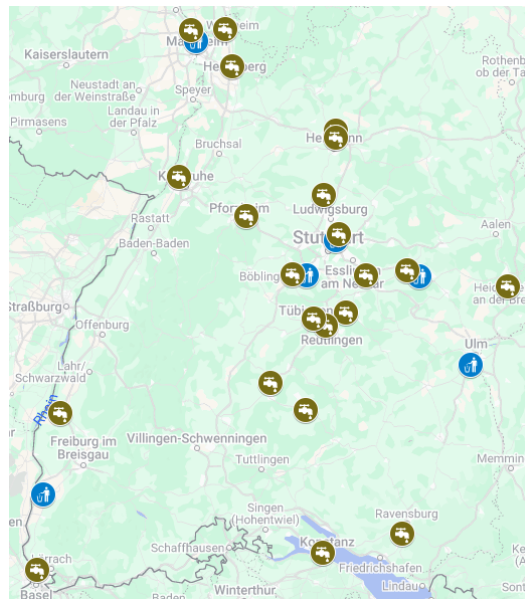


Abbildung 3: Kartierung der identifizierten CO₂-Quellen in der Gruppe Abfall und Wasser.

2.5 Biogas- und Biomethaneinspeiseanlagen

In der Gruppe Biogas- und Biomethaneinspeiseanlagen wurden 55 Anlagen identifiziert, davon 36 Biogasanlagen und 19 Biomethaneinspeiseanlagen (Tabelle 5; Abbildung 4). Die Gesamt-CO₂-Emissionen liegen bei ca. 160.000 Tonnen was den biogenen CO₂-Emissionen entspricht (Tabelle 5).

Tabelle 5: Übersicht der identifizierten CO₂-Quellen in der Gruppe Biogas- und Biomethaneinspeiseanlagen.

CO ₂ -Quelle	Anzahl Anlagen	CO ₂ -Emissionen (Total; Tonnen)	CO ₂ -Emissionen (Biogen; Tonnen)
Biogas- und Biomethaneinspeiseanlagen	55	158.618	158.618
Definition	Beinhaltet Biogasanlagen und Biomethaneinspeiseanlagen mit > 1.000 Tonnen CO ₂ -Emissionen. Hofbiogasanlagen, meist mit einer Leistung von 75 kW und einer resultierenden CO ₂ -Emissionsmenge von < 100 Tonnen sind nicht enthalten.		
Referenz	https://members.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE-Alle-Betreiber-sortiert-nach-Betreiber ; https://www.dena.de/biogaspartner/biomethan/einspeiseatlas/ ; https://www.energieatlas-bw.de/biomasse/bestehende-biogasanlagen#Teaser_Anker ;		

	Referenzjahr: 2015, 2025
Zusätzliche Informationen	<p>Die totalen CO₂-Emissionen entsprechen den biogenen CO₂-Emissionen. CO₂-Emissionen wurden kalkuliert, unter der Annahme von einen CO₂-Durchschnittsgehalt im Biogas von 40 %.</p> <p>Gemäß einer Pressemitteilung des Landes Baden-Württemberg von Januar 2024, gibt es rund 1.000 Biogasanlagen in Baden-Württemberg. Diese Zahl inkludiert dann auch die Vielzahl der kleinen Hofbiogasanlagen.</p>

Für Biogas- und Biomethaneinspeiseanlagen sind für die CO₂-Emissionen die Referenzjahre 2015 und 2025 angegeben. In diesen Datensätzen der jeweiligen verwendeten Datenbank (Tabelle 5) ist die Menge an produziertem Biogas pro Anlage verfügbar. Die totalen CO₂-Emissionen, die den biogenen CO₂-Emissionen entsprechen, wurden kalkuliert, unter der Annahme von einen CO₂-Durchschnittsgehalt im Biogas von 40 %. Nähere Informationen sind der begleitenden *Exceltabelle 25-08-05_Modul 1* zu entnehmen. Gemäß einer Pressemitteilung des Landes Baden-Württemberg von Januar 2024, gibt es rund 1.000 Biogasanlagen in Baden-Württemberg¹. Diese Zahl inkludiert dann auch die Vielzahl der kleinen Hofbiogasanlagen, die meist eine installierte Leistung von 75 kW haben und eine daraus resultierende CO₂-Emissionsmenge, die mit < 100 Tonnen unter dem Schwellenwert für die CO₂-Quellen-Identifizierung liegt.

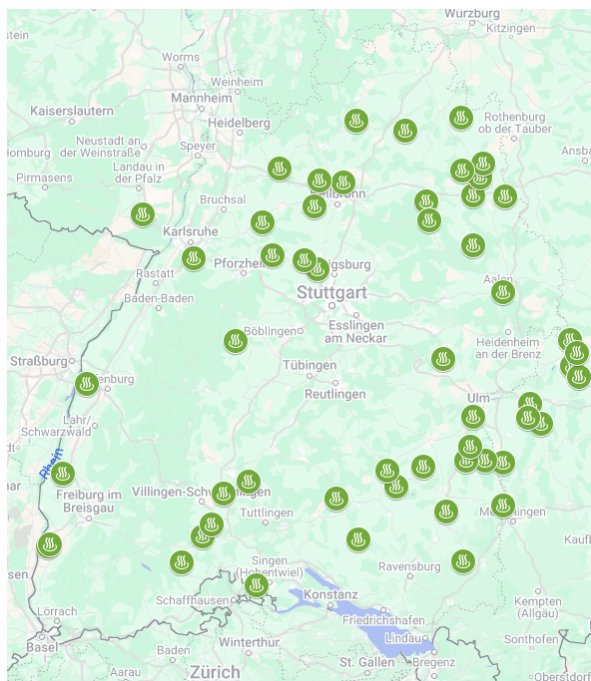


Abbildung 4: Kartierung der identifizierten CO₂-Quellen in der Gruppe Biogas- und Biomethaneinspeiseanlagen.

¹ <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/hauk-besucht-die-bioenergie-tauberhoehe>

2.6 Biomassekraftwerke

In der Gruppe Biomassekraftwerke wurden 77 Anlagen identifiziert (Tabelle 6; Abbildung 5). Die Gesamt-CO₂-Emissionen liegen bei ca. 1,4 Millionen Tonnen, was nahezu 100 % den biogenen CO₂-Emissionen, mit 1.3 Millionen Tonnen, entspricht (Tabelle 6).

Tabelle 6: Übersicht der identifizierten CO₂-Quellen in der Gruppe Biomassekraftwerke.

CO ₂ -Quelle	Anzahl Anlagen	CO ₂ -Emissionen (Total; Tonnen)	CO ₂ -Emissionen (Biogen; Tonnen)
Biomassekraftwerke	77	1.393.098	1.330.098
Definition	Biomassefeuerungsanlagen		
Referenz	https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/processingChain?repositoryItemGlobalId=energie_biomasse.energie%3Aeebw_biomasse_holzfeuerung.sel&conditionValuesSetHash=5C52F7B&selector=energie_biomasse.energie%3Aeebw_biomasse_holzfeuerung.sel&sourceOrderAsc CaptureMap Referenzjahr: 2016 und 2023		
Zusätzliche Informationen	Wenn nicht anders angegeben entsprechen die totalen CO ₂ -Emissionen den biogenen CO ₂ -Emissionen.		

Für Biomassekraftwerke sind für die CO₂-Emissionen das Referenzjahr 2016 und 2023 angegeben. In diesen Datensätzen der jeweils verwendeten Datenbank (Tabelle 6) ist die Gesamt-CO₂-Emissionsmenge oder ebenfalls auch die biogene CO₂-Emissionsmenge angegeben. Wenn nicht anders angegeben, entsprechen die totalen CO₂-Emissionen den biogenen CO₂-Emissionen.

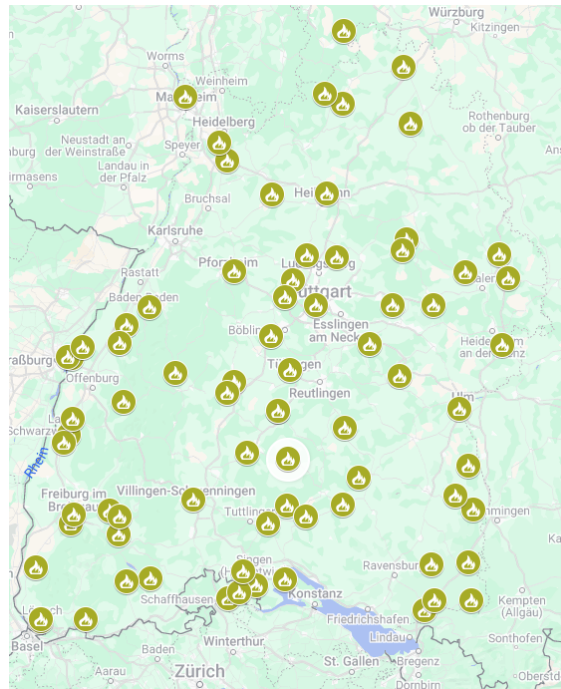


Abbildung 5: Kartierung der identifizierten CO₂-Quellen in der Gruppe Biomassekraftwerke.

2.7 Eisen, Stahl und Ferrolegierung

In der Gruppe Eisen, Stahl und Ferrolegierung wurden 2 Anlagen identifiziert, davon ein Stahlwerk und eine Gießerei (Tabelle 7; Abbildung 6). Die Gesamt-CO₂-Emissionen liegen bei ca. 240.000 Tonnen, es gibt keine biogenen CO₂-Emissionen (Tabelle 7).

Tabelle 7: Übersicht der identifizierten CO₂-Quellen in der Gruppe Eisen, Stahl und Ferrolegierung.

CO ₂ -Quelle	Anzahl Anlagen	CO ₂ -Emissionen (Total; Tonnen)	CO ₂ -Emissionen (Biogen; Tonnen)
Eisen, Stahl und Ferrolegierung	2	242.843	0
Definition	Beinhaltet Eisen- und Stahlwerke, sowie Gießereien: Badische Stahlwerke GmbH Fondium Singen GmbH		
Referenz	CaptureMap-Software. Daten basieren auf den gemeldeten CO ₂ -Emissionen in das EU Emissions Trading System (EU ETS). Kein Zugang zu granulären Daten im EU ETS, wenn nicht registriert und CO ₂ -Emissionen gemeldet werden. Referenzjahr: 2023		

Zusätzliche Informationen	-
----------------------------------	---

Für Eisen, Stahl und Ferrolegierung ist für die CO₂-Emissionen das Referenzjahr 2023 angegeben. In diesen Datensätzen der jeweiligen verwendeten Datenbank (Tabelle 7) ist die emittierte fossile CO₂-Menge enthalten. Diese Daten basieren auf den gemeldeten CO₂-Emissionen in das EU Emissions Trading System (EU ETS).

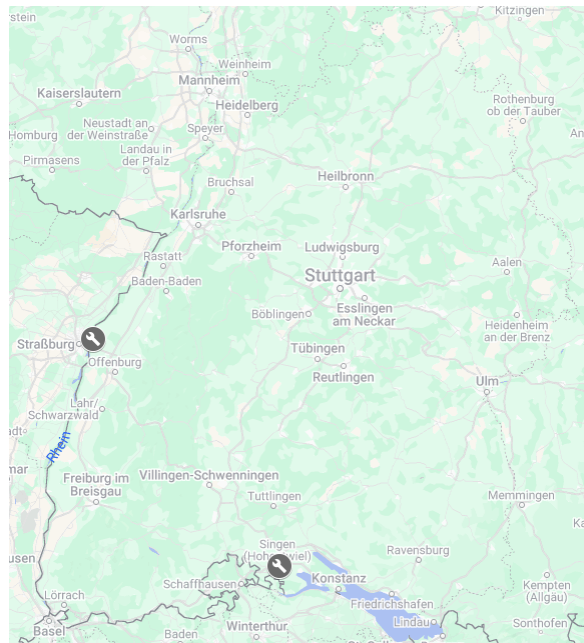


Abbildung 6: Kartierung der identifizierten CO₂-Quellen in der Gruppe Eisen, Stahl und Ferrolegierung.

2.8 Futter- und Nahrungsmittel

In der Gruppe Futter und Nahrungsmittel wurden 13 Anlagen identifiziert, 33 weitere sind in thru.de verzeichnet, aber Informationen zu CO₂-Emissionen sind nicht verfügbar (Tabelle 8; Abbildung 7). 11 der gelisteten Anlagen sind Brauereien. Die Gesamt-CO₂-Emissionen liegen bei ca. 170.000 Tonnen, die biogenen CO₂-Emissionen, die hier vollständig den Brauereien zuzuordnen sind, liegen bei ca. 21.000 Tonnen (Tabelle 8).

Tabelle 8: Übersicht der identifizierten CO₂-Quellen in der Gruppe Futter- und Nahrungsmittel.

CO ₂ -Quelle	Anzahl Anlagen	CO ₂ -Emissionen (Total; Tonnen)	CO ₂ -Emissionen (Biogen; Tonnen)
Futter- und Nahrungsmittel	13 (33)	167.310	20.840

Definition	Beinhaltet Anlagen zur Herstellung von Futter- und Nahrungsmittel, z. B. Molkereien und Molkeverarbeitungsanlagen und Zuckerfabriken und Brauereien mit CO ₂ -Emissionen > 1.000 Tonnen.
Referenz	CaptureMap-Software. Daten basieren auf den gemeldeten CO ₂ -Emissionen in das EU Emissions Trading System (EU ETS). Kein Zugang zu granulären Daten im EU ETS, wenn nicht registriert und CO ₂ -Emissionen gemeldet werden. Referenzjahr: 2023
Zusätzliche Informationen	33 zusätzliche Futter- und Nahrungsmittelanlagen sind in thru.de verzeichnet, aber Informationen zu CO ₂ -Emissionen sind nicht verfügbar. Die CO ₂ -Emissionen der Brauereien wurden anhand des CO ₂ -Ausstoßes pro Hektoliter Bier berechnet. Für den CO ₂ -Ausstoß wurden folgende Mittelwerte verwendet ² : Fossiles CO ₂ : 7 kg CO ₂ /hl Biogenes CO ₂ : 4 kg CO ₂ /hl

Für Futter- und Nahrungsmittel ist für die CO₂-Emissionen das Referenzjahr 2023 angegeben. In diesen Datensätzen der jeweiligen verwendeten Datenbank oder Quelle (Tabelle 8) ist die Gesamt-CO₂-Emissionsmenge angegeben. Im Falle der Brauereien ist die Menge an produzierten Hektolitern Bier angegeben. In diesem Fall wurden die CO₂-Emissionen der Brauereien anhand des CO₂-Ausstoßes pro Hektoliter Bier berechnet. Für den CO₂-Ausstoß wurden die in Tabelle 8 genannten Mittelwerte verwendet. Nähere Informationen sind der begleitenden *Excel*tabelle 25-08-05_Modul 1 zu entnehmen.

² Entwicklung und Optimierung eines neuen Verfahrens zur Abtrennung von Permanentgasen aus CO₂-Gärungsgas mit einem CO₂-Kältekreislauf; 06_Thermodynamische Modellierung der Rückgewinnung von Gärungs-CO₂ und Kostenreduzierung des Prozesses durch Einsatz des Kältemittels CO₂; 1710924196BeerClimateScore; Brauerei_Gutmann_Umweltbericht_2020_final; Entwicklung und Optimierung eines neuen Verfahrens zur Abtrennung von Permanentgasen aus CO₂-Gärungsgas mit einem CO₂-Kältekreislauf; sustainability-factsheet-2015-switzerland-de

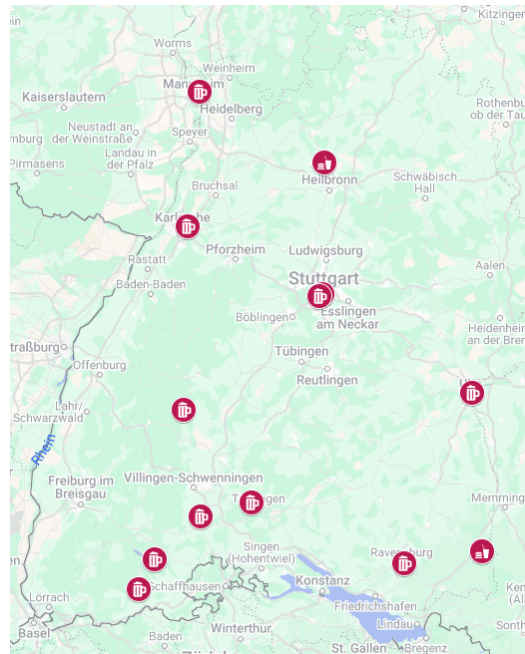


Abbildung 7: Kartierung der identifizierten CO₂-Quellen in der Gruppe Futter- und Nahrungsmittel.

2.9 Nicht-metallische Mineralien

In der Gruppe Nicht-metallische Mineralien wurden 11 Anlagen identifiziert. Eine Mineralfaseranlage ist in thru.de verzeichnet, aber Informationen zu CO₂-Emissionen sind nicht verfügbar. Von den 11 Anlagen sind sieben Zementfabriken, zwei Kalkbrennöfen, eine Ölschieferverbrennungsanlage und eine Glasproduktionsanlage (Tabelle 9; Abbildung 8). Die Gesamt-CO₂-Emissionen liegen bei 3,5 Millionen Tonnen, die biogenen CO₂-Emissionen liegen bei ca. 300.000 Tonnen (Tabelle 9).

Tabelle 9: Übersicht der identifizierten CO₂-Quellen in der Gruppe Nicht-metallische Mineralien.

CO ₂ -Quelle	Anzahl Anlagen	CO ₂ -Emissionen (Total; Tonnen)	CO ₂ -Emissionen (Biogen; Tonnen)
Nicht-metallische Mineralien	11 (1)	3.530.000	309.000
Definition	Beinhaltet Zementwerke und Kalkverarbeitende Industrie, für die Herstellung von Zementklinker > 500 t/d in Drehrohröfen oder > 50 t/d in anderen Öfen oder Herstellung von Kalk > 50 t/d. Herstellung von Glas und Glasfasern >20 t/d. Schmelzen mineralischer Stoffe und Herstellung v. Mineralfasern > 20 t/d.		
Referenz	https://app.thru.de/detail-suche/suche Referenzjahr: 2021-2023 Bundesland: Baden-Württemberg Freisetzungen / Stoff in Luft: Kohlenstoffdioxid (CO ₂)		

Zusätzliche Informationen	<p>Teilweise sind die Volumina biogener CO₂-Emissionen pro Anlage verfügbar, teilweise nicht. Nähere Informationen sind der begleitenden <i>Excel</i>tabelle zu entnehmen.</p> <p>Eine Mineralfaseranlage ist in thru.de verzeichnet, aber Informationen zu CO₂-Emissionen sind nicht verfügbar.</p>
----------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Für Nicht-metallische Mineralien sind für die CO₂-Emissionen die Referenzjahre 2021 und 2023 angegeben. In diesen Datensätzen der jeweils verwendeten Datenbank (Tabelle 9) ist die Gesamt-CO₂-Emissionsmenge angegeben. Teilweise sind die Volumina biogener CO₂-Emissionen pro Anlage verfügbar, teilweise nicht. Nähere Informationen sind der begleitenden *Excel*tabelle 25-08-05_Modul 1 zu entnehmen.

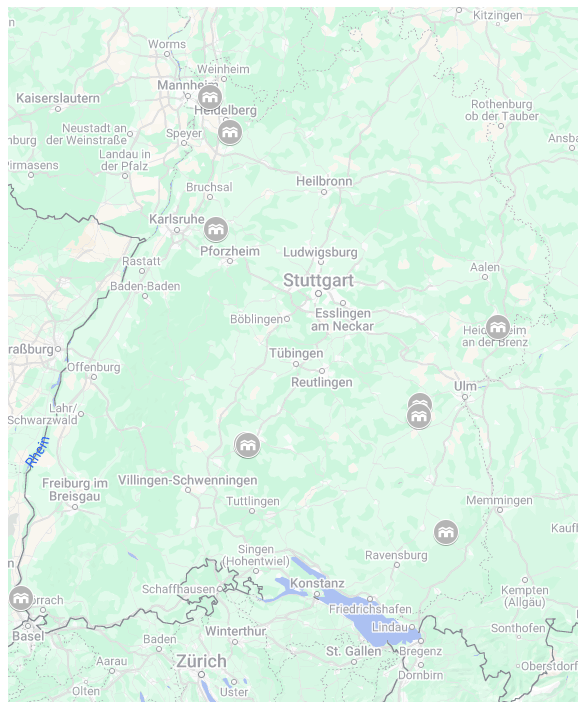


Abbildung 8: Kartierung der identifizierten CO₂-Quellen in der Gruppe Nicht-metallische Mineralien.

2.10 Sonstige

In der Gruppe Sonstige wurden zwei Anlagen identifiziert. Die Mineralölraffinerie Oberrhein (Miro) und der Automobilhersteller Daimler AG (Tabelle 10; Abbildung 9). Die Gesamt-CO₂-Emissionen liegen bei 2,8 Millionen Tonnen, biogene CO₂-Emissionen sind nicht verzeichnet (Tabelle 10).

Tabelle 10: Übersicht der identifizierten CO₂-Quellen in der Gruppe Sonstige.

CO ₂ -Quelle	Anzahl Anlagen	CO ₂ -Emissionen (Total; Tonnen)	CO ₂ -Emissionen (Biogen; Tonnen)
Sonstige	2	2.759.000	0

Definition	Beinhaltet Mineralöl-und Gasraffinerien. Automobilhersteller.
Referenz	https://app.thru.de/detail-suche/suche Referenzjahr: 2021-2023 Bundesland: Baden-Württemberg Freisetzungen / Stoff in Luft: Kohlenstoffdioxid (CO ₂)
Zusätzliche Informationen	Keine biogenen CO ₂ -Emissionen.

Für Sonstige sind für die CO₂-Emissionen die Referenzjahre 2021 bis 2023 angegeben. In diesen Datensätzen der jeweiligen verwendeten Datenbank (Tabelle 10) ist die Gesamt-CO₂-Emissionsmenge angegeben. Nähere Informationen sind der begleitenden *Exceltabelle 25-08-05_Modul 1* zu entnehmen.

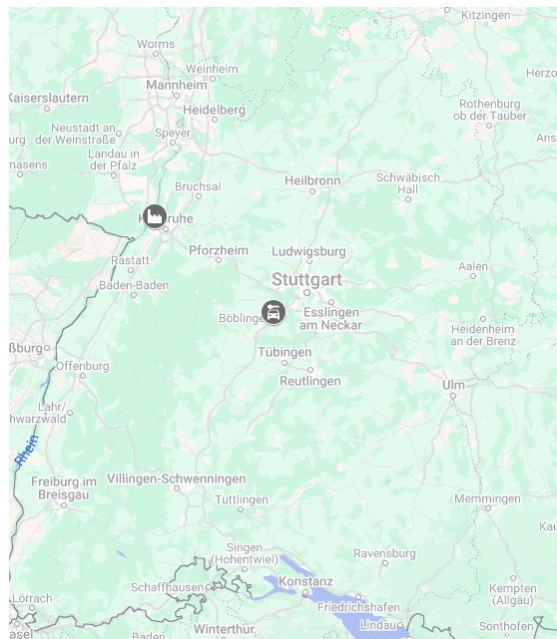


Abbildung 9: Kartierung der identifizierten CO₂-Quellen in der Gruppe Sonstige.

2.11 Zellstoff- und Papier

In der Gruppe Zellstoff und Papier wurden acht Anlagen identifiziert. Von den acht Anlagen sind sechs Papierfabriken, eine Zellstofffabrik und eine Faltschachtelkartonfabrik (Tabelle 11; Abbildung 10). Die Gesamt-CO₂-Emissionen liegen bei 1 Millionen Tonnen, die biogenen CO₂-Emissionen liegen bei 33.000 Tonnen und sind auf die Zellstofffabrik von Essity Operations Mannheim GmbH zurückzuführen (Tabelle 11).

Tabelle 11: Übersicht der identifizierten CO₂-Quellen in der Gruppe Zellstoff- und Papier.

CO ₂ -Quelle	Anzahl Anlagen	CO ₂ -Emissionen (Total; Tonnen)	CO ₂ -Emissionen (Biogen; Tonnen)
Zellstoff und Papier	8	1.040.000	33.000
Definition	Beinhaltet Zellstoff-, Papier- und Kartonfabriken für die Herstellung von Papier und Pappe und sonstigen primären Holzprodukten > 20 t/d.		
Referenz	https://app.thru.de/detail-suche/suche Referenzjahr: 2021-2023 Bundesland: Baden-Württemberg Freisetzungen / Stoff in Luft: Kohlenstoffdioxid (CO ₂)		
Zusätzliche Informationen	Teilweise sind die Volumina biogener CO ₂ -Emissionen pro Anlage verfügbar, teilweise nicht. Nähere Informationen sind der begleitenden <i>Excel</i> tabelle zu entnehmen.		

Für Zellstoff und Papier sind für die CO₂-Emissionen die Referenzjahre 2021 bis 2023 angegeben. In diesen Datensätzen der jeweiligen verwendeten Datenbank (Tabelle 11) ist die Gesamt-CO₂-Emissionsmenge angegeben. Teilweise sind die Volumina biogener CO₂-Emissionen pro Anlage verfügbar, teilweise nicht. Nähere Informationen sind der begleitenden *Excel*tabelle 25-08-05_Modul 1 zu entnehmen.

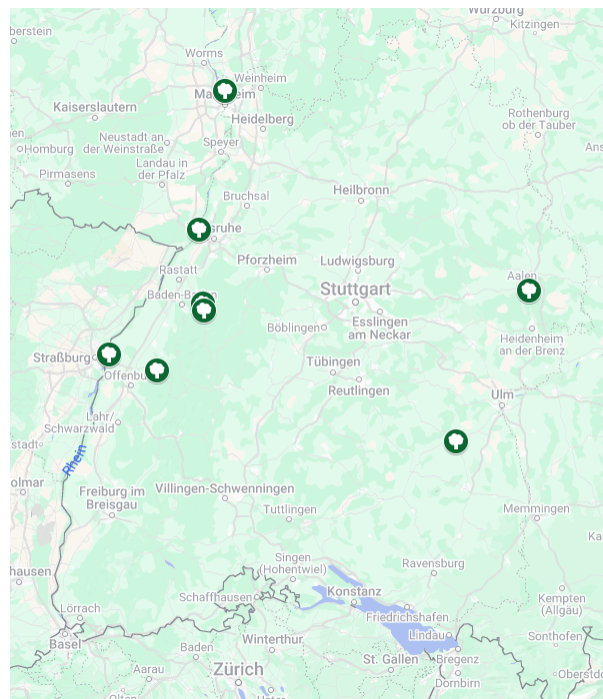


Abbildung 10: Kartierung der identifizierten CO₂-Quellen in der Gruppe Zellstoff- und Papier.

3 Technologische Konzepte für die CO₂-Umwandlung

Der Fokus der Untersuchung der technologischen Konzepte für die CO₂-Umwandlung liegt auf Technologien, die in den letzten Jahren entwickelt wurden bzw. schon eingesetzt werden sowie solchen, die sich in einem fortgeschrittenen Stadium der Entwicklung befinden. Die betrachteten Technologien sollen daher mindestens eine technische Reife entsprechend des *Technology Readiness Levels* von TRL ≥ 5 aufweisen, also zumindest im Pilotmaßstab umgesetzt sein. Ebenfalls werden Technologien mit in die Betrachtung einbezogen bei denen ein regionaler und dezentraler Blickwinkel sinnvoll ist und die als kleine bis mittelgroße Anlagen bzw. integriert im Wertschöpfungsverbund von Industrie- und Produktionsanlagen entstehen könnten.

Die identifizierten technologischen Konzepte werden in den folgenden Kapiteln als Steckbriefe unter folgenden Gesichtspunkten vorgestellt und beschrieben. 1) Beschreibung der Technologie und 2) ihrer Produkte, 3) Darstellung der technologischen Reife entsprechend der TRL-Skala, 4) Angaben über die Einsatzmengen von CO₂ und 5) anderen benötigten Rohstoffen wie Wasserstoff, 6) typische Umsetzungsraten, 7) Energiebedarfe sowie 8) beteiligte Forschungseinrichtungen und Industrien.

3.1 Technologieübersicht zur Umwandlung von CO₂

Derzeit wird CO₂ zusammen mit anderen C1-reichen Gasen wie Kohlenmonoxid (CO) aus fossilen und biogenen Punktquellen abgeschieden. Auch Projekte zur direkten Luftabscheidung (Direct Air Capture, DAC) nehmen zu. CO₂ kann durch chemische, biotechnologische und elektrochemische Verfahren in Chemikalien, fortschrittliche Kraftstoffe, Polymere, Proteine oder Mineralien umgewandelt werden.

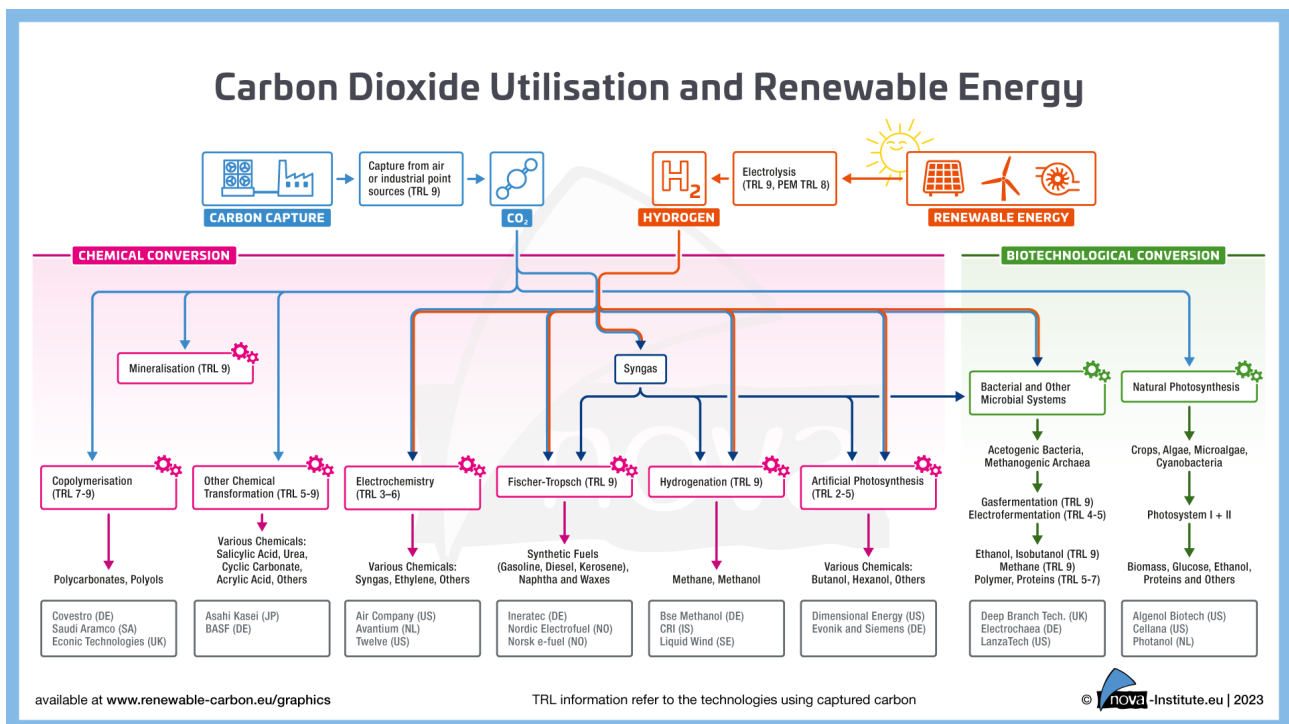


Abbildung 11: Übersicht der verschiedenen CO₂-Umwandlungstechnologien und Produkte.

Die konventionelle chemische Umwandlung von CO₂ wird seit Jahrzehnten auf kommerzieller Ebene für die Herstellung verschiedener Chemikalien, wie beispielsweise Salicylsäure, Harnstoff, Ethylen und Propylencarbonat, eingesetzt. CO₂ kann auch direkt für verschiedene Anwendungen genutzt werden, beispielsweise für die Enhanced Oil Recovery (die als Methode zur Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS) angesehen wird), in Feuerlöschern oder als Pflanzenwachstumsbeschleuniger in Gewächshäusern.

Neue chemische Verfahren konzentrieren sich auf die Umwandlung von CO₂ (Abbildung 11). Derzeit ist die CO₂-Hydrierung zu Methan oder Methanol am vielversprechendsten. Ersteres kann ins Erdgasnetz eingespeist werden und trägt zur Strategie bei, die Abhängigkeit von Erdgaslieferanten zu verringern und damit die Rohstoffresilienz zu erhöhen. Letzteres kann wie fossiles Methanol einfach und hocheffizient als Kraftstoff im Verkehrssektor oder als chemischer Baustein verwendet werden.

Großes Interesse besteht auch an der Fischer-Tropsch-Technologie zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe und Chemikalien. Diese etwa einhundert Jahre alte Technologie wird bislang hauptsächlich für die Vergasung und Verwertung von Kohle (CtL) und Erdgas (GtL) eingesetzt. In Verbindung mit CO₂-basiertem Synthesegas kann sie nachhaltige, CO₂-basierte Kohlenwasserstoffe wie Kerosin, Diesel, Naphtha und Wachse produzieren. Besonders aktiv ist man bei CO₂-basiertem Kerosin, dem wichtigsten nachhaltigen Flugkraftstoff (Sustainable Aviation Fuels, SAF). Schließlich kann CO₂ auch zu einem Karbonat für Baumaterialien mineralisiert werden. Mithilfe des Karbonatisierungsprozesses werden auf dem Markt erhältliche Technologien genutzt, um Ersatzprodukte für die Zementindustrie herzustellen. Außerdem sind CO₂-basierte Polycarbonate, Polyurethane (PU) und Polyethylen (PE) auf dem Markt erhältlich (Abbildung 12). CO₂-basierte Polycarbonate werden bereits von verschiedenen Anbietern produziert. Zu den größten verfügbaren Mengen zählen aromatische Polycarbonate, die auf der von Asahi Kasei lizenzierten Technologie basieren. Darüber hinaus bieten mehrere Akteure weltweit auch aliphatische Polycarbonate wie Polypropylencarbonat (PPC) für eine Vielzahl von Anwendungen an.

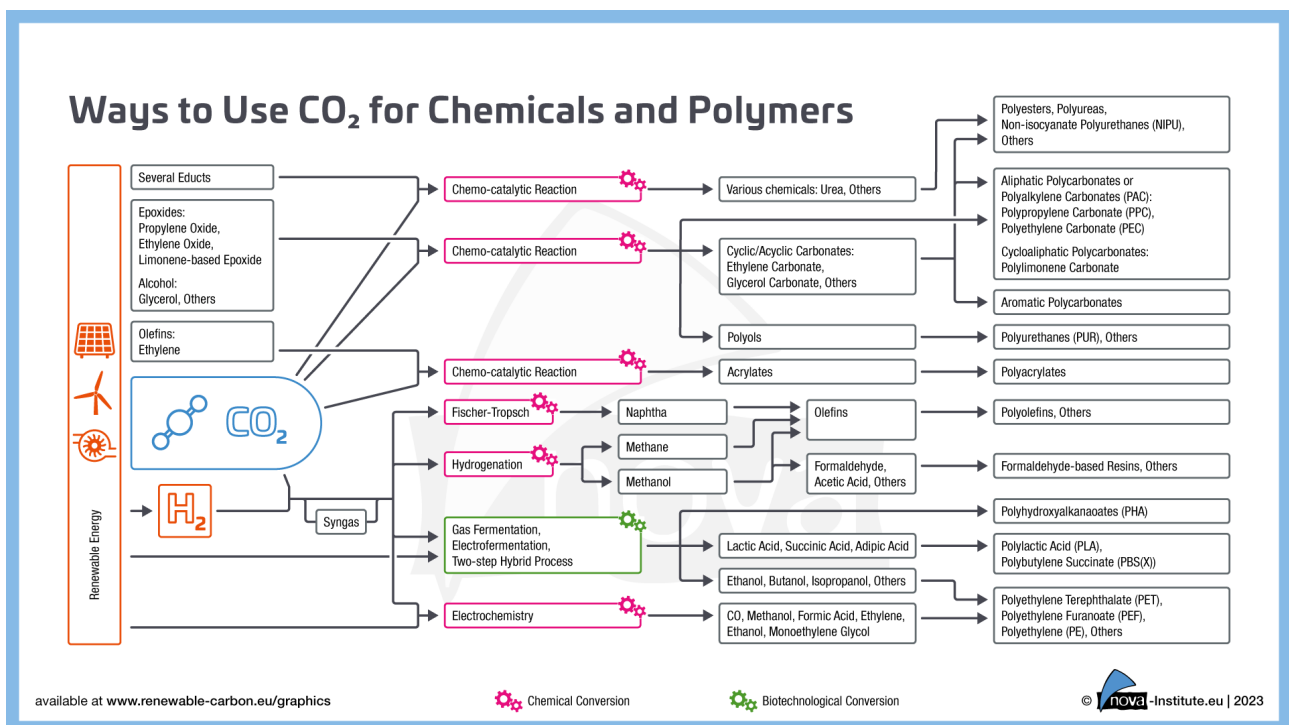


Abbildung 12: Übersicht der verschiedenen CO₂-Umwandlungstechnologien zu Chemikalien und Polymeren.

Die bekanntesten biotechnologischen Umwandlungswege (Abbildung 11) von CO₂ produzieren Ethanol in kommerziellem Maßstab. Dies wird für Kraftstoffanwendungen sowie für die chemische Industrie (z. B. als Lösungsmittel oder für die Herstellung von Ethylenglykol) und die Polymerindustrie (z. B. für die Herstellung von Polyethylen) verwendet.

Auf der Grundlage der Gasfermentation werden weitere biotechnologische Verfahren entwickelt und mehrere Pilotanlagen zur Herstellung von Milchsäure, Butanol, Ethylen und Proteinen sind bereits in Betrieb (Abbildung 12). Zudem können biologisch abbaubare Polymere, die sogenannten Polyhydroxyalkanoate (PHA), durch Gasfermentation hergestellt werden und sind bereits im Handel erhältlich.

Zahlreiche Forschungsgruppen, Start-ups und Unternehmen beschäftigen sich mit dem Thema der elektrochemischen Umwandlung von CO. Die fortschrittlichsten elektrochemischen Verfahren ermöglichen die Umwandlung von CO₂ in CO (oder Synthesegas), Ethanol, Ameisensäure oder Ethylen.

3.1.1 Chemische Umwandlung von CO₂

Die chemische Umwandlung umfasst die Verwendung herkömmlicher chemischer Reaktionssysteme, Katalysatoren und Energiezufuhr zur Umwandlung von CO₂ (oder anderen kohlenstoffhaltigen Gasen) in verschiedene Produkte wie z. B. Chemikalien, Gase, Polymere oder synthetische Kraftstoffe. Die am weitesten verbreitete Anwendung ist dabei die Verwendung von Wasserstoff, um Kohlenstoffdioxid zu z. B. Methanol und Methan zu reduzieren und damit für eine weitere Nutzung verfügbar zu machen. Die elektrochemische Umwandlung ist eine spezielle chemische Umwandlung, bei der elektrische Energie zur Reduzierung von CO₂ verwendet wird um zum Beispiel Ameisensäure, Ethanol oder Ethylen herzustellen.

Tabelle 12: Technologieüberblick – Chemische Umwandlung von CO₂.

Prozess / Technologie	Beschreibung (CO ₂ -Nutzungsspezifisch)	TRL	Produkte
Künstliche Fotosynthese (Photochemie)	CO ₂ , Wasser und Sonnenlicht werden photochemisch in Kohlenhydrate und Sauerstoff umgewandelt.	2-4	Kohlenhydrate, Chemikalien, synthetische Kraftstoffe
Elektrochemie	CO ₂ wird elektrisch zu CO, Ethylen oder anderen Chemikalien reduziert.	3-5	Chemikalien, synthetische Kraftstoffe
rWGS (reverse Water Gas Shift)	Chemische Reaktion zwischen CO ₂ und Wasserstoff (H ₂) zur Bildung von Kohlenmonoxid (CO) und Wasser (H ₂ O). CO kann als solches verwendet werden, aber in der Regel wird ein Gemisch aus CO, H ₂ und CO ₂ , also Synthesegas, angestrebt.	9	CO, Synthesegas
Fischer-Tropsch Synthese	CO ₂ -basiertes Synthesegas wird zu Kohlenwasserstoffen wie synthetischen Kraftstoffen und	9	Synthetische Kraftstoffe, synthetische Wachse, Naphtha

	Wachsen sowie zu Naphtha weiterverarbeitet.		
Hydrierung	Chemische Reaktion zwischen CO ₂ und Wasserstoff (H ₂) zur Bildung von Methanol oder Methan und Wasser (H ₂ O). Zur Durchführung der Reaktion werden spezielle Katalysatoren benötigt.	9	Chemikalien, Energiespeichergas, synthetische Kraftstoffe
Mineralisierung	CO ₂ wird in anorganischen Verbindungen fixiert.	9	Anorganische Karbonate
Polycarbonatsynthese	Chemische Reaktion zwischen CO ₂ und Epoxiden (Ethylenoxid (EO) oder Propylenoxid (PO)) zur Bildung von PEC oder PPC. Für die Reaktion werden spezielle Katalysatoren benötigt.	7	Polycarbonate, Polycarbonatpolyole
Methanol-to-Olefins (MTO)	CO ₂ wird zu Methanol hydriert. Dieses Zwischenprodukt wird als Ausgangsstoff für die weitere Olefin- und Polyolefinsynthese verwendet.	7	Ethylen, Propylen, Polyethylen (PE), Polypropylen (PP)
Steamcracken von CO₂-basiertem Naphtha	CO ₂ -basiertes Synthesegas wird über Fischer-Tropsch in Naphtha umgewandelt. Dieses Zwischenprodukt wird als Ausgangsstoff für die weitere Synthese von Olefinen oder Polyolefinen verwendet.	5-9	Polyethylen (PE), Polypropylen (PP)
Polyurethane	Polycarbonatpolyole (siehe Polycarbonatsynthese) werden mit Isocyanat chemisch zu Polyurethanen umgesetzt.	5-7	Polyurethane

Tabelle 12 gibt einen Überblick über die verschiedenen technologischen Konzepte für die chemische Umwandlung von CO₂. Neben einer Beschreibung der Technologie, des Prozesses ist auch die technologische Reife (*Technology Readiness Level* (TRL)) angegeben, sowie die aus diesem Prozess entstehenden Hauptprodukte. Aufgrund der in Kapitel 3 festgelegten technologischen Reife der Konzepte von mindestens 5 oder höher, wird die Photochemie mit einen TRL von 2-4 in den folgenden Kapiteln nicht weiter betrachtet.

3.1.2 Biotechnologische Umwandlung von CO₂

Die biotechnologische Umwandlung umfasst den Einsatz so genannter Biokatalysatoren zur Umwandlung von CO₂ (oder anderen kohlenstoffhaltigen Gasen) in verschiedene Produkte wie z. B. Polymere, Chemikalien oder Gase. Biokatalysatoren können zum einen isolierte Enzyme oder ganze Mikroorganismen sein. Im Allgemeinen wird diesen Biokatalysatoren eine hohe Selektivität, Ausbeute und Reproduzierbarkeit zugeschrieben. Des Weiteren, im Vergleich zu chemischen Reaktionen und Umwandlungen, werden keine giftigen oder aggressiven Chemikalien für biokatalytische Reaktion benötigt.

Tabelle 13: Übersicht der verwendeten Mikroorganismen für die biotechnologische Umwandlung von CO₂.

Acetogene Bakterien	Archaea	Cyanobakterien	Mikroalgen
z. B. <i>Clostridium ljungdahlii</i>	z. B. <i>Methanococcus spec.</i>	z. B. <i>Spirulina spec.</i>	z. B. <i>Pavlova spec.</i>
Chemoautotrophe		Photoautotrophe	
Synthesegas (H ₂ + CO + CO ₂) oder CO ₂	Synthesegas (H ₂ + CO + CO ₂) oder CO ₂	Synthesegas und CO ₂ + H ₂ O + Licht	CO ₂ + H ₂ O + Licht
Alkohole, organische Säuren	Gase	Zucker, Fette, organische Säuren, Alkohole	

Für die biotechnologische Umwandlung von CO₂ kommen zwei verschiedene Gruppen von Mikroorganismen in Frage: Chemoautotrophe Mikroorganismen, die CO₂ als Kohlenstoffquelle nutzen und photoautotrophe Mikroorganismen, die Licht als Energiequelle nutzen. Zur ersten Gruppe gehören, acetogene Bakterien und Archaeen. Sie verwenden Wasserstoff und C1-haltige Gase um Alkohole, organische Säuren oder Gase herzustellen. Cyanobakterien und Mikroalgen gehören zu den photoautotrophen Mikroorganismen, beide synthetisieren Zucker, Fette, organische Säuren oder Alkohole. Während Mikroalgen CO₂ und Wasserstoff verwerten und Sonnenlicht benötigen, können Cyanobakterien ebenfalls auch Synthesegas als Kohlenstoffquelle nutzen (Tabelle 13).

Tabelle 14: Technologieüberblick – Biotechnologische Umwandlung von CO₂.

Prozess / Technologie	Beschreibung (CO ₂ -Nutzungsspezifisch)	TRL	Produkte
Acetogenes Bakteriensystem	Fermentative Umwandlung von Synthesegas, CO oder CO ₂ in Alkohole und Chemikalien.	5-9	Chemikalien, synthetische Kraftstoffe
Archaea-basiertes System	Fermentative Umwandlung von CO ₂ in Methan.	9	Methan
Cyanobakterielles System	Natürliche Photosynthese zur Umwandlung von CO ₂ in Chemikalien.	5	Kohlenhydrate, Chemikalien, Proteine, synthetische Kraftstoffe

Mikroalgen System	Natürliche Photosynthese zur Umwandlung von CO ₂ in Chemikalien.	5	Kohlenhydrate, Chemikalien, Proteine, synthetische Kraftstoffe
Synthetische mikrobielle Systeme (Synthetische Biologie)	Optimierte fermentative CO ₂ -Umwandlung in Chemikalien, Bausteine und Polymere.	4	Chemikalien, Polymere

Tabelle 14 gibt einen Überblick über die verschiedenen technologischen Konzepte für die biotechnologische Umwandlung von CO₂. Neben einer Beschreibung der Technologie und des Prozesses ist auch die technologische Reife (*Technology Readiness Level* (TRL)) angegeben, sowie die aus diesem Prozess entstehenden Hauptprodukte. Aufgrund der in Kapitel 3 festgelegten technologischen Reife der Konzepte von mindestens 5 oder höher, werden die synthetischen mikrobiellen Systeme mit einem TRL von 4 in den folgenden Kapiteln nicht weiter betrachtet.

Tabelle 15: Vor- und Nachteile chemischer und biotechnologischer Umwandlung von CO₂.

	Chemische Umwandlung von CO ₂	Biotechnologische Umwandlung von CO ₂
Pro	<ul style="list-style-type: none"> Seit Jahrhunderten etablierte und optimierte Gas-, Alkohol- und Kraftstofftechnologien (z. B. Fischer-Tropsch-Verfahren, Hydrierung) 	<ul style="list-style-type: none"> Herstellung alternativer Proteinquellen (einzellige Proteine) Gemischte CO₂-/Kohlenstoff-Abgase können verwendet werden, kein hochreiner CO₂-Strom erforderlich
Contra	<ul style="list-style-type: none"> Mögliche Nichtselektivität der Katalysatoren Giftige Katalysatoren Hochreiner CO₂-Strom erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> Kommerzielle Produktion in großem Maßstab schwierig (z. B. Einzelzellproteine, organische Säuren usw.), aber möglich und auf dem Weg dorthin (z. B. Chemikalien und Kraftstoffe: LanzaTech; Gase: Electrochaea)

Generell bieten die chemische, sowie die biotechnologische Umwandlung von CO₂ verschiedene Vor- und Nachteile (Tabelle 15). Während chemische Umwandlungsprozesse für CO₂ wie zum Beispiel die Hydrierung oder die Fischer-Tropsch Synthese seit Jahrhunderten etablierte und optimierte Prozesse sind, sind biotechnologische Verfahren was die kommerzielle Produktion betrifft noch nicht gänzlich etabliert. Für biotechnologisch hergestelltes Ethanol, und daraus resultierender Flugtreibstoff, sowie für biotechnologisch hergestelltes CO₂-basiertes Methan gibt es Anlagen im kommerziellen Produktionsmaßstab, für die Herstellung von Einzelzellproteinen oder organischen Säuren allerdings nicht. Hier befindet sich die Entwicklung im Labor- bis Pilotmaßstab. Ein großer Vorteil der biotechnologischen CO₂-Umwandlung ist die Möglichkeit gemischte CO₂-/Kohlenstoff-Abgase verwenden zu können. Es ist, anders als bei der chemischen Umwandlung von CO₂, kein hochreiner CO₂-Strom erforderlich.

3.2 Steckbriefe – Chemische Umwandlung von CO₂

Wie in Kapitel 3 beschrieben sollen die identifizierten technologischen Konzepte in Steckbriefen und unter verschiedenen Gesichtspunkten vorgestellt und beschrieben werden. Neben einer Beschreibung der Technologie und der Benennung der derzeitigen hauptsächlichen Produkte wird auch die unterschiedliche technologische Reife der Konzepte (TRL) benannt. Des Weiteren werden prozess-spezifische Angaben gemacht zu: Menge an CO₂ (Tonnen / Tonne Produkt), Menge an zusätzlichen benötigten Rohstoffen (Tonnen / Tonne Produkt), Umsetzungsraten (%), Faraday-Effizienz (%) und Energiebedarf (MWh / Tonne Produkt). Es ist zu beachten, dass diese Parameter für dasselbe technologische Konzept unterschiedlich ausfallen können, je nach betrachtetem Produkt. Die Daten für die verschiedenen Parameter stammen aus verschiedenen Quellen (z. B. wissenschaftliche Artikel, Vorträge, mündliche Kommunikation, künstliche Intelligenz), die jeweils miteinander abgeglichen worden sind und geben Bereiche für die jeweiligen Parameter an. Sie beziehen sich auf das jeweilige exemplarische Produkt und können sich je nach spezifischem Technologieanbieter und Unternehmen unterscheiden. Wenn nicht anders angegeben, bezieht sich der Energiebedarf (MWh / Tonne Produkt) nur auf den jeweils benannten Prozess und bezieht nicht den Energiebedarf für z. B. CO₂-Abscheidung, H₂-Produktion, Synthesegasherstellung und die Herstellung anderer Vorprodukte, die in diesem Prozess umgesetzt werden, ein.

3.2.1 Elektrochemie

In der Elektrochemie wird durch die Nutzung von elektrischer Energie CO₂ zu Kohlenmonoxid, Ethylen oder anderen Chemikalien reduziert. Bei der elektrokatalytischen Reduktion von CO₂ ist ein Elektrokatalysator an der elektrochemischen Reduktionsreaktion beteiligt, dieser kann an den Elektrodenoberflächen wirken oder die Elektrodenoberfläche selbst sein. Die derzeit gängigsten elektrochemischen Produkte sind Kohlenmonoxid, Ethanol und Ethylen deren Herstellungsverfahren eine technologische Reife von 5-6 aufweisen. Alle weiteren Informationen sind dem Steckbrief in Tabelle 16 zu entnehmen.

Tabelle 16: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO₂ – Elektrochemie.

Beschreibung	<p>CO₂ wird durch Nutzung von elektrischer Energie zu Kohlenmonoxid, Ethylen oder anderen Chemikalien reduziert. Bei der elektrokatalytischen Reduktion von CO₂ ist ein Elektrokatalysator an der elektrochemischen Reduktionsreaktion beteiligt, dieser kann an den Elektrodenoberflächen wirken oder die Elektrodenoberfläche selbst sein.</p> <p>Kohlenmonoxid: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2 + \text{O}_2$</p> <p>Ethanol: $2 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 3 \text{O}_2$</p> <p>Ethylen: $2 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4 + 3 \text{O}_2$</p>					
	Produkte	TRL	Menge an CO ₂ (Tonnen / Tonne Produkt)	Menge an zusätzlichen benötigten Rohstoffen (Tonnen / Tonne Produkt)	Umsetzungsraten (%), Faraday-Effizienz (%)	Energiebedarf (MWh / Tonne Produkt)
	Kohlenmonoxid	6	1,6	0,7-0,8 H ₂ O	60-80	9-16
	Ethanol	5	1,5-2	0,2 H ₂ O	20-60	30-50
	Ethylen	5	1,8-2,5	0,2 H ₂ O	50-80	40-60
Firmen / Projekte	<p>Kohlenmonoxid: D-CRBN, eChemicals, GIG Karasek, Siemens, SeeO2 Energy, Sunfire, Twelve</p> <p>Ethanol: Air Company, enaDyne</p> <p>Ethylen: Asahi Kasei, Braskem, CERT Systems, Dioxycle, eChemicals, enaDyne, Oxylum, Rohrdorfer / Net Zero Emissions Lab</p> <p>Andere Chemikalien: Carbonade, Coval Energy, Dioxide Materials, enaDyne, Mantra Energy Alternatives, Methanology, RenewCO₂, Skyre, Topsoe</p> <p>Synthetische Kraftstoffe: Air Company, Prometheus Fuels, Twelve</p>					

3.2.2 rWGS (*reverse Water Gas Shift*)

Die *reverse water Gas Shift* (rWGS)-Reaktion ist die chemische Reaktion zwischen CO_2 und Wasserstoff (H_2) zur Bildung von Kohlenmonoxid (CO) und Wasser (H_2O). CO kann als Produkt verwendet werden, aber in der Regel wird ein Gemisch aus CO , H_2 und CO_2 , also Synthesegas, als Produkt, angestrebt. Das Synthesegas ist ein wichtiges Zwischenprodukt für die Synthese zahlreicher Kraftstoffe und Chemikalien. Durch die Fischer-Tropsch-Umwandlung von Synthesegas können verschiedene Kohlenwasserstoffe hergestellt werden und herkömmlichen Diesel oder Kerosin für die Luftfahrt- und Transportindustrie oder herkömmliches Naphtha für die Chemie- und Polymerindustrie ersetzen. Auch die Methanolproduktion kann Synthesegas als Ausgangspunkt verwenden. Ebenfalls kann Synthesegas auch als Ausgangsstoff für die mikrobielle Fermentation verwendet werden, um Alkohole wie Ethanol oder Butanol und andere chemische Bausteine zu gewinnen. Synthesegas ist das einzige Produkt, was mit der rWGS und einer technologischen Reife von 9 hergestellt werden kann. Alle weiteren Informationen sind dem Steckbrief in Tabelle 17 zu entnehmen.

Tabelle 17: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO₂ – rWGS (reverse Water Gas Shift).

<p>Beschreibung</p>	<p>Chemische Reaktion zwischen CO₂ und Wasserstoff (H₂) zur Bildung von Kohlenmonoxid (CO) und Wasser (H₂O). CO kann als solches verwendet werden, aber in der Regel wird ein Gemisch aus CO, H₂ und CO₂, also Synthesegas, angestrebt. Das Synthesegas ist ein wichtiges Zwischenprodukt für die Synthese zahlreicher Kraftstoffe und Chemikalien. Durch die Fischer-Tropsch-Umwandlung von Synthesegas können verschiedene Kohlenwasserstoffe hergestellt werden und herkömmlichen Diesel oder Kerosin für die Luftfahrt- und Transportindustrie oder herkömmliches Naphtha für die Chemie- und Polymerindustrie ersetzen. Auch die Methanolproduktion kann Synthesegas als Ausgangspunkt verwenden. Ebenfalls kann Synthesegas auch als Ausgangsstoff für die mikrobielle Fermentation verwendet werden, um Alkohole wie Ethanol oder Butanol und andere chemische Bausteine zu gewinnen.</p> <p>Synthesegas: CO₂ + H₂ → CO + H₂O</p>					
	<p>Produkte</p>	<p>TRL</p>	<p>Menge an CO₂ (Tonnen / Tonne Produkt)</p>	<p>Menge an zusätzlichen benötigten Rohstoffen (Tonnen / Tonne Produkt)</p>	<p>Umsetzungsraten (%)</p>	<p>Energiebedarf (MWh / Tonne Produkt)</p>
	<p>Synthesegas</p>	<p>9</p>	<p>1,6</p>	<p>0,08 H₂</p>	<p>50-80</p>	<p>0,6 (50 grüne Wasserstoff- produktion)</p>
<p>Firmen / Projekte</p>	<p>Synthesegas: <u>Technologieanbieter:</u> BASF, Dimensional Energy, INERATEC, Johnson Matthey, Khimod Alcen, Synhelion, Topsoe <u>Produzenten:</u> Nordic Electrofuel, OMV (C2PAT Projekt), VTT</p>					

3.2.3 Fischer-Tropsch Synthese

In der Fischer-Tropsch Synthese wird CO₂-basiertes Synthesegas zu Kohlenwasserstoffen wie synthetischen Kraftstoffen (Diesel, Kerosin, Benzin) und Wachsen sowie zu Naphtha weiterverarbeitet. Das Produkt des FT-Reaktors muss weiterverarbeitet werden, um kommerzielle Kohlenwasserstofffraktionen zu erhalten, die in einer atmosphärischen Destillationskolonne abgetrennt werden. Die diesel- und kerosinähnlichen Fraktionen können zur Herstellung von Kraftstoffen verwendet werden. Die Naphtha-Fraktion kann in bestehende Raffinerien und Steamcracker zur Herstellung von Olefinen eingespeist werden. Bei der Verarbeitung von Fischer-Tropsch-Naphtha werden im Allgemeinen vor allem leichtere, lineare Chemikalien (Ethylen und Propylen) hergestellt und die Produktion von Aromaten wie Benzol ist sehr begrenzt. In diesem Bereich aktive Unternehmen konzentrieren sich derzeit hauptsächlich auf Anwendungen für Kerosin. Auch wenn das Zielprodukt Kerosin ist, werden alle oben genannten Fraktionen in bestimmten Anteilen in den Fischer-Tropsch-Verfahren hergestellt, und andere Produkte wie Naphtha oder Wachse für die chemische Industrie werden verfügbar sein. Kohlenwasserstoffe werden aus Synthesegas via Fischer-Tropsch Synthese mit einer technologischen Reife von 9 hergestellt. Alle weiteren Informationen sind dem Steckbrief in Tabelle 18 zu entnehmen.

Tabelle 18: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO₂ – Fischer-Tropsch Synthese.

Beschreibung	<p>CO₂-basiertes Synthesegas wird zu Kohlenwasserstoffen wie synthetischen Kraftstoffen (Diesel, Kerosin, Benzin) und Wachsen sowie zu Naphtha weiterverarbeitet. Das Produkt des FT-Reaktors muss weiter verarbeitet werden, um kommerzielle Kohlenwasserstofffraktionen zu erhalten, die in einer atmosphärischen Destillationskolonne abgetrennt werden. Die diesel- und kerosinähnlichen Fraktionen können zur Herstellung von Kraftstoffen verwendet werden. Die Naphtha-Fraktion kann in bestehende Raffinerien und Steamcracker zur Herstellung von Olefinen eingespeist werden. Bei der Verarbeitung von Fischer-Tropsch-Naphtha werden im Allgemeinen vor allem leichtere, lineare Chemikalien (Ethylen und Propylen) hergestellt, und die Produktion von Aromaten wie Benzol ist sehr begrenzt. Aktive Unternehmen konzentrieren sich derzeit hauptsächlich auf Anwendungen für Kerosin. Auch wenn das Zielprodukt Kerosin ist, werden alle oben genannten Fraktionen in bestimmten Anteilen in den Fischer-Tropsch-Verfahren hergestellt, und andere Produkte wie Naphtha oder Wachse für die chemische Industrie werden verfügbar sein.</p> <p>Kohlenwasserstoffe: $(2n + 1) H_2 + n CO \rightarrow C_nH_{2n+2} + n H_2O$</p>					
	Produkte	TRL	Menge an CO ₂ -basiertem Synthesegas (Tonnen / Tonne Produkt)	Menge an zusätzlichen benötigten Rohstoffen (Tonnen / Tonne Produkt)	Umsetzungsraten (%)	Energiebedarf (MWh / Tonne Produkt)
	Kohlenwasserstoffe	9	11	-	70-80	4 (inklusive Synthesegasproduktion)
Firmen / Projekte	<p>Kohlenwasserstoffe: Arcadia eFuels, Breogen Project (P2X-Europe and Greenalia), Dimensional Energy, INERATEC, Infinium, Nordic Electrofuel, Norsk e-Fuel, OMV, P2X-Europe, Repsol, SAF+ Consortium, Synhelion, Synkero, Zero Petroleum</p>					

3.2.4 Hydrierung

Bei der Hydrierung reagiert CO_2 mit Wasserstoff (H_2) zu Methan (Sabatierreaktion) oder Methanol und Wasser (H_2O). Zur Durchführung der Reaktion werden spezielle Katalysatoren benötigt. Die CO_2 -Hydrierung ist die am häufigsten angewandte Methode zur Herstellung von Methanol auf CO_2 -Basis und wird kommerziell genutzt. Methanol kann auch durch elektrochemische Reduktion von CO_2 hergestellt werden. Gegenwärtig wird die Hydrierung von CO_2 zu Methan noch nicht in großem Maßstab eingesetzt. Angesichts der zunehmenden Nutzung des rWGS-Verfahrens zur direkten Gewinnung von Synthesegas aus CO_2 könnte die Verwendung von Methan in der chemischen Industrie langfristig an Bedeutung verlieren. Methan kann auch durch biotechnologische Umwandlung gewonnen werden. Mittels Hydrierung wird derzeit Methan mit einer technologischen Reife von 5 und Methanol mit einer technologischen Reife von 9 hergestellt. Alle weiteren Informationen sind dem Steckbrief in Tabelle 19 und Tabelle 20 zu entnehmen.

Tabelle 19: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO₂ – Hydrierung zu Methan.

<p>Beschreibung</p>	<p>Chemische Reaktion zwischen CO₂ und Wasserstoff (H₂) zur Bildung von Methan (Sabatierreaktion) oder Methanol und Wasser (H₂O). Zur Durchführung der Reaktion werden spezielle Katalysatoren benötigt.</p> <p>Methan: $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$</p> <p>Gegenwärtig wird die Hydrierung von CO₂ zu Methan noch nicht in großem Maßstab eingesetzt. Angesichts des Aufstiegs des rWGS-Verfahrens zur direkten Gewinnung von Synthesegas aus CO₂ könnte die Verwendung von Methan in der chemischen Industrie langfristig an Bedeutung verlieren. Methan kann auch durch biotechnologische Umwandlung gewonnen werden.</p>					
	<p>Produkte</p>	<p>TRL</p>	<p>Menge an CO₂ (Tonnen / Tonne Produkt)</p>	<p>Menge an zusätzlichen benötigten Rohstoffen (Tonnen / Tonne Produkt)</p>	<p>Umsetzungsraten (%)</p>	<p>Energiebedarf (MWh / Tonne Produkt)</p>
	<p>Methan</p>	<p>5</p>	<p>2,8</p>	<p>0,5 H₂</p>	<p>70-90</p>	<p>2,5</p>
<p>Firmen / Projekte</p>	<p>Methan: CRONUS Projekt, Hitachi Zosen Inova, Khimod Alcen, MAN Energy Solutions, Uniper, Wärtilä.</p>					

Tabelle 20: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO₂ – Hydrierung zu Methanol.

<p>Beschreibung</p>	<p>Chemische Reaktion zwischen CO₂ und Wasserstoff (H₂) zur Bildung von Methan (Sabatierreaktion) oder Methanol und Wasser (H₂O). Zur Durchführung der Reaktion werden spezielle Katalysatoren benötigt.</p> <p>Methanol: $CO_2 + 3 H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$</p> <p>Die CO₂-Hydrierung ist die am häufigsten angewandte Methode zur Herstellung von Methanol auf CO₂-Basis und wird kommerziell genutzt. Methanol kann auch durch elektrochemische Reduktion von CO₂ hergestellt werden.</p>					
	<p>Produkte</p>	<p>TRL</p>	<p>Menge an CO₂ (Tonnen / Tonne Produkt)</p>	<p>Menge an zusätzlichen benötigten Rohstoffen (Tonnen / Tonne Produkt)</p>	<p>Umsetzungsraten (%)</p>	<p>Energiebedarf (MWh / Tonne Produkt)</p>
	<p>Methanol</p>	<p>9</p>	<p>1,4</p>	<p>0,2 H₂</p>	<p>70-85</p>	<p>11</p>
<p>Firmen / Projekte</p>	<p>Methanol:</p> <p><u>Technologieanbieter:</u> Air Liquide, BioMCN, Breathe Applied Sciences, Bse methanol, BASF, Carbon one, CapCO₂, C4X, Carbon Recycling International (CRI), Clariant, Dalian Institute of Chemical Physics, INERATEC, Johnson Matthey, Khimod Alcen, Mitsubishi Gas Chemical, Oberon Fuel, RealCarbonTech, Swiss Liquid Future/ Thyssenkrupp Industrial Solutions, Thyssenkrupp Steel Europe, Thyssenkrupp Uhde, Topsoe, University of Liverpool</p> <p><u>Produzenten:</u> Carbon one, CapCO₂, Carbon Recycling International (CRI), Henan Shuncheng Group, Jiangsu Sailboat Petrochemicals, Lanzhou New District Petrochemical industry Investment Group, Mitsubishi Gas Chemical, Fairway Methanol, HIF Global, European Energy, Mitsui, CRRC Shandong Wind Power, Datang Duolun Coal Chemical</p> <p>Noch viele weitere weltweite Projekte und Joint Ventures geplant.</p>					

3.2.5 Mineralisierung

Während der Mineralisierung wird CO₂ zu anorganischen Verbindungen fixiert. Man unterscheidet hierbei zwischen *In-situ* und *Ex-situ* Mineralisierung. Bei der *In-situ* Mineralisierung wird CO₂ im Gestein gespeichert. Dabei wird das CO₂ in einer Flüssigkeit, in der Regel H₂O, gelöst und unter Druck und Temperatur in den Untergrund geleitet. Im Untergrund reagiert das CO₂ mit Mineralien aus mafischen und ultramafischen Gesteinen (z. B. Basalt, „Peridotite“) und bildet Karbonate. Bei diesem Prozess wird der Kohlenstoff für lange Zeit gespeichert (CCS). Bei der *Ex-situ* Mineralisierung wird CO₂ in einer Laborumgebung oder in Industrieanlagen in Karbonat umgewandelt. Zur Vergrößerung der Reaktionsoberfläche und damit zur Beschleunigung der Karbonatisierung wird pulverisiertes Gestein verwendet. Alternativ können auch Industrieabfälle wie Hochofen- und Stahlschlacke, Zementofenstaub und Betonabfälle, die Kalzium und Magnesium enthalten, als Ausgangsmaterial verwendet werden. Es gibt einige Technologien auf dem Markt, die den Karbonatisierungsprozess zur Herstellung von Ersatzprodukten der Zementindustrie (CCU) nutzen. Diese Technologien ermöglichen die Herstellung von Zement mit einem geringeren Kohlenstoff-Fußabdruck als alternative Bau- und Konstruktionsmaterialien. Mittels *Ex-situ* Mineralisierung wird Kalziumkarbonat mit einer technologischen Reife von 9 hergestellt. Alle weiteren Informationen sind dem Steckbrief in Tabelle 21 zu entnehmen.

Tabelle 21: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO₂ – Mineralisierung.

Beschreibung	<p>CO₂ wird in anorganischen Verbindungen fixiert.</p> <p><u>In-situ Mineralisierung:</u> CO₂ wird im Gestein gespeichert. Dabei wird das CO₂ in einer Flüssigkeit, in der Regel H₂O, gelöst und unter Druck und Temperatur in den Untergrund geleitet. Im Untergrund reagiert das CO₂ mit Mineralien aus mafischen und ultramafischen Gesteinen (z. B. Basalt, „Peridotite“) und bildet Karbonate. Bei diesem Prozess wird der Kohlenstoff für lange Zeit gespeichert (CCS).</p> <p><u>Ex-situ Mineralisierung:</u> CO₂ wird in einer Laborumgebung oder in Industrieanlagen in Karbonat umgewandelt. Zur Vergrößerung der Reaktionsoberfläche und damit zur Beschleunigung der Karbonatisierung wird pulverisiertes Gestein verwendet. Alternativ können auch Industrieabfälle wie Hochofen- und Stahlschlacke, Zementofenstaub und Betonabfälle, die Kalzium und Magnesium enthalten, als Ausgangsmaterial verwendet werden.</p> <p>Es gibt einige Technologien auf dem Markt, die den Karbonatisierungsprozess zur Herstellung von Ersatzprodukten der Zementindustrie (CCU) nutzen. Diese Technologien ermöglichen die Herstellung von Zement mit einem geringeren Kohlenstoff-Fußabdruck als alternative Bau- und Konstruktionsmaterialien.</p> <p>Kalziumkarbonat: $\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$</p>					
	Produkte	TRL	Menge an CO ₂ (Tonnen / Tonne Produkt)	Menge an zusätzlichen benötigten Rohstoffen (Tonnen / Tonne Produkt)	Umsetzungsraten (%)	Energiebedarf (MWh / Tonne Produkt)
	Kalziumkarbonat	9	0,4	0,6 CaO	60-90	5
Firmen / Projekte	<p>Kalziumkarbonat: Blue Planet Systems, CarbiCrete, Carbon8, CarbonCure, CarbonFree, Denka, Fortera, GreenOre, Green Minerals, greenSand, HeidelbergCement/ Norcem, Heirloom, Mineral Carbonation International, Neustark, Orbix, SCHAEFER KALK, Solidia, VITO</p>					

3.2.6 Polycarbonatsynthese

In der Polycarbonatsynthese reagiert CO_2 mit Epoxiden (Ethylenoxid (EO) oder Propylenoxid (PO)) zur Bildung von Ethylen und Propylencarbonat und weiter zu aliphatischen Polycarbonaten wie PEC oder PPC (Tabelle 23) oder zwischen CO_2 und einem Alkohol zur Bildung von einem Polycarbonatpolyol (Tabelle 24) oder Dialkylcarbonat und weiter zu aromatischen Polycarbonaten (Tabelle 22). Für die Reaktion werden spezielle Katalysatoren benötigt. Darüber hinaus gibt es noch spezielle Polycarbonate wie z. B. Polylimonencarbonat. Hier reagiert CO_2 mit einem Limonen-basiertem Epoxid (Bioabfall, z. B. Orangenschalen) (Tabelle 23). Aromatische und aliphatische Polycarbonate sowie Polycarbonatpolyole werden mit einer technologischen Reife von 9 hergestellt. Alle weiteren Informationen sind dem Steckbrief in Tabelle 22 Tabelle 23 Tabelle 24 zu entnehmen.

Tabelle 22: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO₂ – Polycarbonatsynthese – Aromatische Polycarbonate.

Beschreibung	<p>Chemische Reaktion zwischen CO₂ und Epoxiden (Ethylenoxid (EO) oder Propylenoxid (PO)) zur Bildung von Ethylen und Propylencarbonat und weiter zu aliphatischen Polycarbonaten wie PEC oder PPC oder zwischen CO₂ und einem Alkohol zur Bildung von Dialkylcarbonat und weiter zu aromatischen Polycarbonaten. Für die Reaktion werden spezielle Katalysatoren benötigt.</p> <p>Diphenylcarbonat: $2 \text{C}_6\text{H}_5\text{OH} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_5\text{OCOOPh} + \text{H}_2\text{O}$</p>					
	Produkte	TRL	Menge an CO ₂ (Tonnen / Tonne Produkt)	Menge an zusätzlichen benötigten Rohstoffen (Tonnen / Tonne Produkt)	Umsetzungsraten (%)	Energiebedarf (MWh / Tonne Produkt)
	Diphenylcarbonat für aromatische Polycarbonate	9	0,2	0,4 Phenol	70-90	1
Firmen / Projekte	<p>Aromatische Polycarbonate: <u>Technologieanbieter:</u> Asahi Kasei <u>Produzent:</u> Lotte Chemical, Kazanorgsintez, Saudi Kayan, Shell</p>					

Tabelle 23: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO₂ – Polycarbonatsynthese – Aliphatische Polycarbonate.

<p>Beschreibung</p>	<p>Chemische Reaktion zwischen CO₂ und Epoxiden (Ethylenoxid (EO) oder Propylenoxid (PO)) zur Bildung von Ethylen und Propylencarbonat und weiter zu aliphatischen Polycarbonaten wie PEC oder PPC oder zwischen CO₂ und einem Alkohol zur Bildung von Dialkylcarbonat und weiter zu aromatischen Polycarbonaten. Für die Reaktion werden spezielle Katalysatoren benötigt.</p> <p>Ethylencarbonat: $C_2H_4O + CO_2 \rightarrow C_3H_4O_3$</p> <p>Darüber hinaus gibt es noch spezielle Polycarbonate wie z.B. Polylimonencarbonat. Hier reagiert CO₂ mit einem Limonen-basierendem Epoxid (Bioabfall, z.B. Orangenschalen).</p>					
	<p>Produkte</p>	<p>TRL</p>	<p>Menge an CO₂ (Tonnen / Tonne Produkt)</p>	<p>Menge an zusätzlichen benötigten Rohstoffen (Tonnen / Tonne Produkt)</p>	<p>Umsetzungsraten (%)</p>	<p>Energiebedarf (MWh / Tonne Produkt)</p>
	<p>Ethylencarbonat für aliphatische Polycarbonate</p>	<p>9</p>	<p>0,5</p>	<p>0,5 Ethylenoxid</p>	<p>70-95</p>	<p>1,4</p>
	<p>Polylimonencarbonat</p>	<p>4</p>	<p>10 bar CO₂ für 1,2 kg Polyli- monencarbonat¹</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>-</p>
<p>Firmen / Projekte</p>	<p>Aliphatische Polycarbonate: Empower Materials, Inner Mongolia Mengxi High Tech Group, Jiangsu Zhongke Jinlong CAS Chemical, Jilin Boda New Materials, LG Chem, Norner Innovation, SK Innovation, Taizhou BangFeng Plastic, Tianguan Group/ Nanyang Zhongju Tianguan Low Carbon Technology Company</p> <p>Polylimonencarbonat: Universität Bayreuth, AIMPLAS</p>					

Tabelle 24: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO₂ – Polycarbonatsynthese – Polycarbonatpolyole.

Beschreibung	Chemische Reaktion zwischen CO ₂ und Epoxiden (Ethylenoxid (EO) oder Propylenoxid (PO)) zur Bildung von aliphatischen Polycarbonaten wie PEC oder PPC oder zwischen CO ₂ und einem Alkohol zur Bildung von aromatischen Polycarbonaten. Für die Reaktion werden spezielle Katalysatoren benötigt.					
	Produkte	TRL	Menge an CO ₂ (Tonnen / Tonne Produkt)	Menge an zusätzlichen benötigten Rohstoffen (Tonnen / Tonne Produkt)	Umsetzungsraten (%)	Energiebedarf (MWh / Tonne Produkt)
	Polyethylencarbonatpolyol	9	0,5	0,5 Ethylenoxid	70-95	1,4
Firmen / Projekte	<p>Aliphatische Polycarbonatpolyole:</p> <p><u>Technologieanbieter:</u> Econic Technologies</p> <p><u>Produzent:</u> Aether Industries, Changhua Chemical, Hyundai Motor Group, Jiangsu Zhongke Jinlong CAS Chemical, Manali Petrochemicals, Monument Chemical, Repsol, Saudi Aramco, ViridiCO₂, VTT Technical Research Centre of Finland</p>					

3.2.7 Methanol-to-Olefins (MTO)

Der *Methanol-to-Olefins* (MTO) Prozess beschreibt die Umwandlung von zuvor aus CO₂ oder anderweitig hergestelltem Methanol über das Zwischenprodukt Dimethylether (DME) zu Olefinen- und Polyolefinen. Seit 2010 wurden in China mehrere MTO-Anlagen auf der Grundlage von Methanol auf Kohlegasbasis in Betrieb genommen. Bisläng ist diese Technologie noch nicht für die Olefinproduktion auf CO₂-Basis installiert, obwohl sie technisch machbar wäre. Mehrere Projekte konnten die Verwendung von CO₂-basiertem und bio-basiertem Methanol für die Herstellung von Polyolefinen zeigen. Olefine werden mit einer technologischen Reife von 7 und Dimethylether (DME) mit einer Reife von 6 hergestellt. Alle weiteren Informationen sind dem Steckbrief in Tabelle 25 zu entnehmen.

Tabelle 25: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO₂ – *Methanol-to-Olefins* (MTO).

<p>Beschreibung</p>	<p>CO₂ wird zu Methanol hydriert. Aus Methanol wird dann über das Zwischenprodukt Dimethylether (DME) Olefin- und Polyolefine hergestellt.</p> <p>Seit 2010 wurden in China mehrere MTO-Anlagen auf der Grundlage von Methanol auf Kohlegasbasis in Betrieb genommen. Bislang ist diese Technologie noch nicht für die Olefinproduktion auf CO₂-Basis installiert, obwohl sie technisch machbar wäre. Mehrere Projekte konnten die Verwendung von CO₂-basiertem und bio-basiertem Methanol für die Herstellung von Polyolefinen zeigen.</p>					
	<p>Produkte</p>	<p>TRL</p>	<p>Menge an CO₂-basiertem Methanol (Tonnen / Tonne Produkt)</p>	<p>Menge an zusätzlichen benötigten Rohstoffen (Tonnen / Tonne Produkt)</p>	<p>Umsetzungsraten (%)</p>	<p>Energiebedarf (MWh / Tonne Produkt)</p>
	<p>Olefine für Polyolefine</p>	<p>7</p>	<p>1,3</p>	<p>-</p>	<p>70-85</p>	<p>4</p>
	<p>Dimethylether (DME)</p>	<p>6</p>	<p>-</p>	<p>-</p>	<p>70</p>	<p>-</p>
<p>Firmen / Projekte</p>	<p>Polyolefine: Blue Circle Olefins, Carbon Recycling International (CRI), Fairway Methanol, Vioneo Dimethylether (DME) und Olefine für synthetische Kraftstoffe: Fraunhofer ISE, Vioneo Dimethylether (DME): TNO</p>					

3.2.8 Steamcracken von CO₂-basiertem Naphtha

Beim Steamcracken wird CO₂-basiertes Naphtha, welches zuvor aus CO₂-basiertem Synthesegas via Fischer-Tropsch Synthese hergestellt wurde für die weitere Synthese von Olefinen und Poleolefinen verwendet. Bei der Verarbeitung von Fischer-Tropsch-Naphtha werden im Allgemeinen vor allem leichtere, lineare Chemikalien (Ethylen und Propylen) hergestellt. Olefine, Ethylen und Propylen werden mit einer technologischen Reife von 5 bis 9 hergestellt. Alle weiteren Informationen sind dem Steckbrief in Tabelle 26 zu entnehmen.

Tabelle 26: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO₂ – Steamcracken von CO₂-basiertem Naphtha.

Beschreibung	CO ₂ -basiertes Synthesegas wird über Fischer-Tropsch in Naphtha umgewandelt. Dieses Zwischenprodukt wird als Ausgangsstoff für die weitere Synthese von Olefinen oder Polyolefinen verwendet. Bei der Verarbeitung von Fischer-Tropsch-Naphtha werden im Allgemeinen vor allem leichtere, lineare Chemikalien (Ethylen und Propylen) hergestellt.					
	Produkte	TRL	Menge an CO ₂ -basiertem Naphtha (Tonnen / Tonne Produkt)	Menge an zusätzlichen benötigten Rohstoffen (Tonnen / Tonne Produkt)	Umsetzungsraten (%)	Energiebedarf (MWh / Tonne Produkt)
	Ethylen und Propylen für Polyolefine	5-9	5	-	20-30	3
Firmen / Projekte	<p>Aktive Unternehmen konzentrieren sich derzeit hauptsächlich auf Anwendungen für Kerosin. Auch wenn das Zielprodukt Kerosin ist, werden alle oben genannten Fraktionen in bestimmten Anteilen in den Fischer-Tropsch-Verfahren hergestellt, und andere Produkte wie Naphtha oder Wachse für die chemische Industrie werden verfügbar sein. Die genannten Firmen geben neben synthetischen Kraftstoffen explizit Naphtha als Produkt an.</p> <p>Naphtha: Arcadia eFuels, Infinium, Synhelion</p> <p>Polyolefine: Borealis</p> <p>Die angegebenen Zahlen sind für das konventionelle Steamcracken von fossil-basiertem Naphtha.</p>					

3.2.9 Polyurethane

Für die Herstellung von Polyurethanen werden Polycarbonatpolyole (Kapitel 3.2.6, Tabelle 24) mit Isocyanat chemisch zu Polyurethanen umgesetzt. Ein anderer Weg führt über sogenannte Non-Isocyanat-Polyurethane (NIPU), hier reagiert zuerst CO_2 mit einem Diamin zu einem Carbamat, welches dann in einer Polykondensation mit einem Polyol zu einem Polyurethan führt. Isocyanat-basierte Polyurethane werden mit einer technologischen Reife von 7 hergestellt und Non-Isocyanat-Polyurethane mit einer Reife von 5. Alle weiteren Informationen sind dem Steckbrief in Tabelle 27 zu entnehmen.

Tabelle 27: Steckbrief – Chemische Umwandlung von CO₂ – Polyurethane.

Beschreibung	<p>Polycarbonatpolyole (siehe Polycarbonatsynthese) werden mit Isocyanat chemisch zu Polyurethanen umgesetzt. Ein anderer Weg sind sogenannte Non-Isocyanat-Polyurethane, hier reagiert zuerst CO₂ mit einem Diamin zu einem Carbamat, welches dann in einer Polykondensation mit einem Polyol zu einem Polyurethan führt.</p>					
	Produkte	TRL	Menge an CO ₂ (Tonnen / Tonne Produkt)	Menge an zusätzlichen benötigten Rohstoffen (Tonnen / Tonne Produkt)	Umsetzungsraten (%)	Energiebedarf (MWh / Tonne Produkt)
	<p>Polyurethane (PU/PUR)</p> <p>Non-Isocyanat Polyurethane (NIPU)</p>	<p>7</p> <p>5</p>	<p>-</p> <p>-</p>	<p>-</p> <p>-</p>	<p>-</p> <p>-</p>	<p>-</p> <p>-</p>
Firmen / Projekte	<p>Polyurethane (PU/PUR): Die Firma Covestro hat bis 2023 Polyurethane basierend auf dem firmeneigenen Polycarbonatpolyol cardyon® hergestellt.</p> <p>Non-Isocyanat Polyurethane (NIPU): Fraunhofer IFAM, Far Eastern New Century Corporation</p>					

3.2.10 Zusammenfassung der technologischen Konzepte für die chemische Umwandlung von CO₂

Tabelle 28 zeigt die Zusammenfassung der technologischen Konzepte für die chemische Umwandlung von CO₂ in Hinblick auf die direkte CO₂-Nutzung durch das jeweilige technologische Konzept, ob Wasserstoff und / oder andere zusätzliche Rohstoffe benötigt werden und ob ein vorgeschalteter oder nachgeschalteter Prozess notwendig ist. Während die technologischen Konzepte Elektrochemie, *reverse Water Gas Shift* (rWGS), Hydrierung, Mineralisierung und die Polycarbonatsynthese direkt CO₂ verwerten und umwandeln, benötigen andere Konzepte zusätzliche vorgeschaltete Prozesse, die das CO₂ zunächst in ein Zwischenprodukt umwandeln, welches dann wiederum in dem technologischen Konzept genutzt werden kann. Zu diesen Konzepten gehören die Fischer-Tropsch Synthese, diese benötigt Synthesegas als Rohstoff welches in einer vorherigen rWGS hergestellt wird. Der *Methanol-to-Olefins* (MTO) Prozess benötigt Methanol als Rohstoff, dieses wird dann, im CCU-Kontext, in einer vorherigen Hydrierung aus CO₂ und H₂ hergestellt. Für die Herstellung von CO₂-basiertem Naphtha für das Steamcracken wird zunächst in einer rWGS aus CO₂ Synthesegas hergestellt, welches dann in einer Fischer-Tropsch Synthese zu Naphtha und anderen Kohlenwasserstoffen umgesetzt wird. Polyurethane werden mit Polycarbonatpolyolen hergestellt, welche zuvor aus CO₂ in der Polycarbonatsynthese synthetisiert worden sind.

Tabelle 28: Zusammenfassung der technologischen Konzepte für die chemische Umwandlung von CO₂.

Technologisches Konzept	Direkte CO ₂ -Nutzung (nach CO ₂ -Abscheidung)	Wasserstoff-Elektrolyse	Zusätzliche Rohstoffe (andere als CO ₂ und H ₂)	Zusätzlicher vorgeschalteter Prozess	Zusätzlicher nachgeschalteter Prozess
Elektrochemie	✓	X	H ₂ O	X	X
rWGS (reverse Water Gas Shift)	✓	✓	X	X	Optional: Fischer-Tropsch Synthese
Fischer-Tropsch Synthese	X	X	X	rWGS (reverse Water Gas Shift)	Optional: Steamcracken von CO ₂ -basiertem Naphtha
Hydrierung	✓	✓	X	X	Optional: <i>Methanol-to-Olefins</i> (MTO)
Mineralisierung	✓	X	CaO	X	X
Polycarbonatsynthese	✓	X	Epoxid	X	Optional: Polyurethane
<i>Methanol-to-Olefins</i> (MTO)	X	X	X	Hydrierung	X
Steamcracken von CO₂-basiertem Naphtha	X	X	X	rWGS (reverse Water Gas Shift) Fischer-Tropsch Synthese	X
Polyurethane	X	X	Isocyanat Diamin	Polycarbonatsynthese	X

Während die vorgeschalteten Prozesse absolut notwendig sind damit die entsprechenden technologischen Konzepte funktionieren, ist ein zusätzlich nachgeschalteter Prozess, nicht zwingend notwendig, sondern optional. Das Synthesegas aus der rWGS muss nicht unbedingt weiter in der Fischer-Tropsch Synthese umgesetzt werden. Es ist ein CO₂-Hauptprodukt und kann als solches vertrieben oder für die Synthese von anderen Chemikalien eingesetzt werden (siehe hierzu Kapitel 4). Dasselbe gilt für das Naphtha aus der Fischer-Tropsch Synthese, dem Methanol aus der Hydrierung und den Polycarbonatpolyolen aus der Polycarbonatsynthese.

3.3 Steckbriefe – Biotechnologische Umwandlung von CO₂

Wie in Kapitel 3 und Kapitel 3.2 beschrieben, sollen die identifizierten technologischen Konzepte in Steckbriefen und unter verschiedenen Gesichtspunkten vorgestellt werden. Neben einer Beschreibung der Technologie und der Benennung der derzeitigen hauptsächlichen Produkte, wird auch die unterschiedliche technologische Reife der Konzepte (TRL) benannt. Des Weiteren werden Prozess-spezifische Angaben gemacht zu: Menge an CO₂ (Tonnen / Tonne Produkt), Menge an zusätzlichen benötigten Rohstoffen (Tonnen / Tonne Produkt), Umsetzungsraten (%), Faraday-Effizienz (%) und dem Energiebedarf (MWh / Tonne Produkt). Es ist zu beachten, dass diese Parameter für dasselbe technologische Konzept unterschiedlich ausfallen können, je nach betrachtetem Produkt. Die Daten für die verschiedenen Parameter stammen aus verschiedenen Quellen (z. B. wissenschaftliche Artikel, Vorträge, mündliche Kommunikation, künstliche Intelligenz), die jeweils miteinander abgeglichen worden sind und geben Bereiche für die jeweiligen Parameter an. Sie beziehen sich auf das jeweilige exemplarische Produkt und können sich je nach spezifischem Technologieanbieter und Unternehmen unterscheiden. Wenn nicht anders angegeben, bezieht sich der Energiebedarf (MWh / Tonne Produkt) nur auf den jeweils benannten Prozess und bezieht nicht den Energiebedarf für z. B. CO₂-Abscheidung, H₂-Produktion, Synthesegasherstellung und die Herstellung anderer Vorprodukte, die in diesem Prozess umgesetzt werden, ein.

3.3.1 Acetogenes Bakteriensystem

Acetogene Bakterien wie zum Beispiel *Clostridium ljungdahlii* sind chemoautotrophe Bakterien, die Gase wie Synthesegas oder CO₂ als Kohlenstoffquelle nutzen und diese fermentativ in Alkohole und Chemikalien umwandeln können. Derzeit gängige Produkte, die mit einem acetogenen Bakteriensystem hergestellt werden können sind Butanol und Ethanol. Im Falle der Butanolherstellung handelt es sich um ein hybrides Verfahren, welches im Rheticus-Projekt von Evonik und Siemens Energy (<https://www.creavis.com/de/erfolgsgeschichten/aktuelle-projekte/rheticus>) etabliert worden ist. Hierbei handelt es sich um einen Zwei-Schritt Prozess bei dem zunächst CO₂ elektrochemisch in CO umgewandelt wird. Das Kohlenmonoxid wird dann, in einem zweiten Schritt als Kohlenstoffquelle fermentativ zu Butanol umgesetzt. Dieser Zwei-Schritt Prozess für die Herstellung von Butanol hat eine technologische Reife von 6. Vorreiter für die biotechnologische Herstellung von Ethanol aus kohlenstoffhaltigen Gasen ist das amerikanische Unternehmen LanzaTech. Es nutzt ein acetogenes Bakteriensystem welches in der Lage ist verschiedene Abgasströme (z. B. Stahlerzeugung, Müllverbrennung, Biomasse), als Kohlenstoffquelle, zu nutzen. Dieses System nutzt nicht nur das CO₂ sondern den gesamten Abgasstrom. So wird zum Beispiel im Steelanol-Projekt (<http://www.steelanol.eu/en>) von LanzaTech und ArcelorMittal in Belgien, der gesamte

Hochofen-Abgasstrom aus der Stahlerzeugung, der CO, CO₂ und H₂ enthält, genutzt um Ethanol herzustellen, es findet keine vorherige CO₂-Separierung statt. Dieser Prozess für die Herstellung von Ethanol hat eine technologische Reife von 9. Alle weiteren Informationen sind dem Steckbrief in Tabelle 29 zu entnehmen.

Tabelle 29: Steckbrief – Biotechnologische Umwandlung von CO₂ – Acetogenes Bakteriensystem.

Beschreibung						
Fermentative Umwandlung von Synthesegas, CO oder CO ₂ in Alkohole und Chemikalien.						
Produkte	TRL	Menge an CO ₂ (Tonnen / Tonne Produkt)	Menge an zusätzlichen benötigten Rohstoffen (Tonnen / Tonne Produkt)	Umsetzungsraten (%)	Energiebedarf (MWh / Tonne Produkt)	
Butanol	6	3	Elektrochemie kombiniert mit Biotechnologie, Zwei-Schritt-Prozess: 1. CO ₂ Elektrolyse zu CO, 2. Biotechnologische Umsetzung von CO zu Butanol	30-40	-	
Ethanol*	5-9	15		-	-	
Firmen / Projekte	<p>Butanol: Rheticus Projekt</p> <p>Ethanol: Again, LanzaTech, Synata Bio</p> <p>* LanzaTech nutzt kein reines CO₂ sondern den gesamten Hochofen-Abgasstrom (CO, CO₂ und H₂) aus der Stahlerzeugung (Steelnol Projekt). Die angegebene Menge bezieht sich hier also nicht auf CO₂ sondern auf den gesamten Abgasstrom.</p>					

3.3.2 Archaea-basiertes System

Wie acetogene Bakterien gehören die Archaeen wie zum Beispiel die Gattung *Methanococcus* zu den chemoautotrophen Mikroorganismen und setzen Synthesegas oder CO₂ um, in diesem Fall zu Gasen wie zum Beispiel Methan. Das deutsche Unternehmen Electrochaea hat ein, nun kommerziell, verfügbares Archaea-basiertes System entwickelt, welches CO₂ und H₂ fermentativ in Methan umwandelt. Dieser Prozess hat eine technologische Reife von 9. Alle weiteren Informationen sind dem Steckbrief in Tabelle 30 zu entnehmen.

Tabelle 30: Steckbrief – Biotechnologische Umwandlung von CO₂ – Archaea-basiertes System.

Beschreibung	Fermentative Umwandlung von CO ₂ in Methan.					
	Produkte	TRL	Menge an CO ₂ (Tonnen / Tonne Produkt)	Menge an zusätzlichen benötigten Rohstoffen (Tonnen / Tonne Produkt)	Umsetzungsraten (%)	Energiebedarf (MWh / Tonne Produkt)
	Methan	9	2,8	0,5 H ₂	30-40	1-2
Firmen / Projekte	Methan: Electrochaea, Krajete, Micropyros, qpover					

3.3.3 Cyanobakterielles System

Cyanobakterien gehören zu den photoautotrophen Mikroorganismen und betreiben natürliche Photosynthese in dem sie Licht als Energiequelle nutzen. Des Weiteren sind Cyanobakterien wie zum Beispiel Arten der Gattung *Spirulina* in der Lage Synthesegas und CO₂ als Kohlenstoffquelle zu nutzen. Die Nutzung von cyanobakteriellen Systemen für die biotechnologische Umwandlung von CO₂ hat noch eine relativ niedrige technologische Reife von 5, im Vergleich zu den anderen vorgestellten technologischen Konzepten. Das amerikanische Unternehmen stellt mit einem Prototypen Butanol mit Hilfe von Cyanobakterien her. Alle weiteren Informationen sind dem Steckbrief in Tabelle 31 zu entnehmen.

Tabelle 31: Steckbrief – Biotechnologische Umwandlung von CO₂ – Cyanobakterielles System.

Beschreibung	Natürliche Photosynthese zur Umwandlung von CO ₂ in Chemikalien.					
	Produkte	TRL	Menge an CO ₂ (Tonnen / Tonne Produkt)	Menge an zusätzlichen benötigten Rohstoffen (Tonnen / Tonne Produkt)	Umsetzungsraten (%)	Energiebedarf (MWh / Tonne Produkt)
	Butanol	5	2	-	50	0
Firmen / Projekte	Butanol: Phytonix Ethanol und synthetische Kraftstoffe: Algenol					

3.3.4 Mikroalgen System

Wie auch die Cyanobakterien gehören die Mikroalgen wie zum Beispiel Arten der Gattung *Pavlova* zu den photoautotrophen Mikroorganismen. Sie nutzen Licht, als Energiequelle und CO₂ als Kohlenstoffquelle, für die fermentative Herstellung von Chemikalien. Wie auch das cyanobakterielle System hat die Nutzung von Mikroalgen für die biotechnologische Umwandlung von CO₂ noch eine relativ niedrige technologische Reife, 5, im Vergleich zu den anderen vorgestellten technologischen Konzepten. Es gibt derzeit verschiedene Unternehmen weltweit die unterschiedliche Produkte aus CO₂ mit Hilfe von Mikroalgen herstellen, zum Beispiel Proteine, Farbstoffe, synthetische Kraftstoffe oder Kohlenwasserstoffe. Allerdings befinden sich viele dieser Entwicklungen noch im finalen Labormaßstab oder in der Prototypennutzung.

Alle weiteren Informationen sind dem Steckbrief in Tabelle 32 zu entnehmen.

Tabelle 32: Steckbrief – Biotechnologische Umwandlung von CO₂ – Mikroalgen System.

Beschreibung	Natürliche Photosynthese zur Umwandlung von CO ₂ in Chemikalien.					
	Produkte	TRL	Menge an CO ₂ (Tonnen / Tonne Produkt)	Menge an zusätzlichen benötigten Rohstoffen (Tonnen / Tonne Produkt)	Umsetzungsraten (%)	Energiebedarf (MWh / Tonne Produkt)
		5	-	-	-	-
Firmen / Projekte	Farbstoffe: Pond Technologies Kohlenwasserstoffe: Syklea Proteine: Cellana Synthetische Kraftstoffe: Aljadix					

3.3.5 Zusammenfassung der technologischen Konzepte für die biotechnologische Umwandlung von CO₂

Tabelle 33 zeigt die Zusammenfassung der technologischen Konzepte für die biotechnologische Umwandlung von CO₂ in Hinblick auf die direkte CO₂-Nutzung, ob Wasserstoff und / oder andere zusätzliche Rohstoffe benötigt werden und ob ein vorgeschalteter oder nachgeschalteter Prozess notwendig ist. Alle technologischen Konzepte für die biotechnologische Umwandlung von CO₂ sind eigenständig, also sogenannte *Stand Alone*-Prozesse (nähere Informationen siehe Kapitel 4.4.1), das heißt es Bedarf keinen vor- und / oder nachgeschalteten Prozess um CO₂ in ein Produkt umzuwandeln. Was die Notwendigkeit von zusätzlichen Rohstoffen, andere als CO₂ und H₂, anbelangt, so ist eine allgemeingültige Aussage für jedes einzelne biotechnologische Umwandlungssystem unmöglich. Das hängt damit zusammen, dass es viele unterschiedliche Gattungen und Arten in der jeweiligen Mikroorganismengruppe gibt, die unterschiedliche Präferenzen in den Kohlenstoffquellen haben, die sie verwerten können. Deswegen ist es prozess-/ Mikroorganismen-spezifisch möglich, dass noch weitere Kohlenstoffquellen wie Glukose oder Vitamine hinzugefügt werden müssen.

Tabelle 33: Zusammenfassung der technologischen Konzepte für die biotechnologische Umwandlung von CO₂.

Technologisches Konzept	Direkte CO ₂ -Nutzung (nach CO ₂ -Abscheidung)	Wasserstoff-Elektrolyse	Zusätzliche Rohstoffe (andere als CO ₂ und H ₂)	Zusätzlicher vorgeschalteter Prozess	Zusätzlicher nachgeschalteter Prozess
Acetogenes Bakterien-system	Prozess-spezifisch	Prozess-spezifisch	Prozess-spezifisch	X	X
Archaea-basiertes System	✓	✓	Prozess-spezifisch	X	X
Cyanobakterielles System	✓	X	Prozess-spezifisch	X	X
Mikroalgen System	✓	X	Prozess-spezifisch	X	X

Alle technologischen Konzepte für die biotechnologische Umwandlung von CO₂, ausgenommen das acetogene Bakteriensystem, nutzen direkt CO₂ und benötigen Wasserstoff. Beim acetogenen Bakteriensystem wiederum ist das prozess-spezifisch. Wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben, nutzt das Unternehmen LanzaTech ein acetogenes Bakteriensystem, welches den gesamten Hochofen-Abgasstrom aus der Stahlerzeugung, der CO, CO₂ und H₂ enthält, um Ethanol herzustellen.

4 Mögliche CO₂-Anwendungen und Wertschöpfungsketten

Der Fokus für die Identifizierung von möglichen CO₂-Anwendungen und Wertschöpfungsketten in Baden-Württemberg liegt auf den in Kapitel 3.2 und 3.3 vorgestellten technologischen Konzepten und den genannten hergestellten CO₂-basierten Produkten. Im Mittelpunkt stehen auch hier potenzielle regionale Wertschöpfungsketten in Baden-Württemberg, mögliche überregionale Optionen werden ebenfalls berücksichtigt.

4.1 Produkte, Märkte und Industrien – Chemische und biotechnologische Umwandlung von CO₂

Als Grundlage für die Visualisierung verschiedener Wertschöpfungsketten wurde zunächst eine Übersicht der einzelnen CO₂-basierten Produkte, je nach technologischem Konzept und ihre Nutzung in den verschiedenen Märkten und Industrien erstellt (Tabelle 34 und Tabelle 35). Der Bereich „Märkte“ beschreibt hier für welche weiteren Chemikalien das CO₂-basierte Produkt als Rohstoff genutzt wird oder als für das CO₂-basierte Produkt direkt verwendet werden kann. Ein Beispiel hierfür ist Ethanol. Es kann zum einen durch das technologische Konzept Elektrochemie durch chemische Umwandlung von CO₂ (Tabelle 34) und durch das technologische Konzept acetogenes Bakteriensystem durch biotechnologische Umwandlung von CO₂ (Tabelle 35) hergestellt werden. Die Verwendungsoptionen bleiben in beiden Fällen gleich.

Tabelle 34: Übersicht Produkte, Märkte und Industrien – Chemische Umwandlung von CO₂.

Technologisches Konzept	Produkte	Märkte (Herstellungs- und Verwendungszweck der Produkte)	Branchen
Elektrochemie	Kohlenmonoxid	Acrylsäure, Aldehyde, Ameisensäure, Essigsäure, Metallcarbonyle, Methanol, Phosgen, Reduktionsmittel, Reinigungsmittel für Metalle, Tertiäre Carbonsäuren.	Chemische Industrie, Metallindustrie
	Ethanol	Desinfektionsmittel, Essigsäureethylester, Ethylacrylat, Ethylen,	Chemische Industrie, Kraftstoffindustrie, Lebensmittelindustrie,

		Ethylchlorid, Flugtreibstoff, Glykolether, Lebensmittelzusatz, Lösungsmittel, Kraftstoffe	Lackindustrie, Arzneimittelindustrie, Heilmittelindustrie
	Ethylen	1,2-Dichlorethan, Ethanol, Ethylbenzol, Ethylenoxid, Olefine, Polyethylen, Polyolefine, Styrol, Vinylchlorid	Chemische Industrie, Kunststoffindustrie
rWGS (<i>reverse Water Gas Shift</i>)	Synthesegas	Ammoniak, Dimethylether, Ethan, Ethanol, Methan, Methanol, Synthetische Kraftstoffe, Naphtha, Wachse	Chemische Industrie Kerzenindustrie, Kosmetikindustrie Kraftstoffindustrie
Fischer-Tropsch Synthese	Naphtha	BTEX (Benzen, Toluol, Ethylbenzol, Xylol), Kraftstoffe, Lösungsmittel, Olefine, Polyolefine	Chemische Industrie, Kraftstoffindustrie
	Synthetische Kraftstoffe	Diesel, Benzin, Kerosin	Kraftstoffindustrie
	Wachse (synthetische Paraffine)	Bindemittel, Imprägnierung, Kerzen, Konservierung, Kosmetik	Kerzenindustrie, Kosmetikindustrie, Materialindustrie
Hydrierung	Methan	Brennstoff, Cyanwasserstoff, Ethin, Halogenalkane, Kohlenstoffmonoxid, Kraftstoff, Schwefelkohlenstoff, Wasserstoff	Chemische Industrie, Kraftstoffindustrie
	Methanol	Essigsäure, Formaldehyd, Flugtreibstoff, Kraftstoff, Lösungsmittel, Methylamin, Methylchlorid, Methylmethacrylat, MTBE	Chemische Industrie, Kraftstoffindustrie
Mineralisierung	Kalziumkarbonat	Dünger, Füllstoff, Lebensmittelzusatzstoff, Zuschlagstoff	Baustoffindustrie, Düngereindustrie, Lebensmittelindustrie, Stahlindustrie
Polycarbonat-synthese	Polycarbonat	Kunststoff, Polymer	Kunststoffindustrie
	Polycarbonat-polyol	Polyurethane	Kunststoffindustrie
<i>Methanol-to-Olefins</i> (MTO)	Dimethylether (DME)	Kraftstoff, Lösemittel, Treibgas	Kosmetikindustrie, Kraftstoffindustrie, Lackindustrie
	Olefine	Aldehyde, Alkohole, Carbonsäuren, Fettalkohole (Tenside), Mercaptane, Polyolefine	Chemische Industrie, Kunststoffindustrie
	Polyolefine	Polybutylen, Polyethylen, Polyisobutylen, Polymethylpenten, Polypropylen	Kunststoffindustrie

Steamcracken von CO ₂ -basiertem Naphtha	Olefine	Aldehyde, Alkohole, Carbonsäuren, Fettalkohole (Tenside), Mercaptane, Polyolefine	Chemische Industrie, Kunststoffindustrie
	Polyolefine	Polybutylen, Polyethylen, Polyisobutylen, Polymethylpenten, Polypropylen	Kunststoffindustrie
Polyurethane	Polyurethane	Gießharze, Klebstoff, Kunststoff, Lack, Polymer, Schaumstoffe	Klebstoffindustrie, Kunststoffindustrie, Lackindustrie, Materialindustrie

Unabhängig vom Herstellungsverfahren kann Ethanol direkt als Desinfektionsmittel, Lösungsmittel, Lebensmittelzusatz zur Konservierung und als Kraftstoff verwendet werden. Nach einem weiteren Aufbereitungsprozess, dem sogenannten *Alcohol-to-Jet*-Prozess, kann Ethanol auch als nachhaltiger Flugtreibstoff (*Sustainable Aviation Fuel (SAF)*) genutzt werden. Des Weiteren dient Ethanol als Grundchemikalie als Ausgangsmaterial für eine Vielzahl von weiteren Chemikalien wie Essigsäureethylester, Ethylacrylat, Ethylen, Ethylchlorid, und Glykolether.

Tabelle 35: Übersicht Produkte, Märkte und Industrien – Biotechnologische Umwandlung von CO₂.

Technologisches Konzept	Produkte	Märkte (Herstellungs- und Verwendungszweck der Produkte)	Branchen
Acetogenes Bakteriensystem	Butanol	Acrylat, Butylacetat, Glykolbutylether, Kraftstoff, Lösungsmittel, Phthalat	Chemische Industrie, Kraftstoffindustrie, Lackindustrie
	Ethanol	Desinfektionsmittel, Essigsäureethylester, Ethylacrylat, Ethylen, Ethylchlorid, Flugtreibstoff, Glykolether, Kraftstoff, Lebensmittelzusatz, Lösungsmittel	Chemische Industrie, Kraftstoffindustrie, Lebensmittelindustrie
Archaea-basiertes System	Methan	Brennstoff, Cyanwasserstoff, Ethin, Halogenalkane, Kohlenstoffmonoxid, Kraftstoff, Schwefelkohlenstoff, Wasserstoff	Chemische Industrie, Kraftstoffindustrie
Cyanobakterielles System	Butanol	Acrylat, Butylacetat, Glykolbutylether, Kraftstoff, Lösungsmittel, Phthalat	Chemische Industrie, Kraftstoffindustrie, Lackindustrie
Mikroalgen System	Farbstoffe	Farbstoffe	Kunststoffindustrie, Lebensmittelindustrie, Materialindustrie, Papierindustrie, Textilindustrie

Naphtha	BTEX (Benzen, Toluol, Ethylbenzol, Xylol), Kraftstoffe, Lösungsmittel, Olefine, Polyolefine	Chemische Industrie, Kraftstoffindustrie
Proteine	Proteine	Chemische Industrie, Futtermittelindustrie, Nahrungsmittelindustrie, Pharmaindustrie
Synthetische Kraftstoffe	Diesel, Benzin, Kerosin	Kraftstoffindustrie
Wachse (synthetische Paraffine)	Bindemittel, Imprägnierung, Kerzen, Konservierung, Kosmetik	Kerzenindustrie, Kosmetikindustrie, Materialindustrie

4.2 Wertschöpfungsketten – Chemische und biotechnologische Umwandlung von CO₂

Die erstellten Wertschöpfungsketten basieren auf den in Kapitel 3.2 und 3.3 vorgestellten technologischen Konzepten, den genannten hergestellten CO₂-basierten Produkten sowie den in Kapitel 4.1, Tabelle 34 und Tabelle 35 identifizierten Märkten und Industrien. Für die Identifizierung von Technologieanbietern, sowie potenziellen Zwischenprodukt- und Endproduktabnehmern liegt der Fokus auf Baden-Württemberg. Sollten hier keine Akteure, Technologieanbieter und Produktabnehmer vorhanden sein, wird der Betrachtungsraum schrittweise auf umliegende Bundesländer, Deutschland, Europa und schließlich weltweit erweitert.

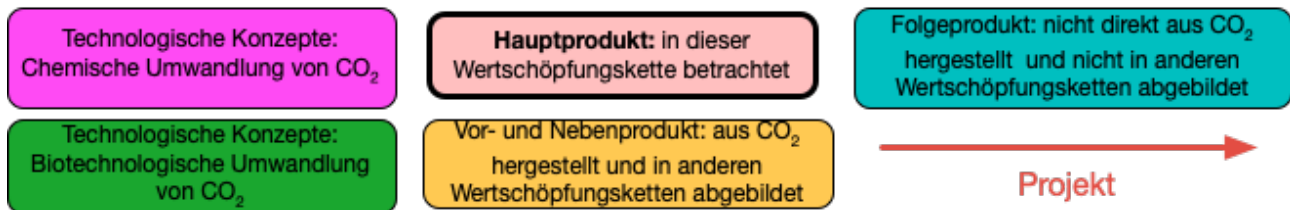


Abbildung 13: Legende – Wertschöpfungsketten.

Zur übersichtlicheren Darstellung wurden verschiedene Wertschöpfungsketten erstellt. Diese wurden aufgrund der einzelnen CO₂-basierten Hauptprodukte zusammengefasst. Die Darstellung und Farbgebung ist in jeder der einzelnen Wertschöpfungsketten identisch und ist in

Abbildung 13 beschrieben. Die Bezeichnung „Hauptprodukt“ (rosa) entspricht der Spalte „Produkte“ in Tabelle 34 und Tabelle 35 (Kapitel 4.1). Das sind die primären Produkte basierend auf CO₂ aus den verschiedenen Technologischen Konzepten und bilden den Fokus der Wertschöpfungsketten. Hersteller, Technologieanbieter und potenzielle Abnehmer dieser Produkte in Baden-Württemberg oder umliegenden Bundesländer werden benannt. Die Bezeichnung „Folgeprodukt“ (petrol) entspricht der Spalte „Märkte“ in Tabelle 34 und Tabelle 35 (Kapitel 4.1). Hierbei handelt es sich um Folgeprodukte der primären Produkte. Hersteller und potenzielle Abnehmer dieser Produkte und Industrien in Baden-Württemberg oder umliegenden Bundesländer werden ebenfalls benannt. Bei den dargestellten Wertschöpfungsketten und

darin genannten Unternehmen handelt es sich nicht um bereits etablierte Wertschöpfungsketten, sondern lediglich um potentielle Wertschöpfungsketten und potentielle Akteure in Baden-Württemberg. Ebenfalls sind auch in jeder Wertschöpfungskette die entsprechenden technologischen Konzepte (Chemische Umwandlung von CO₂, magenta; biotechnologische Umwandlung von CO₂, grün) genannt, sowie Vor- und Nebenprodukte (orange), die ebenfalls aus CO₂ durch diese technologischen Konzepte hergestellt werden, aber in anderen Wertschöpfungsketten abgebildet sind.

4.2.1 Wertschöpfungskette 1 – Synthetische Kraftstoffe, Wachse, Naphtha, DME, Olefine und Polyolefine

Wertschöpfungskette 1 betrachtet die CO₂-basierten Hauptprodukte synthetische Kraftstoffe wie Benzin, Diesel und Kerosin, Wachse, Naphtha, Dimethylether (DME) und Olefine und Polyolefine (Abbildung 14). Synthetische Kraftstoffe, Wachse und Naphtha können zum einen durch die chemische Umwandlung von CO₂ hergestellt werden, sowie auch durch die biotechnologische Umwandlung von CO₂. Bei der chemischen Umwandlung von CO₂ wird zunächst mit Hilfe der *reverse Water Gas Shift* (rWGS) Reaktion aus CO₂ und H₂ Synthesegas hergestellt. Dieses Synthesegas wird dann in einer anschließenden Fischer-Tropsch Synthese in die verschiedenen Kohlenwasserstoffe umgewandelt. Je nach Verfahrenstemperatur, Druck und verwendetem Katalysator können bestimmte Produkte favorisiert werden. Zur Trennung der einzelnen Produkte können verschiedene Verfahren wie Adsorption, Ölwäsche oder Destillation genutzt werden. Das in Karlsruhe ansässige Start-up INERATEC hat sowohl Technologien für die rWGS sowie auch für die Fischer-Tropsch Synthese entwickelt (Kapitel 4.3.1, Tabelle 38).

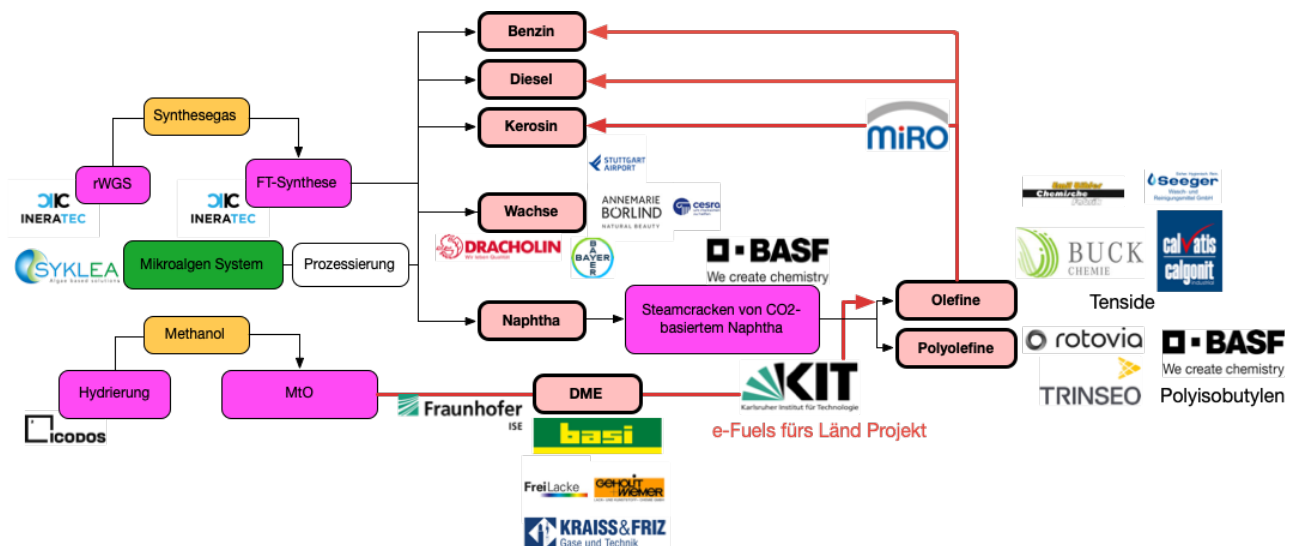


Abbildung 14: Wertschöpfungskette 1 – Synthetische Kraftstoffe, Wachse, Naphtha, DME, Olefine und Polyolefine.

Laut eigenen Aussagen kann das französische Unternehmen Syklea (Kapitel 4.3.1, Tabelle 44) durch die biotechnologische Umwandlung von CO₂ in ihrem entwickelten Mikroalgen System ebenfalls die verschiedenen Kohlenwasserstoffe Benzin, Diesel, Kerosin, Wachse und Naphtha herstellen. Hier bedarf es dann einer zusätzlichen Prozessierung um die Produkte von den Mikrolagen und untereinander zu trennen (genaue Informationen zum spezifischen Prozessablauf und der Prozessierung gibt es vom Unternehmen Syklea nicht).

Die entstehenden synthetischen Kraftstoffe Benzin und Diesel können direkt als solche verwendet werden, ein Abnehmer für das hergestellte Kerosin wäre zum Beispiel der Flughafen Stuttgart (Kapitel 4.3.1, Tabelle

39) der schon im vom Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg geförderten “e-Fuels fürs Länd”-Projekt beteiligt war. Hier waren allerdings Olefine die Ausgangsstoffe, die in der Mineralö Raffinerie Oberrhein (Miro) (Kapitel 4.3.1, Tabelle 39) zu Kerosin umgesetzt wurden. Diese wurden wiederum vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (Kapitel 4.3.1, Tabelle 37) über das Zwischenprodukt Dimethylether (DME) mit dem *Methanol-to-Olefins* (MTO)-Prozess (Fraunhofer ISE (Kapitel 4.3.1, Tabelle 37)) hergestellt. Um Methanol im MTO-Prozess verwenden zu können muss diese zunächst mittels Hydrierung von CO₂ hergestellt werden. Einen solchen Hydrierungsprozess hat das Mannheimer Start-up ICODOS entwickelt (Kapitel 4.3.1, Tabelle 38).

Die entstehenden Wachse, auch bekannt als synthetische Paraffine, sind für die Kosmetikindustrie und die Materialindustrie interessant. So könnte zum Beispiel der Wachshersteller Dracholin (Kapitel 4.3.2, Tabelle 46) in Metzingen ein potentieller Produktabnehmer sein, sowie die Hersteller medizinischer Kosmetika Cesra Arzneimittel (Kapitel 4.3.2, Tabelle 48) in Baden-Baden und die Bayer AG (GP Grenzach Produktions GmbH) (Kapitel 4.3.2, Tabelle 49) als Hersteller von Salben, Cremes und Lotionen in Grenzach-Whylen, sowie der Kosmetikhersteller Börlind Gesellschaft für kosmetische Erzeugnisse mbH (Kapitel 4.3.2, Tabelle 49), ansässig in Calw.

Das hergestellte Naphtha kann durch Steamcracken, zum Beispiel bei der BASF in Ludwigshafen (Rheinland-Pfalz) (Kapitel 4.3.2, Tabelle 46) in Olefine und Polyolefine umgewandelt werden. Olefine können natürlich auch über den schon oben beschriebenen Weg über den MTO-Prozess via DME als Zwischenprodukt hergestellt werden. α -Olefine können zum Beispiel genutzt werden um Tenside herzustellen, diese sind interessant für Reinigungsmittelhersteller wie BUCK-Chemie in Herrenberg, Calavtis in Ladenburg, Emil Bihler Chemische Fabrik in Geislingen an der Steige und Seeger Wasch- und Reinigungsmittel in Balingen (Kapitel 4.3.2, Tabelle 46). Die durch das Steamcracken des Naphthas hergestellten Polyolefine können direkt zum Rotationsschmelzen vom Unternehmen Rotovia Hockenheim genutzt werden oder vom Polymerhersteller Trinseo in Rheinmünster, ebenfalls können sie als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Polyisobutylen des Unternehmens BASF in Ludwigshafen (Rheinland-Pfalz) genutzt werden (Kapitel 4.3.2, Tabelle 46).

Dimethylether (DME) welches als Zwischenprodukt im MTO-Prozess anfällt kann natürlich weiter zu Olefinen umgesetzt werden, es kann aber auch als Lösungsmittel in der Lackindustrie genutzt werden. Hier finden sich in Baden-Württemberg die Lackhersteller FreiLacke Emil Frei in Bräunlingen und Geholit + Wiemer Lack- und Kunststoffchemie in Graben-Neudorf als potentielle Produktabnehmer (Kapitel 4.3.2, Tabelle 47). Auch kann DME direkt als Treibgas vertrieben werden womit dann Gasevertreiber wie basi Schöberl in Rastatt und KRAISS & FRIZZ in Stuttgart als potentielle Abnehmer in Frage kommen (Kapitel 4.3.2, Tabelle 46).

4.2.2 Wertschöpfungskette 2 – Synthesegas

Wertschöpfungskette 2 betrachtet das CO₂-basierte Hauptprodukt Synthesegas (Abbildung 15). Synthesegas kann nur durch die chemische Umwandlung von CO₂ hergestellt werden. Dies geschieht konventionell durch die *reverse Water Gas Shift* (rWGS) Reaktion, die das in Karlsruhe ansässige Start-up INERATEC anbietet, kann aber auch durch die vom Stuttgarter Start-up Cyclize entwickelte Plasmatechnologie zur Umwandlung von CO₂ hergestellt werden (Kapitel 4.3.1, Tabelle 38).

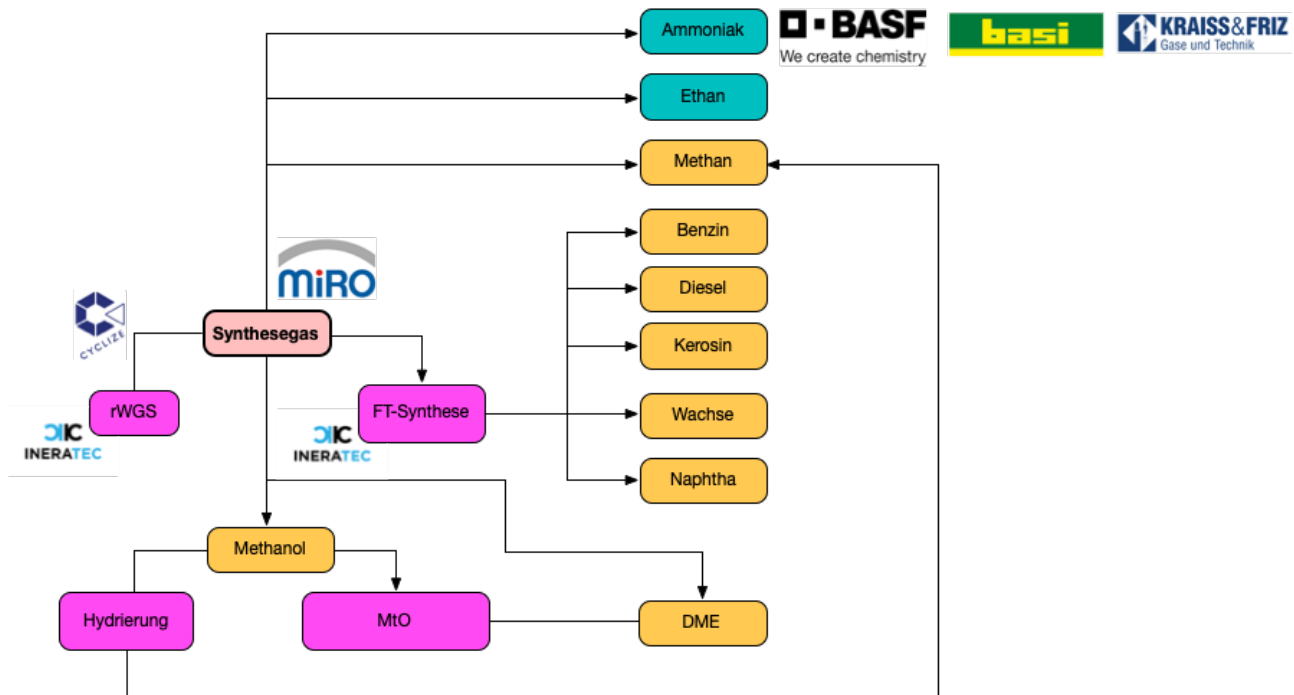


Abbildung 15: Wertschöpfungskette 2 – Synthesegas.

Das hergestellte Synthesegas kann dann weiter in der Fischer-Tropsch Synthese (siehe Kapitel 4.2.1) umgesetzt werden oder als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Dimethylether (DME) (siehe Kapitel 4.2.1) oder Methanol (siehe Kapitel 4.2.3) dienen. Synthesegas findet als solches Anwendung in Raffinerien wie der Mineralölraffinerie Oberrhein (Miro) (Kapitel 4.3.1, Tabelle 39) wo es zum Beispiel für die Wasserstoffherzeugung, die chemische Weiterverarbeitung oder für die Veredelung von Kraftstoffen genutzt werden kann. Synthesegas wird ebenfalls als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Ammoniak genutzt, was zum Beispiel bei der BASF in Ludwigshafen (Rheinland-Pfalz) hergestellt wird. Es kann aber auch als Gas von zum Beispiel basi Schöberl in Rastatt und KRAISS & FRIZZ in Stuttgart vertrieben werden kann (Kapitel 4.3.2, Tabelle 46).

4.2.3 Wertschöpfungskette 3 – Methanol

Wertschöpfungskette 3 betrachtet das CO₂-basierte Hauptprodukt Methanol (Abbildung 16). CO₂-basiertes Methanol kann nur durch die chemische Umwandlung von CO₂ hergestellt werden, zum einen durch die Hydrierung von CO₂ mit H₂, was das Mannheimer Start-up ICODOS macht (Kapitel 4.3.1, Tabelle 38) oder durch die Umwandlung von Synthesegas (Kapitel 4.2.2, Abbildung 15). Methanol kann dann weiter im *Methanol-to-Olefins* (MTO)-Prozess zu Olefinen verarbeitet werden (Kapitel 4.2.1, Abbildung 14). Im vom Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg geförderten Projekt „reFuels – Kraftstoffe neu denken“ wurde Methanol als Kraftstoff hergestellt und verwendet, hier war das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (Kapitel 4.3.1, Tabelle 37) beteiligt. Ebenfalls kann Methanol für die Herstellung von Essigsäure und Formaldehyd genutzt werden. Diese beiden Stoffe werden von der BASF in Ludwigshafen (Rheinland-Pfalz) hergestellt (Kapitel 4.3.2, Tabelle 46). Auch zur Herstellung von Methylmethacrylat, wiederum Ausgangstoff für die Herstellung von Polymethylmethacrylat (PMMA), kann Methanol genutzt werden, weshalb es vielleicht für Evonik für ihre Polyacrylat-Herstellung von Interesse wäre. Diese war bis vor kurzem noch ansässig im Chemiepark Rheinmünster (Kapitel 4.3.2, Tabelle 46).

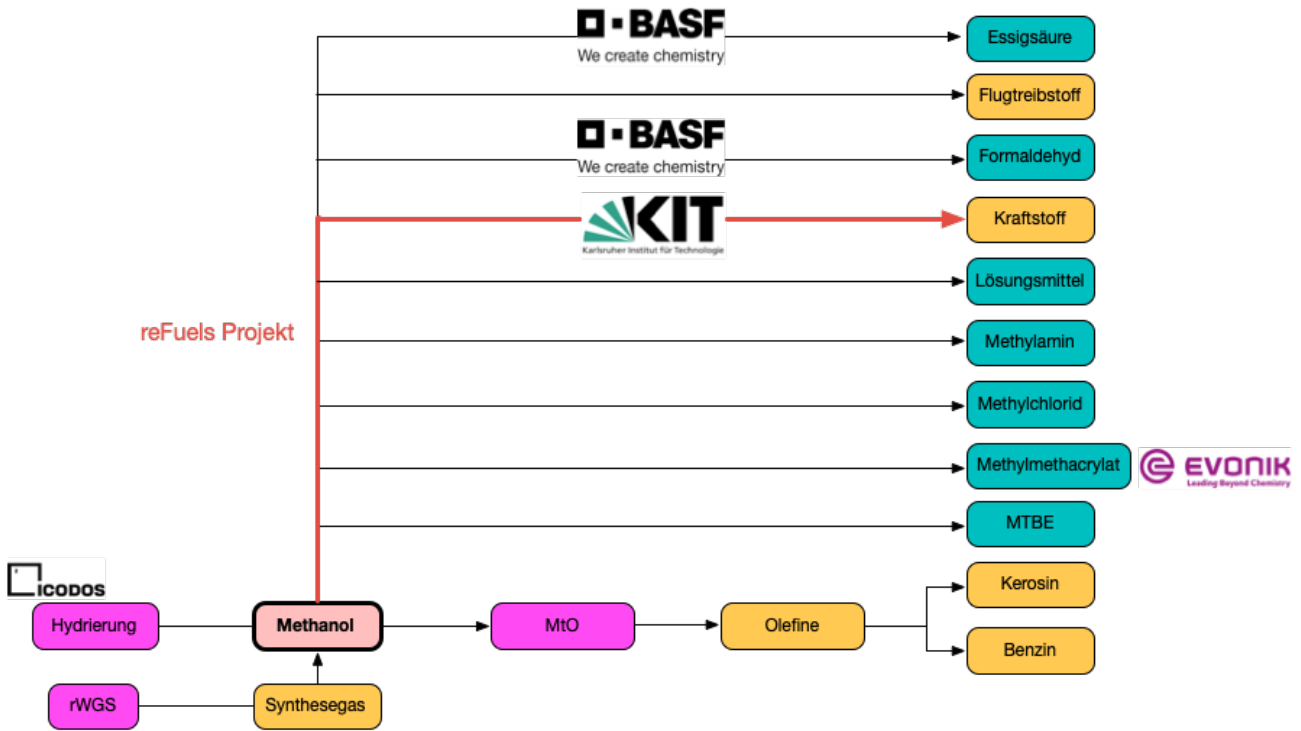


Abbildung 16: Wertschöpfungskette 3 – Methanol.

4.2.4 Wertschöpfungskette 4 – Methan

Wertschöpfungskette 4 betrachtet das CO₂-basierte Hauptprodukt Methan (Abbildung 17). Methan kann zum einen durch die chemische Umwandlung von CO₂ hergestellt werden, sowie auch durch die biotechnologische Umwandlung von CO₂.

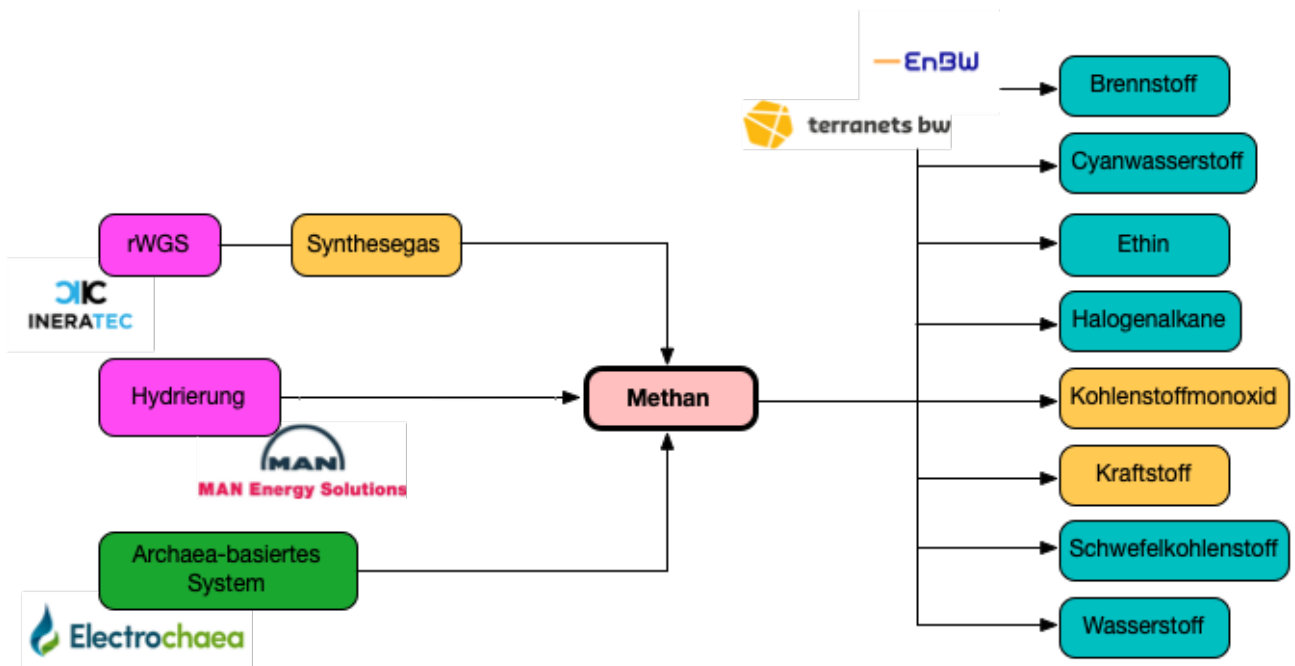


Abbildung 17: Wertschöpfungskette 4 – Methan.

Was die chemische Umwandlung von CO₂ zu Methan anbelangt, so kann es über das Zwischenprodukt Synthesegas hergestellt werden (Kapitel 4.2.2, Abbildung 15) oder direkt durch die Hydrierung von CO₂ mit H₂. Mit letzterem hat sich das Unternehmen MAN Energy Solutions aus Augsburg (Bayern) beschäftigt (Kapitel 4.3.1, Tabelle 44). Ein biotechnologisches Verfahren zur Umwandlung von CO₂ in Methan hat das bayerische Start-up Electrochaea entwickelt. Sie nutzen ein Archaea-basiertes System um Methan aus CO₂ und H₂ herzustellen (Kapitel 4.3.1, Tabelle 44). Unabhängig von dem jeweiligen Konzept mit dem das Methan hergestellt wurde kann dieses als Kraft- oder Brennstoff und direktes Substitut für Erdgas genutzt und in das Gasnetz eingespeist werden.

4.2.5 Wertschöpfungskette 5 – Butanol, Ethanol und Ethylen

Wertschöpfungskette 5 betrachtet die CO₂-basierten Hauptprodukte Butanol, Ethanol und Ethylen (Abbildung 18). Butanol und Ethanol können direkt durch biotechnologische Umwandlung von CO₂ hergestellt werden. Ethanol kann zudem, sowie auch Ethylen, direkt durch die chemische Umwandlung von CO₂ hergestellt werden. Indirekt, über Ethanol als Zwischenprodukt ist es auch möglich Ethylen durch biotechnologische CO₂ Umwandlung herzustellen.

Butanol kann durch ein cyanobakterielles System, welches zum Beispiel das amerikanische Unternehmen Phytonix (Kapitel 4.3.1, Tabelle 44) entwickelt hat, biotechnologisch hergestellt werden. Außerdem wurde in einem deutschen Forschungsprojekt der Unternehmen Evonik und Siemens Energy, dem Rheticus-Projekt, gezeigt, dass Butanol auch in einem hybriden Zwei-Schritt-Verfahren aus Elektrochemie und Biotechnologie hergestellt werden kann (siehe Kapitel 3.3.1).

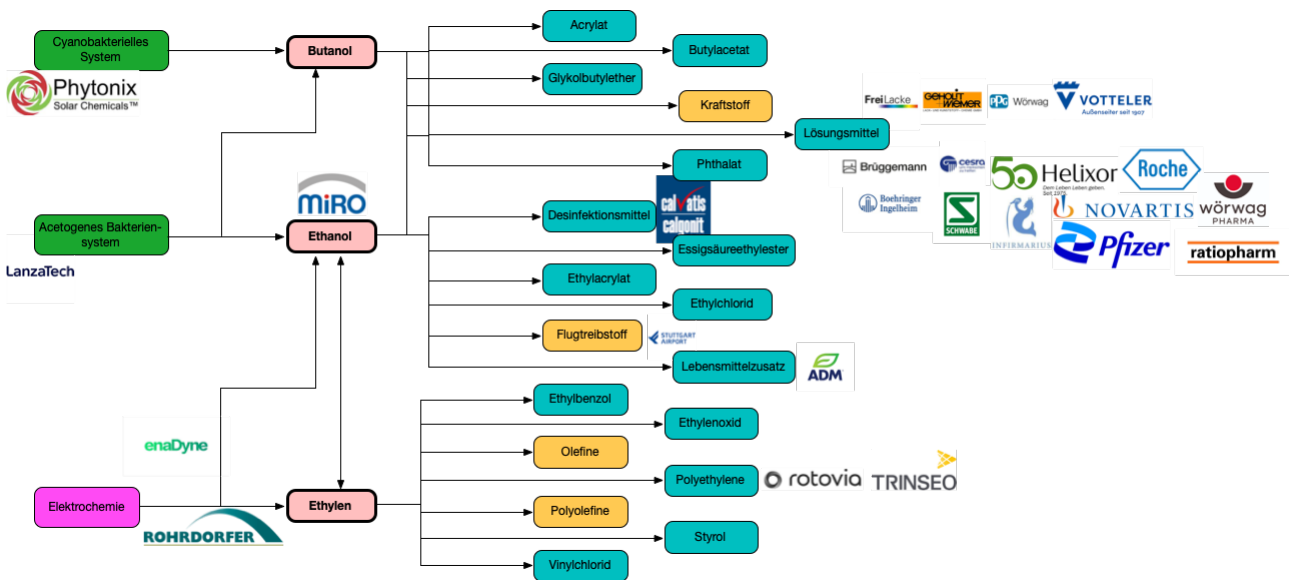


Abbildung 18: Wertschöpfungskette 5 – Butanol, Ethanol und Ethylen.

Butanol kann unter anderem als Lösungsmittel verwendet werden. Das ist relevant in der Lackindustrie die in Baden-Württemberg relativ stark vertreten ist. Als potentielle Produktabnehmer von Butanol als Lösungsmittel kommen unter anderem die Lackhersteller PPG Wörwag Coatings und die Votteler Lackfabrik, beide ansässig in Korntal-Münchingen, in Frage (siehe auch weitere Lackhersteller in Kapitel 4.3.2, Tabelle 47).

Ethanol kann zum einen durch das technologische Konzept Elektrochemie durch chemische Umwandlung von CO₂ und durch das technologische Konzept acetogenes Bakteriensystem durch biotechnologische

Umwandlung von CO₂ hergestellt werden. Das Leipziger Start-up enaDyne (Kapitel 4.3.1., Tabelle 44) beschäftigt sich mit der elektrochemischen Herstellung von Ethanol aus CO₂. Vorreiter für die biotechnologische Herstellung von Ethanol aus kohlenstoffhaltigen Gasen ist das amerikanische Unternehmen LanzaTech (Kapitel 4.3.1., Tabelle 44). Sie nutzen ein acetogenes Bakteriensystem welches in der Lage ist verschiedene Abgasströme (z. B. Stahlerzeugung, Müllverbrennung, Biomasse) als Kohlenstoffquelle zu nutzen. Ethanol kann direkt als Desinfektions- und Lösungsmittel verwendet werden, aber auch als Lebensmittelzusatz, zum Beispiel für die Konservierung von Lebensmitteln, oder als Kraftstoff. Als Desinfektionsmittel wäre CO₂-basiertes Ethanol für das in Ladenburg ansässige Unternehmen Calvatis interessant, sie stellen Reinigungs- und Desinfektionsmittel her (Kapitel 4.3.2, Tabelle 46). Ethanol als Lösungsmittel wiederum findet wie auch Butanol Anwendung in der Lackindustrie (Kapitel 4.3.2, Tabelle 47), aber auch in der Arznei- und Heilmittelindustrie. Potentielle Produktabnehmer in Baden-Württemberg wären hier zum Beispiel die Arzneimittelhersteller Boehringer Ingelheim Pharma in Biberach oder Novartis in Wehr und die Hersteller von pflanzlichen Heilmitteln wie Helixor Heilmittel in Rosenfeld oder Infirmarius in Göppingen (siehe auch weitere Arznei- und Heilmittelhersteller in Kapitel 4.3.2, Tabelle 48). Für Ethanol als Lebensmittelzusatzstoff wäre eventuell das Unternehmen ADM Wild in Eppelheim ein potentieller Abnehmer (Kapitel 4.3.2, Tabelle 49). Nach einem weiteren Aufbereitungsprozess, dem sogenannten *Alcohol-to-Jet*-Prozess, kann Ethanol auch als nachhaltiger Flugtreibstoff (*Sustainable Aviation Fuel (SAF)*) genutzt werden und wäre somit interessant für den Flughafen Stuttgart (Kapitel 4.3.1, Tabelle 39). Ethylen wird elektrochemisch aus CO₂ hergestellt, ein Verfahren hierzu hat das Unternehmen Rohrdorfer mit ihrem extra etablierten Net Zero Emissions Lab in Rohrdorf entwickelt (Kapitel 4.3.1, Tabelle 38). Ethylen kann wiederum genutzt werden um Ethanol herzustellen und *vice versa*, aber auch für die Herstellung von Olefinen und Polyolefinen (siehe hierzu Kapitel 4.2.1). Ethylen ist Baustein und Ausgangsstoff für die Herstellung von Polyethylen, dieses ist interessant für Rotationsschmelzen des Unternehmens Rotovia in Hockenheim genutzt werden oder für den Polymerhersteller Trinseo in Rheinmünster (Kapitel 4.3.2, Tabelle 46).

4.2.6 Wertschöpfungskette 6 – Polycarbonate, Polycarbonatpolyole und Polyurethane

Wertschöpfungskette 6 betrachtet die CO₂-basierten Hauptprodukte Polycarbonate, Polycarbonatpolyole und Polyurethane (Abbildung 19). Diese CO₂-basierten Produkte können nur durch die chemische Umwandlung von CO₂ hergestellt werden.

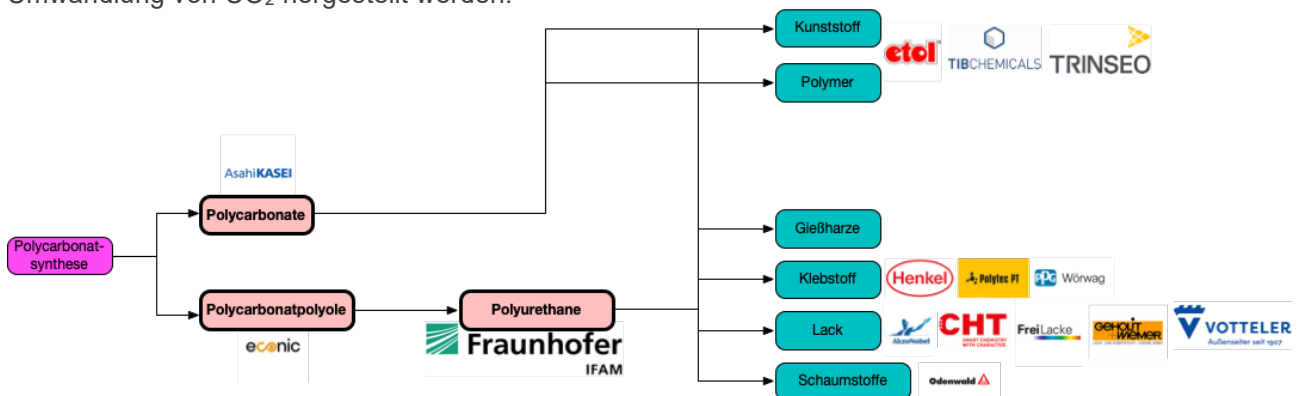


Abbildung 19: Wertschöpfungskette 6 – Polycarbonate, Polycarbonatpolyole und Polyurethane.

Derzeit gibt es keinen deutschen oder europäischen Hersteller von CO₂-basierten Polycarbonaten. Vorreiter in der Technologieentwicklung und Marktführer für die Herstellung und Lizenzvergabe zur Herstellung von CO₂-basierten Polycarbonaten ist das japanische Unternehmen Asahi Kasei (Kapitel 4.3.1, Tabelle 44). Polycarbonate können direkt als Polymer verwendet oder weiterverarbeitet werden zu einem Kunststoff. Hierzu werden Füllstoffe und Additive hinzugegeben um die gewünschten spezifischen Eigenschaften des Polycarbonatkunststoffs zu erhalten. Potentielle Abnehmer für Polycarbonate in Baden-Württemberg wären das Etol-Werk Eberhard Tripp in Oppenau, welches sich mit Kunststofftechnik beschäftigt, der Chemikalienhersteller TIB Chemicals in Mannheim und der Chemikalien- und Polymerhersteller Trinseo in Rheinmünster (Kapitel 4.3.2, Tabelle 46).

Auch Polycarbonatpolyole werden derzeit nicht in Deutschland hergestellt. Bis vor ein paar Jahren war in diesem Bereich noch das deutsche Unternehmen Covestro tätig, sie haben ihr Polycarbonatpolyol cardyon® CO₂-basiert hergestellt, doch die Produktion mittlerweile eingestellt. Das britische Unternehmen eonic Technologies ist Technologieanbieter für die Herstellung von Polycarbonatpolyolen (Kapitel 4.3.1, Tabelle 44).

Grundlage für die Herstellung von Polyurethanen sind die Polycarbonatpolyole. Derzeit gibt es zwei CO₂-basierte Polyurethanklassen, zum einen die klassischen Isocyanat-basierten Polyurethane und zum anderen die sogenannten NIPUs (Non-Isocyanate Polyurethanes) (Kapitel 3.2.9). An der Forschung und Entwicklung der CO₂-basierten NIPUs ist das Fraunhofer IFAM in Bremen beteiligt (Kapitel 4.3.1, Tabelle 44). Polyurethane können unter anderem als Klebstoffe und Lacke verwendet werden. Als solche sind sie für die Baden-Württembergische Lack- und Klebstoffindustrie interessant. Klebstoffe werden zum Beispiel von Henkel in Böblingen und Heidelberg hergestellt von dem Unternehmen Polytec PT in Karlsbad (Kapitel 4.3.2, Tabelle 47). Ebenfalls können Polyurethane als Beschichtungen verwendet werden, hier ist das Unternehmen Akzo Nobel Coatings an drei Standorten in Baden-Württemberg und das Unternehmen CHT Germany an zwei Standorten aktiv (Kapitel 4.3.2, Tabelle 46). Als potentielle Abnehmer aus der Lackindustrie finden sich in Baden-Württemberg die Lackhersteller FreiLacke Emil Frei in Bräunlingen und Geholit + Wiemer Lack- und Kunststoffchemie in Graben-Neudorf, die Votteler Lackfabrik und PPG Wörwag in Korntal-Münchingen (Kapitel 4.3.2, Tabelle 47). Des Weiteren werden Polyurethane für die Herstellung von Schaumstoffen genutzt, diese Anwendung könnte für den Hersteller von Schaumstoff und Vliesystemen Odenwald-Chemie in Neckarsteinbach interessant sein (Kapitel 4.3.2, Tabelle 46).

4.2.7 Wertschöpfungskette 7 – Kohlenmonoxid

Wertschöpfungskette 7 betrachtet das CO₂-basierte Hauptprodukt Kohlenmonoxid (Abbildung 20). Kohlenmonoxid kann elektrochemisch durch die chemische Umwandlung von CO₂ hergestellt werden. Das österreichische Unternehmen GIG Karasek bietet ein elektrochemisches Verfahren zur effizienten Herstellung von Kohlenmonoxid aus CO₂ an (Kapitel 4.3.1, Tabelle 44). Kohlenmonoxid kann als Ausgangsstoff für eine Vielzahl von weiteren Chemikalien genutzt werden. Zum Beispiel für die Herstellung von Aldehyden, Essigsäure und Phosgen. Diese drei Chemikalien werden von der BASF in Ludwigshafen (Rheinland-Pfalz) hergestellt (Kapitel 4.3.2, Tabelle 46). Auch Ameisensäure kann aus Kohlenmonoxid hergestellt werden, in Baden-Württemberg gibt es zwei Hersteller und Vertreiber von Ameisensäure die potentielle Produktabnehmer sein könnten: Andermatt BioVet in Lörrach und Vogelmann Chemie in Crailsheim (Kapitel 4.3.2, Tabelle 46). Ebenfalls ist es auch möglich Ameisensäure elektrochemisch direkt aus CO₂ herzustellen, ein solches Verfahren hat das Unternehmen Rohrdorfer mit ihrem etablierten Elektrochemielabor Net Zero Emissions Lab entwickelt (Kapitel 4.3.1, Tabelle 38). Auch kann Kohlenmonoxid direkt als Reduktionsmittel und als Reinigungsmittel für Metalle verwendet werden. Hier

wären die Unternehmen Brüggemann in Heilbronn und Oscar Weil in Lahr potentielle Produktabnehmer (Kapitel 4.3.2, Tabelle 46).

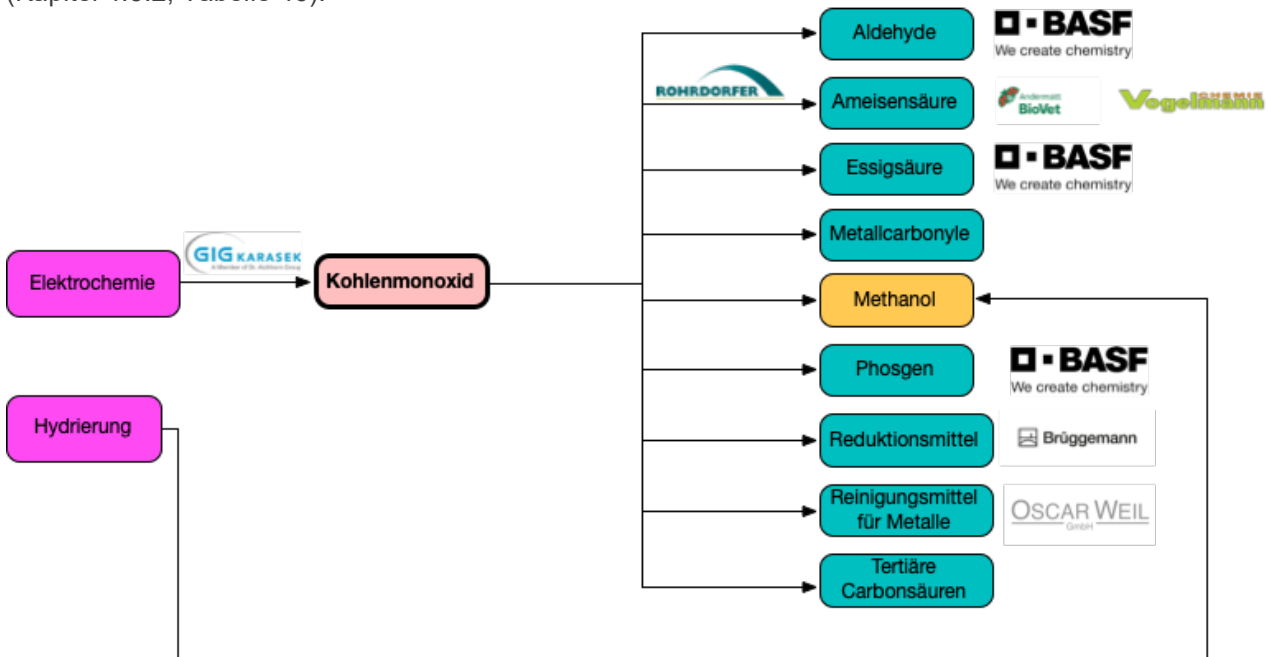


Abbildung 20: Wertschöpfungskette 7 – Kohlenmonoxid.

4.2.8 Wertschöpfungskette 8 – Kalziumkarbonat

Wertschöpfungskette 8 betrachtet das CO₂-basierte Hauptprodukt Kalziumkarbonat. Kalziumkarbonat entsteht durch die Mineralisierung von CO₂ mit Kalziumoxid (Abbildung 21). Das in Baden-Württemberg ansässige Unternehmen Schaefer Kalk ist schon an ihrem Standort Hahnstätten in Rheinland-Pfalz aktiv mit der Mineralisierung von CO₂ beschäftigt (Kapitel 4.3.1., Tabelle 39).

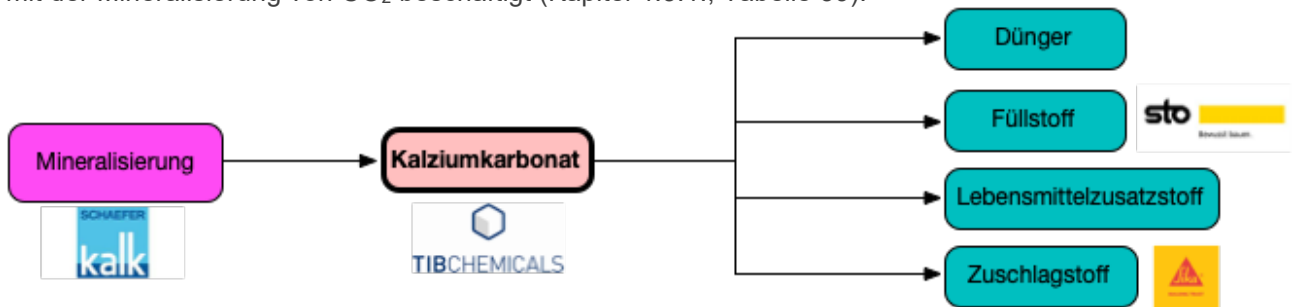


Abbildung 21: Wertschöpfungskette 8 – Kalziumkarbonat.

Kalziumkarbonat wird in Baden-Württemberg von dem Unternehmen TIB Chemicals in TIB in Mannheim (Kapitel 4.3.2, Tabelle 46) hergestellt, weshalb diese vielleicht an der Mineralisierung von CO₂ zu Kalziumkarbonat interessiert sein könnte. Kalziumkarbonat kann als solches unter anderem direkt als Füllstoff oder Zuschlagstoff verwendet werden. In diesem Bereich sind die potentiellen Akteure Sika Deutschland und Sto, mit mehreren Standorten in Baden-Württemberg, aktiv (Kapitel 4.3.2, Tabelle 46).

4.2.9 Wertschöpfungskette 9 – Farbstoffe und Proteine

Wertschöpfungskette 9 betrachtet die CO₂-basierten Hauptprodukte Farbstoffe und Proteine (Abbildung 22). Diese können nur durch die biotechnologische Umwandlung von CO₂ und die Nutzung eines Mikroalgen

Systems hergestellt werden. Das kanadische Unternehmen Pond Technologies (Kapitel 4.3.1, Tabelle 44) stellt mit ihrem entwickelten Mikroalgen System gezielt Farbstoffe her. Diese sind für die Farbindustrie in Baden-Württemberg interessant. Somit wäre sie Bruchsaler Farbenfabrik in Bruchsal ein potentieller Produktabnehmer (Kapitel 4.3.2, Tabelle 47).



Abbildung 22: Wertschöpfungskette 9 – Farbstoffe und Proteine.

Das amerikanische Unternehmen stellt mit ihrem Mikroalgen System CO₂-basierte Proteine her (Kapitel 4.3.1, Tabelle 44). Diese finden Anwendung in der Arzneimittelindustrie und sind somit relevant für Arzneimittelhersteller wie Pfizer in Freiburg oder ratiopharm in Ulm (siehe auch weitere Arzneimittelhersteller in Kapitel 4.3.2, Tabelle 48). Ebenfalls werden Proteine in der Lebensmittelindustrie verwendet, potentielle Produktabnehmer wären hier ADM Wild in Eppelheim und Gelita in Eberbach (Kapitel 4.3.2, Tabelle 49). Außerdem werden Proteine aber auch als Beschichtungen, Filme und Trägermaterialien für Medikamente genutzt und könnten somit auch für das Unternehmen Liveo Research, ansässig in Staufen, interessant sein (Kapitel 4.3.2, Tabelle 46).

4.3 Akteure und potentielle Akteure im Bereich CO₂-Nutzung in Baden-Württemberg

4.3.1 Akteure im Bereich CO₂-Nutzung in Baden-Württemberg

Als derzeit aktive oder potentiell interessierte Akteure im Bereich der CO₂-Nutzung in Baden-Württemberg konnten 137 identifiziert werden. Als Quellen zur Identifizierung dienten sowohl eigene Netzwerke, Projekte, Workshop- und Konferenzbesuche, sowie eine umfassende Internetrecherche und die Unterstützung der Umwelttechnik Baden-Württemberg.

Tabelle 36: Übersicht Akteure im Bereich CO₂-Nutzung in Baden-Württemberg.

Gruppe	Anzahl Unternehmen
Forschungsinstitute und Universitäten	28
Start-ups	6
Unternehmen	58

Netzwerke, Stiftungen, Vereine und Verbände	12
Ministerien und Stadtverwaltung	6
Beratung und Finanzierung	24
Parteien	3

Tabelle 36 zeigt eine Übersicht der Anzahl der verschiedenen Akteure und ihrer Zuordnung in die verschiedenen Gruppen: Forschungsinstitute und Universitäten, Start-ups, Unternehmen, Netzwerke, Stiftungen, Vereine und Verbände, Ministerien und Stadtverwaltung, Beratung und Finanzierung und Parteien. In den folgenden Tabellen (Tabelle 37 - Tabelle 43) werden die einzelnen identifizierten Akteure gemäß Gruppenzuordnung mit ihrem Standort und Informationen zu ihrer Expertise im Bereich CO₂-Nutzung gelistet.

Tabelle 37: Detaillierte Auflistung und Expertise der Akteure im Bereich CO₂-Nutzung in Baden-Württemberg – Forschungsinstitute und Universitäten.

Name	Standort	Expertise / Projekte (Beispiele)
CARLA – Catalyst Research Laboratory	Heidelberg	Projekt CO ₂ Form in Fördermaßnahme CO ₂ -Plus; neue Katalysatorsysteme für CO ₂ zu Formaldehyd und <i>in silico</i> Optimierung der Katalysatoren.
Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung	Denkendorf	Carbon Capture-Technologie "CellCO ₂ ", textile, cellulose-basierte Materialien zur Abscheidung von CO ₂ aus der Luft.
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)	Stuttgart	Kopernikus-Projekt P2X; Projekte ProMet und HTCoEI in Fördermaßnahme CO ₂ -WIN; Herstellung von Propen aus CO ₂ via Methanol, elektrochemische Methoden; Synthesegaserzeugung durch Hochtemperatur-Coelektrolyse.
Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO)	Stuttgart	ACCESS-Projekt, gesellschaftliche Integration von CCUS
Fraunhofer Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik (IGB)	Stuttgart	Industrielle Biotechnologie; Biotechnische Produktionsprozesse für Fein- und Spezialchemikalien; Biogas; Mikroalgen; EU-Projekte CELBICON (Fermentation).
Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)	Stuttgart	Verschiedene Projekte zur CO ₂ -Abscheidung und Nutzung.

Fraunhofer Informationszentrum Raum und Bau (IRB)	Stuttgart	Interessensbekundung.
Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE)	Freiburg im Breisgau	e-Fuels fürs Länd-Projekt; Kopernikus-Projekt P2X; Projekt DEPECOR in Fördermaßnahme CO2-WIN; Mehrfachsolarzellen; Prototypentwicklung III-V/Si Tandemsolarzelle; Photovoltaik, Wasserstofftechnologien.
Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)	Karlsruhe	Projekte zur Erforschung zur gesellschaftlichen Akzeptanz von CCUS.
Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik (IWM)	Freiburg im Breisgau	Carbon2Chem-Projekt, Hüttengase aus Stahlproduktion als Rohstoff für die chemische Industrie.
Hochschule Biberach	Biberach	Interessensbekundung.
Hochschule Esslingen	Esslingen	Interessensbekundung.
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Medien Offenburg	Offenburg	Interessensbekundung.
Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen	Geislingen	Interessensbekundung.
Hochschule Furtwangen	Furtwangen	Interessensbekundung.
Hochschule Mannheim	Mannheim	Interessensbekundung.
Hochschule Pforzheim	Pforzheim	Interessensbekundung.
Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH (ifeu)	Heidelberg	Publikationen mit Fokus auf PtX Nachhaltigkeitsstandards und Kriterien. Beitrag strombasierter Kraftstoffe zum Erreichen ambitionierter verkehrlicher Klimaschutzziele in Baden-Württemberg. Kurzugutachten. Im Auftrag des Ministeriums für Verkehr Baden-Württemberg (2018). Weiterentwicklung der THG-Quote als Instrument des Klimaschutzes. Im Auftrag des Ministeriums für Verkehr Baden-Württemberg (2017).
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	Karlsruhe	e-Fuels fürs Länd-Projekt; reFuels-Projekt; Projekt OptiMeOH in Fördermaßnahme CO2-Plus; Methanolsynthese aus CO2; Methanreformierung, Methanolsynthese, innovative Reaktorkonzepte; Projekt

		BioElectroPlast in Fördermaßnahme CO ₂ -Plus; Elektrobiosynthese zur Bioplastikproduktion.
Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie	Stuttgart	Interessensbekundung.
Öko-Institut e.V.	Freiburg im Breisgau	Publikationen und Projekte im Rahmen der Herstellung von e-Fuels.
Prognos	Freiburg im Breisgau, Stuttgart	Publikationen und Projekte im Rahmen der zirkulären Bioökonomie und Kreislaufwirtschaft.
Universität Freiburg	Freiburg im Breisgau	Interessensbekundung.
Universität Heidelberg	Heidelberg	Projekt CO ₂ Form in Fördermaßnahme CO ₂ -Plus; neue Katalysatorsysteme für CO ₂ zu Formaldehyd und in silico Optimierung der Katalysatoren.
Universität Hohenheim	Hohenheim	Interessensbekundung.
Universität Stuttgart	Stuttgart	Projekt OptiMeOH in Fördermaßnahme CO ₂ -Plus; Methanolsynthese aus CO ₂ ; LCA. Projekt CORAL in Fördermaßnahme CO ₂ -Plus; CO ₂ -Absorbermaterialien für Nutzung CO ₂ aus der Luft. Projekt TRANSFORMATE in Fördermaßnahme CO ₂ -WIN; elektrochemische CO ₂ -Reduktion zu Ameisensäure; Projekte ChemAmpere und eForFuel.
Universität Tübingen	Tübingen	Interessensbekundung.
Universität Ulm	Ulm	Interessensbekundung.
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff- Forschung Baden-Württemberg (ZSW)	Stuttgart	reFuels Projekt; Kopernikus-Projekt P2X; Projekt CORAL in Fördermaßnahme CO ₂ -Plus; Verfahrensentwicklung für Nutzung CO ₂ aus der Luft; Photovoltaik, Wasserstofftechnologie, Elektrochemische Energietechnologien.

Tabelle 38: Detaillierte Auflistung und Expertise der Akteure im Bereich CO₂-Nutzung in Baden-Württemberg – Start-ups.

Name	Standort	Expertise / Projekte (Beispiele)
carbonauten GmbH	Giengen	NET Materials®, Karbonisierungstechnologie für CO ₂ -Bindung.
Cyclize	Stuttgart	Plasmatechnologie zur Umwandlung von CO ₂ zu Synthesegas.

ICODOS GmbH	Mannheim	e-Methanol Anlage am KIT in Karlsruhe zusammen mit BASF.
INERATEC	Karlsruhe	e-Kraftstoff Anlage in Frankfurt am Main.
Net Zero Emissions Lab (gegründet von Rohrdorfer)	Rohrdorf	Elektrochemische Herstellung von Ameisensäure und Ethylen aus CO ₂ .

Tabelle 39: Detaillierte Auflistung und Expertise der Akteure im Bereich CO₂-Nutzung in Baden-Württemberg – Unternehmen.

Name	Standort	Expertise / Projekte (Beispiele)
ABB AG	Mannheim	Interessensbekundung.
Abfallwirtschaftsbetrieb des Landkreises Tübingen	Tübingen	Interessensbekundung.
ATG:biosynthetics GmbH	Oberndorf	Interessensbekundung.
Baiersbronner Frischfaser Karton GmbH & Co KG	Baiersbronn	Interessensbekundung.
Bauer Kompost GmbH	Bad Rappenau	Interessensbekundung.
Besteco GmbH	Esslingen	Interessensbekundung.
Carl Zeiss SMT GmbH	Oberkochen	Interessensbekundung.
CI4C (Cement Innovation for Climate) GmbH & Co. KG	Heidenheim an der Brenz	Von Buzzi Unicem–Dyckerhoff, Heidelberg Materials AG, Schwenk Zement GmbH & Co. KG und Vicat gegründete Forschungsgesellschaft. catch4climate-Projekt.
CureVac SE	Tübingen	Interessensbekundung.
D / M / S GmbH CONTAINERland	Friedrichshafen	Interessensbekundung.
Dürr Systems AG	Bietigheim-Bissingen	Interessensbekundung.
ELIQUO TECHNOLOGIES GmbH	Ravensburg	Interessensbekundung.
EnBW Energie Baden-Württemberg AG	Stuttgart	Interessensbekundung.
Endress + Hauser Conducta GmbH + Co. KG	Gerlingen	Messgeräte und Überwachung von CO ₂ -Speicherung und Transport.

Energieagentur Regio Freiburg GmbH	Freiburg im Breisgau	Interessensbekundung.
Exyte Central Europe GmbH	Stuttgart	Interessensbekundung.
Fächerbräu GmbH	Karlsruhe	Interessensbekundung.
Festo SE & Co. KG	Esslingen	Automatisierungstechnik für CCU-Anlage von Heidelberg Materials in Lengfurt.
Frapak GmbH	Nürtingen	Interessensbekundung.
Flughafen Stuttgart	Stuttgart	e-Fuels fürs Länd-Projekt.
Großkraftwerk Mannheim AG	Mannheim	Interessensbekundung.
Haastechnik GmbH	Kappelrodek	Interessensbekundung.
Harro Höfliger Verpackungsmaschinen GmbH	Allmersbach	Interessensbekundung.
Holcim (Süddeutschland) GmbH	Dotternhausen	PRIDE-ID Projekt, CO ₂ -Abscheidung mittels CycloneCC-Technologie (Carbon Clean).
IBM Client Center Böblingen	Böblingen	Interessensbekundung.
J. Eberspächer GmbH & Co.	Esslingen	Interessensbekundung.
Kies und Beton AG	Baden-Baden	Beteiligung CO ₂ -Beaufschlagungsanlage der Recular GmbH & Co. KG, CO ₂ -Speicherung.
Klio-Eterna Schreibgeräte GmbH & Co KG	Wolfach	Interessensbekundung.
Lab GmbH	Stuttgart	Abgasanlagen, CO ₂ -Abscheidung.
Lackierzentrum Niedernhall GmbH	Niedernhall	Interessensbekundung.
Landesmesse Stuttgart GmbH	Stuttgart	Interessensbekundung.
MANN+HUMMEL GmbH	Ludwigsburg	Interessensbekundung.
Mercedes-Benz AG	Böblingen	Interessensbekundung.
Mineralö Raffinerie Oberrhein (Miro)	Karlsruhe	e-Fuels fürs Länd-Projekt.
Momenti Film Produktion	Kernen	Interessensbekundung.

MVV Umwelt GmbH	Mannheim	CO ₂ -Abscheidung aus Bioabfallvergärungsanlage und Nutzung des CO ₂ in Betonrecycling zusammen mit Landwärme GmbH und neustark.
NAXCON GmbH	Freiburg im Breisgau	Interessensbekundung.
NETFACTORY GmbH	Karlsruhe	Interessensbekundung.
Novis GmbH	Tübingen	Entwickelt und baut CCU-Anlagen.
Opterra Wössingen GmbH	Wössingen	Herstellung von CO ₂ -basiertem Flugtreibstoff.
Oskar Frech GmbH + Co. KG	Schorndorf	Interessensbekundung.
Proweps envirotec GmbH	Biberach	Interessensbekundung.
REUGO GbR	Sachsenheim	Interessensbekundung.
SAUERSTOFFWERK FRIEDRICHSHAFEN GmbH	Friedrichshafen	Interessensbekundung.
Schaefer Kalk	Kehl	Geplante CO ₂ -Abscheidung und Nutzung (Mineralisierung) in Hahnstätten (Rheinland-Pfalz) und Steede (Hessen).
Schwenk Zement GmbH & Co. KG	Allmendingen	reFuels Projekt mit INERATEC, Pilotanlage zur Herstellung von e-Fuels.
	Mergelstetten	catch4climate-Projekt, CO ₂ -Abscheidung mittels Pre-Oxyfuel-Technologie (thyssenkrupp polysius®).
SICK AG	Waldkirch	Gasanalyse und Durchflussmessung für CCUS.
Siemens AG	Karlsruhe	Projekte zu CCU.
Südbayerisches Portland-Zementwerk Gebr. Wiesböck & Co. GmbH / Rohrdorfer / Net Zero Emissions Lab	Rohrdorf	CO ₂ -basiertes Ethylen und CO ₂ -Nutzung in Lebensmitteln und Getränken sowie in Zwischenprodukten bei der Herstellung von Arzneimitteln verwendet.
Südwestdeutsche Salzwerte AG	Heilbronn	Interessensbekundung.
TRIQBRIQ AG	Stuttgart	Interessensbekundung.
VEGA Grieshaber KG	Schiltach	CO ₂ -Abscheidung und Messgeräte.
Weingut Albrecht-Kiessling	Heilbronn	Interessensbekundung.

wir.kiste.kreis. UG	Pforzheim	Interessensbekundung.
WMF GmbH	Geislingen	Interessensbekundung.
Ziehl-Abegg SE	Künzelsau	Interessensbekundung.
Zweckverband RBB Restmüllheizkraftwerk Böblingen	Böblingen	Interessensbekundung.

Tabelle 40: Detaillierte Auflistung und Expertise der Akteure im Bereich CO₂-Nutzung in Baden-Württemberg – Netzwerke, Stiftungen, Vereine und Verbände.

Name	Standort	Expertise / Projekte (Beispiele)
Bodensee Stiftung	Radolfzell	Nutzung von CO ₂ im Rahmen von Landwirtschaft und Klimaschutz.
Carl-Zeiss-Stiftung	Stuttgart	Förderung von Forschungsprojekten im Bereich CCU.
DVGW Landesgruppe Baden-Württemberg	Stuttgart	CO ₂ -Start-Projekt, technische, wissenschaftliche und regulatorische Grundlagen für CO ₂ -Transport und Speicherung.
KlimAktiv gG zur Förderung des Klimaschutzes mbH	Tübingen	CO ₂ -Rechner und CO ₂ -Bilanzierung.
Metropolregion Rhein-Neckar GmbH	Mannheim	Anschluss an geplantes CO ₂ -Netzwerk.
Neues Kreislaufsystem 2+12	Aulendorf	Interessensbekundung.
PreZero Stiftung & Co. KG	Neckarsulm	Interessensbekundung.
Steinbeis Europa Zentrum	Stuttgart	COREu-Projekt, CCS.
Steinbeis-Beratungszentrum Interkulturelle Kompetenzen	Freiburg im Breisgau	Interessensbekundung.
TechnologieRegion Karlsruhe GmbH	Karlsruhe	Interessensbekundung.
Umwelttechnik BW GmbH	Stuttgart	Carbon Management, Publikationen biotechnologische CO ₂ -Nutzung.
Verband der Chemischen Industrie e. V. Baden-Württemberg (VCI)	Baden-Baden	CO ₂ als Rohstoff für die chemische Industrie.

Tabelle 41: Detaillierte Auflistung und Expertise der Akteure im Bereich CO₂-Nutzung in Baden-Württemberg – Ministerien und Stadtverwaltung.

Name	Standort	Expertise / Projekte (Beispiele)
Landeshauptstadt Stuttgart	Stuttgart	Prüft Möglichkeit, CO ₂ in verschiedenen Industriezweigen als Rohstoff zu nutzen; Förderprogramme.
Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum & Verbraucherschutz	Stuttgart	CO ₂ als Rohstoff für chemische Industrie, Förderung von CO ₂ -bindenden Baustoffen,
Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg	Stuttgart	CCUBio BW-Projekt, biotechnologische CO ₂ -Nutzung in Baden-Württemberg.
Ministerium für Verkehr	Stuttgart	reFuels-Projekt.
Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus	Stuttgart	DAC-BW-Projekt, Direct Air Capture Technologien aus Baden-Württemberg.
Stadt Aalen	Aalen	Verschiedene Strategien zur CO ₂ -Nutzung und -Reduktion.
Stadt Mannheim	Mannheim	Verschiedene Strategien zur CO ₂ -Reduktion.

Tabelle 42: Detaillierte Auflistung und Expertise der Akteure im Bereich CO₂-Nutzung in Baden-Württemberg – Beratung und Finanzierung.

Name	Standort	Expertise / Projekte (Beispiele)
Althaus International Consulting	Dormettingen	Interessensbekundung.
b2b cooperation & consulting GmbH	Gäufelden	Interessensbekundung.
Baden-Württemberg International BW_i	Stuttgart	Interessensbekundung.
Bühler Design	Gaiberg	Interessensbekundung.
Büro Waldkirch Alexander Schoch	Waldkirch	Interessensbekundung.
EOY New Business Development	Talheim	Interessensbekundung.
EurA AG	Eilwangen (Jagst)	Forschungsprojekte zur CO ₂ -Nutzung und -Reduktion.

GICON Großmann Ingenieur Consult GmbH	Schwäbisch Hall	CO ₂ -Rechner.
Heinrich Meder Umweltschutz und Energieberatung	Emmendingen	Interessensbekundung.
Horvath & Partners GmbH	Stuttgart	Interessensbekundung.
ifA-Bau Consult GmbH	Stuttgart	Interessensbekundung.
medconcepts health communications	Freiburg im Breisgau	Interessensbekundung.
MHP Gesellschaft für Management- und IT-Beratung mbH	Ludwigsburg	HyLion-Projekt, e-Methanol für CO ₂ -reduzierte Lieferketten.
OMT Logistics Engineering & Consulting	Karlsbad	Interessensbekundung.
Porsche Consulting GmbH	Stuttgart	Publikationen CO ₂ -Nutzung und -Reduktion.
QUBUS Planung und Beratung Oberflächentechnik GmbH	Schwäbisch Gmünd	Interessensbekundung.
Rainer Kurz Business Consulting - RKBC	Stuttgart	Interessensbekundung.
RBB Vermögensgesellschaft mbH & Co. KG	Böblingen	Interessensbekundung.
TBF + Partner AG	Böblingen	Dekarbonisierung und CO ₂ -Reduktion.
UB Innovative Produkte Innovative Finanzprodukte (UB IP IFP)	Karlsruhe	Interessensbekundung.
UBP-consulting GmbH & Co. KG	Wiesloch	Interessensbekundung.
UTE Unternehmensberatung	Walldorf	CO ₂ -Nutzung, -Vermeidung, -Reduktion, -Bilanzierung.
VeViVas UG	Lörrach	Interessensbekundung.
Wolff & Müller Energy GmbH	Ludwigsburg	CO ₂ -Bepreisung.

Tabelle 43: Detaillierte Auflistung und Expertise der Akteure im Bereich CO₂-Nutzung in Baden-Württemberg – Parteien.

Name	Standort	Expertise / Projekte (Beispiele)
Bündnis 90/Die Grünen im Landtag von Baden-Württemberg	Stuttgart	Interessensbekundung.
CDU-Fraktion im Landtag von Baden-Württemberg	Stuttgart	Interessensbekundung.
Fraktion GRÜNE im Landtag von Baden-Württemberg	Stuttgart	Interessensbekundung.

Wie in Kapitel 4.2 erklärt liegt der Fokus für die Identifizierung und Benennung von Akteuren und Technologieanbietern der einzelnen technologischen Konzepte, sowie potenzielle Zwischenprodukt – und Endproduktabnehmer auf Baden-Württemberg. Sollten hier keine Akteure, Technologieanbieter und Produktabnehmer vorhanden sein wird in einem nächsten Schritt in die umliegenden Bundesländer oder in Deutschland geschaut, in einem weiteren Schritt dann, wenn nötig, werden Akteure dann europa- und weltweit identifiziert. Tabelle 44 zeigt eine Liste der in den Wertschöpfungsketten (Kapitel 4.2) genannten alleinigen Technologieanbietern für ein bestimmtes technologische Konzept.

Tabelle 44: Alleinige Technologieanbieter aus Wertschöpfungsketten, kein Sitz in Baden-Württemberg.

Name	Standort	Technologiezuordnung	Wertschöpfungskette
Asahi Kasei	Tokio, Japan	Polycarbonatsynthese	6
Cellana	Kailua-Kona, USA	Mikroalgen System (Proteine)	9
Econic Technologies	Macclesfield, Großbritannien	Polycarbonatpolyolsynthese	6
Electrochaea	Planegg	Archaea-basiertes System	4
enaDyne	Leipzig	Elektrochemie (Ethanol)	5
Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung (IFAM)	Bremen	Polyurethane	6
GIG Karasek	Gloggnitz, Österreich	Elektrochemie (Kohlenmonoxid)	7

LanzaTech	Skokie, USA	Acetogenes Bakteriensystem	5
MAN Energy Solutions	Augsburg	Hydrierung	4
Pond Technologies	Markham, Kanada	Mikroalgen System (Farbstoffe)	9
Phytonix	Black Mountain, USA	Cyanobakterielles System	5
Syklea	Saint-Sulpice-et-Cameyrac, Frankreich	Mikroalgen System (Kohlenwasserstoffe)	1

4.3.2 Potentielle Akteure im Bereich CO₂-Nutzung in Baden-Württemberg

Neben den derzeit aktiven oder interessierten Akteuren im Bereich der CO₂-Nutzung wurden auch potentielle Akteure als CO₂-Produktabnehmer in Baden-Württemberg identifiziert. Als Quellen zur Identifizierung diente sowohl die Mitgliederliste des Verbands der Chemischen Industrie e.V. Baden-Württemberg (<https://www.chemie.com/verbaende/verband-der-chemischen-industrie-e-v-iv-baden-wuerttemberg/>) sowie eine Internetrecherche. So konnten 46 potentielle zukünftige Akteure im Bereich CO₂-Nutzung und CO₂-Produktabnehmer identifiziert werden. Diese wurden in die im Kapitel 4.2 dargestellten Wertschöpfungsketten integriert. Tabelle 45 zeigt eine Übersicht der Anzahl der Unternehmen die als potentielle Akteure identifiziert wurden und in welchem Industriebereich sie tätig sind.

Tabelle 45: Übersicht potentielle Akteure im Bereich CO₂-Nutzung in Baden-Württemberg.

Gruppe	Anzahl Unternehmen
Chemische, Kunststoff und Material Industrie	24
Farb, Klebstoff und Lack Industrie	7
Arznei-, und Heilmittel Industrie	12
Kosmetik und Lebensmittel Industrie	5

Die folgenden Tabellen (Tabelle 46 - Tabelle 49) zeigen alle identifizierten potentiellen Akteure gemäß ihrer Gruppenzuordnung, mit Informationen zum Standort, Tätigkeitsbereich und an welchem CO₂-basierten Hauptprodukt sie Interesse haben könnten und in welcher Wertschöpfungskette sie als potentieller Produktabnehmer genannt sind.

Tabelle 46: Detaillierte Auflistung potentieller Akteure und Produktabnehmer im Bereich CO₂-Nutzung in Baden-Württemberg und anliegend – Chemische, Kunststoff und Material Industrie.

Name	Standort	Tätigkeitsbereich	Produktzuordnung	Wertschöpfungskette
Akzo Nobel Coatings GmbH	Freiberg, Reutlingen, Stuttgart	Beschichtungen	Polyurethane	6
Andermatt BioVet	Lörrach	Ameisensäure	Kohlenmonoxid	7
BASF	Ludwigshafen	Chemikalien	Aldehyde, Ammoniak, Essigsäure, Formaldehyd, Phosgen, Naphtha	7,2,3,1
basi Schöberl GmbH & Co. KG	Rastatt	Gase-Vertreiber	Ammoniak, DME	2,1
Brüggemann	Heilbronn	Reduktionsmittel, Kunststoffadditive, Ethanol	Ethanol, Kohlenmonoxid	5,7
BUCK-Chemie GmbH	Herrenberg	Reinigungs- und Putzmittelhersteller	Olefine für Tenside	1
Calvatis GmbH	Ladenburg	Reinigungs- und Desinfektionsmittel	Ethanol, Olefine für Tenside	5,1
CHT Germany GmbH	Tübingen, Dußlingen	Spezialchemie als Hilfsmittel und Additive: Textilveredlung, Textilfarbstoffe, Pigmente, Lacke, Beschichtungen	Polyurethane	6
Dracholin GmbH	Metzingen	Farben, Putze und Wachshersteller	Wachse	1
Emil Bihler Chemische Fabrik GmbH & Co. KG	Geislingen an der Steige	Reinigungs- und Pflegemittel	Olefine für Tenside	1
Etol-Werk Eberhard Tripp GmbH & Co.OHG	Oppenau	Reinigung, Hygiene, Gesundheitspflege, Pharmaprodukte, Kunststofftechnik	Polycarbonate	6

Evonik	Rheinmünster	Polyacrylate	Methanol	3
KRAISS & FRIZ	Stuttgart	Gase-Vertreiber	Ammoniak, DME	2,1
Liveo Research GmbH	Staufen im Breisgau	Medizinische Verpackungen und Spezialfilmhersteller	Proteine	9
Odenwald-Chemie GmbH	Neckarsteinach	Schaumstoff und Vliessysteme	Polyurethane	6
OSCAR WEIL GmbH	Lahr	Metallverarbeitungsunternehmen	Kohlenmonoxid	7
Reckitt Benckiser Global R&D GmbH	Heidelberg	Reinigungs- und Putzmittelhersteller	Olefine für Tenside	1
Rotovia Hockenheim GmbH	Hockenheim	Rotationsschmelzen	Polyethylen, Polyolefine	5,1
Seeger Wasch- und Reinigungsmittel GmbH	Balingen	Reinigungs- und Putzmittelhersteller	Olefine für Tenside	1
Sika Deutschland GmbH	Bad Urach, Stuttgart	Baustoffindustrie	Kalziumkarbonat	8
Sto SE & CO. KGaA	Mehrere	Fassaden und Wärmedämmung, Klinkerherstellung	Kalziumkarbonat	8
TIB Chemicals AG	Mannheim	Chemikalienhersteller	Kalziumkarbonat, Polyurethane	8,6
Trinseo Deutschland Aktiengesellschaft mbH	Rheinmünster	Chemikalien- und Polymerhersteller	Polycarbonat, Polyethylen, Polyolefine	6,5,1
Vogelmann Chemie GmbH	Crailsheim	Reinigungsmittel, Ameisensäure	Kohlenmonoxid	7

Tabelle 47: Detaillierte Auflistung potentieller Akteure und Produktabnehmer im Bereich CO₂-Nutzung in Baden-Württemberg und anliegend – Farb, Klebstoff und Lack Industrie.

Name	Standort	Tätigkeitsbereich	Produktzuordnung	Wertschöpfungskette
Bruchsaler Farbenfabrik GmbH & Co. KG	Bruchsal	Farbenhersteller	Farbstoffe	9

FreiLacke Emil Frei GmbH & Co KG	Bräunlingen	Lackhersteller	Butanol, DME, Polyurethane	5,1,6
Geholit + Wiemer Lack- und Kunststoff-Chemie GmbH	Graben-Neudorf	Lackhersteller, Kunststoffchemie	Butanol, DME, Polyurethane	5,1,6
Henkel AG & CO. KGaA	Böblingen, Heidelberg	Klebstoffe, Dichtstoffe, Beschichtungen	Polyurethane	6
Polytec PT GmbH	Karlsbad	Klebstoffe	Polyurethane	6
PPG Wörwag Coatings GmbH & Co. KG	Kornthal-Münchingen	Lackhersteller	Butanol, DME, Polyurethane	5,1,6
Votteler Lackfabrik GmbH & Co. KG	Kornthal-Münchingen	Lackhersteller	Butanol, DME, Polyurethane	5,1,6

Tabelle 48: Detaillierte Auflistung potentieller Akteure und Produktabnehmer im Bereich CO₂-Nutzung in Baden-Württemberg und anliegend – Arznei, Heilmittel Industrie.

Name	Standort	Tätigkeitsbereich	Produktzuordnung	Wertschöpfungskette
Boehringer-Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG	Biberach	Arzneimittel	Ethanol, Proteine	5,9
Cesra Arzneimittel GmbH & Co. KG	Baden-Baden	Arzneimittel und medizinische Kosmetika	Ethanol, Proteine, Wachse	5,9,1
Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG	Karlsruhe	Pflanzliche Arzneimittelhersteller	Ethanol	5
HELIXOR Heilmittel GmbH & Co. KG	Rosenfeld	Pflanzliche Heilmittel	Ethanol	5
INFIRMARIUS GmbH	Göppingen	Pflanzliche Heilmittel	Ethanol	5
Novartis Deutschland GmbH	Wehr	Arzneimittel	Ethanol, Proteine	5,9

Pfizer Manufacturing Deutschland GmbH	Freiburg im Breisgau	Arzneimittel	Ethanol, Proteine	5,9
ratiopharm GmbH	Ulm	Arzneimittel	Ethanol, Proteine	5,9
Roche Pharma AG	Grenzach-Wyhlen	Arzneimittel	Ethanol, Proteine	5,9
TAKEDA GmbH	Singen, Konstanz	Arzneimittel	Ethanol, Proteine	5,9
WALA Heilmittel GmbH	Bad Boll	Pflanzliche Heilmittel	Ethanol	5
Wörwag Pharma GmbH & Co. KG	Böblingen	Arzneimittel	Ethanol, Proteine	5,9

Tabelle 49: Detaillierte Auflistung potentieller Akteure und Produktabnehmer im Bereich CO₂-Nutzung in Baden-Württemberg und anliegend – Kosmetik und Lebensmittelindustrie.

Name	Standort	Tätigkeitsbereich	Produktzuordnung	Wertschöpfungskette
Bayer AG (GP Grenzach Produktions GmbH)	Grenzach-Wyhlen	Salben, Cremes, Lotionen	Wachse	1
ADM Wild Europe GmbH	Eppelheim	Lebensmittelzusatzstoffhersteller	Ethanol, Proteine	5,9
Börlind Gesellschaft für kosmetische Erzeugnisse mbH	Calw	Kosmetikhersteller	Wachse	1
Gelita AG	Eberbach	Gelatine, Kollagen und Peptidhersteller	Proteine	9
Weleda AG	Schwäbisch Gmünd	Kosmetikhersteller	Wachse	1

4.4 Bewertung der verschiedenen technologischen Konzepte zur Umwandlung von CO₂

Für die Analyse des Potenzials der einzelnen technologischen Konzepte zur Umwandlung von CO₂ (Kapitel 3) in Baden-Württemberg wird zunächst ein Bewertungsschema erstellt. Dieses Bewertungsschema beinhaltet verschiedene Indikatoren denen ein Punktesystem zur Vereinheitlichung und zum einfachen Vergleich der Konzepte zugrunde liegt. Die Indikatoren basieren auf den Parametern die schon in den Steckbriefen der technologischen Konzepte (Kapitel 3.2 und 3.3) genannt worden sind: Technologische Reife, Energieaufwand und andere notwendige Rohstoffe neben CO₂. Hinzu kommen die Notwendigkeit des Strominputs, wie viele CO₂-basierte Hauptprodukte, Folgeprodukte und Verwendungsoptionen entstehen und wie viele Produktabnehmer in Baden-Württemberg ansässig sind. Ebenfalls werden die technologischen Konzepte gemäß ihrer Prozesskomplexität bewertet, handelt es sich um einen *Stand Alone*- oder *Multiple Step*-Prozess. Somit sind die folgenden sieben Indikatoren entstanden: 1) Prozessindikator, 2) TRL-Indikator, 3) Energieaufwandindikator, 4) Strominputindikator, 5) Indikator für Anzahl CO₂-basierter Hauptprodukte, 6) Folgeprodukte /Verwendungsoptionen und 7) Produktabnehmer. Für jeden Indikator wurde eine bestimmte Anzahl von Punkten für einen entsprechend festgelegten Indikatorspezifischen Bereich vergeben. Diese Bereiche und die Indikatoren werden auf den folgenden Folien definiert und beschrieben. Es ist wichtig anzumerken, dass der Fokus dieser Potenzialbewertung ausschließlich auf dem technologischen Konzept liegt und nicht auf den verschiedenen Produkten die durch das jeweilige Konzept aus CO₂ hergestellt werden können.

4.4.1 Vollständigkeit Prozesskette und Prozesskategorisierung

Grundlage für den ersten Indikator, den Prozessindikator ist die Bewertung der Vollständigkeit der Prozesskette und einer Kategorisierung der verschiedenen technologischen Konzepte (Prozesse). Dieser Prozessindikator ist der komplexeste, da er fünf verschiedene Prozessparameter (Tabelle 50 und Tabelle 51) mit Hilfe eines Punktesystems zusammenfasst.

Vollständigkeit Prozesskette

In einem ersten Schritt geht es um die Vollständigkeit der Prozesskette, also führt dieses technologische Konzept (Prozess) von CO₂ zum Produkt oder ist noch ein zusätzlicher Prozess vorher oder hinterher notwendig.

Tabelle 50: Prozessvollständigkeit – Chemische Umwandlung von CO₂.

Technologisches Konzept	Direkte CO ₂ -Nutzung (nach CO ₂ -Abscheidung)	Wasserstoff-Elektrolyse	Zusätzliche Rohstoffe (andere als CO ₂ und H ₂)	Zusätzlicher vorgeschalteter Prozess	Zusätzlicher nachgeschalteter Prozess
Elektrochemie	✓	X	H ₂ O	X	X
rWGS (<i>reverse Water Gas Shift</i>)	✓	✓	X	X	Optional: Fischer-Tropsch Synthese
Fischer-Tropsch Synthese	X	X	X	rWGS (<i>reverse Water Gas Shift</i>)	Optional: Steamcracken von CO ₂ -basiertem Naphtha
Hydrierung	✓	✓	X	X	Optional: <i>Methanol-to-Olefins</i> (MTO)
Mineralisierung	✓	X	CaO	X	X
Polycarbonatsynthese	✓	X	Epoxid	X	Optional: Polyurethane
<i>Methanol-to-Olefins</i> (MTO)	X	X	X	Hydrierung	X
Steamcracken von CO ₂ -basiertem Naphtha	X	X	X	rWGS (<i>reverse Water Gas Shift</i>) Fischer-Tropsch Synthese	X
Polyurethane	X	X	Isocyanat Diamin	Polycarbonatsynthese	X

Tabelle 50 zeigt eine Übersicht der technologischen Konzepte zur chemischen Umwandlung von CO₂, die letzten beiden Spalten indizieren, ob ein vor- oder nachgeschalteter Prozess notwendig ist, um ein CO₂-basiertes Produkt herzustellen. Die technologischen Konzepte Fischer-Tropsch Synthese, *Methanol-to-Olefins* (MTO), Steamcracken von CO₂-basiertem Naphtha und Polyurethane sind nicht in der Lage CO₂ direkt als Prozessrohstoff zu verwenden, hier sind vorgeschaltete Prozesse also obligatorisch. Hier muss das CO₂ in einem vorgeschalteten anderen Prozess zunächst in ein verwendbares CO₂-basiertes Zwischenprodukt umgewandelt werden. Bei der Fischer-Tropsch Synthese zum Beispiel entsteht zunächst durch eine *reverse Water Gas Shift* Reaktion (rWGS) aus CO₂ und H₂ Synthesegas, welches dann als Rohstoff in der Fischer-Tropsch Synthese (siehe auch Kapitel 3.2.3) genutzt wird. Nachgeschaltete Prozesse hingegen sind optional, hiermit ist es möglich das CO₂-basierte Produkt hergestellt durch das jeweilige technologische Konzept als Rohstoff für die Herstellung weiterer Produkte zu verwenden und somit das Produktportfolio des technologischen Konzepts zu erweitern.

Tabelle 51: Prozessvollständigkeit – Biotechnologische Umwandlung von CO₂.

Technologisches Konzept	Direkte CO ₂ -Nutzung (nach CO ₂ -Abscheidung)	Wasserstoff-Elektrolyse	Zusätzliche Rohstoffe (andere als CO ₂ und H ₂)	Zusätzlicher vorgeschalteter Prozess	Zusätzlicher nachgeschalteter Prozess
Acetogenes Bakteriensystem	Prozess-spezifisch	Prozess-spezifisch	Prozess-spezifisch	X	X
Archaea-basiertes System	✓	✓	Prozess-spezifisch	X	X
Cyanobakterielles System	✓	X	Prozess-spezifisch	X	X
Mikroalgen System	✓	X	Prozess-spezifisch	X	X

Tabelle 51 zeigt eine Übersicht der technologischen Konzepte zur biotechnologischen Umwandlung von CO₂, die letzten beiden Spalten indizieren ob ein vor- oder nachgeschalteter Prozess notwendig ist um ein CO₂-basiertes Produkt herzustellen. Alle Konzepte zur biotechnologischen Umwandlung sind in der Lage direkt CO₂ als Rohstoff zu nutzen und diesen fermentative in ein CO₂-basiertes Produkt umzuwandeln, sie brauchen keine vor- und/oder nachgeschalteten Prozesse.

Prozesskategorisierung

Die oben beschriebene Prozessvollständigkeit ist die Grundlage für die Kategorisierung der technologischen Konzepte (Prozesse) in sogenannte *Stand Alone* (Tabelle 52) und *Multiple Step*-Prozesse (Tabelle 53).

Stand Alone-Prozesse werden als solche bezeichnet, wenn sie die komplette Umwandlung von CO₂ bis zum Produkt beinhalten ohne einen vor- oder nachgeschalteten Prozess zu benötigen.

Tabelle 52: Übersicht *Stand Alone*-Prozesse.

Technologisches Konzept	Direkte CO ₂ -Nutzung (nach CO ₂ -Abscheidung)	Wasserstoff-Elektrolyse	Zusätzliche Rohstoffe (andere als CO ₂ und H ₂)	Zusätzlicher vorgeschalteter Prozess	Zusätzlicher nachgeschalteter Prozess
Elektrochemie	✓	X	H ₂ O	X	X
rWGS (<i>reverse Water Gas Shift</i>)	✓	✓	X	X	Optional: Fischer-Tropsch Synthese
Hydrierung	✓	✓	X	X	Optional: <i>Methanol-to-Olefins</i> (MTO)
Mineralisierung	✓	X	CaO	X	X
Polycarbonatsynthese	✓	X	Epoxid	X	Optional: Polyurethane
Acetogenes Bakterien-system	Prozess-spezifisch	Prozess-spezifisch	Prozess-spezifisch	X	X
Archaea-basiertes System	✓	✓	Prozess-spezifisch	X	X
Cyanobakterielles System	✓	X	Prozess-spezifisch	X	X
Mikroalgen System	✓	X	Prozess-spezifisch	X	X

Multiple Step-Prozesse werden als solche bezeichnet, wenn sie nicht direkt CO₂ als Rohstoff verwenden können und einen zusätzlichen, vorgeschalteten Prozess benötigen um ein CO₂-basiertes Zwischenprodukt zu generieren, welches dann als Rohstoff verwendet wird um ein finales CO₂-Produkt zu produzieren.

Tabelle 53: Übersicht *Multiple Step*-Prozesse.

Technologisches Konzept	Direkte CO ₂ -Nutzung (nach CO ₂ -Abscheidung)	Wasserstoff-Elektrolyse	Zusätzliche Rohstoffe (andere als CO ₂ und H ₂)	Zusätzlicher vorgeschalteter Prozess	Zusätzlicher nachgeschalteter Prozess
Fischer-Tropsch Synthese	X	X	X	rWGS (<i>reverse Water Gas Shift</i>)	Optional: Steamcracken von CO ₂ -basiertem Naphtha
<i>Methanol-to-Olefins</i> (MTO)	X	X	X	Hydrierung	X
Steamcracken von CO ₂ -basiertem Naphtha	X	X	X	rWGS (<i>reverse Water Gas Shift</i>) Fischer-Tropsch Synthese	X
Polyurethane	X	X	Isocyanat Diamin	Polycarbonatsynthese	X

4.4.2 Bewertungshintergrund und Methodik

In den folgenden Abschnitten werden die fünf verschiedenen etablierten Bewertungsindikatoren definiert und beschrieben. Jedem Indikator wurde eine bestimmte Anzahl von Punkten für einen entsprechend festgelegten indikatorspezifischen Bereich vergeben.

Prozessindikator

Der Prozessindikator gibt an inwieweit ein technologisches Konzept unabhängig von zusätzlichen Prozessschritten oder zusätzlichen Rohstoffen ist.

Tabelle 54: Prozessindikator – Punktevergabe.

Prozessindikator	Stand Alone-Prozess (Direkte CO ₂ -Nutzung und kein vorgeschalteter Prozess)	Multiple Step-Prozess (Keine direkte CO ₂ -Nutzung und vorgeschalteter Prozess)	Wasserstoff-Elektrolyse oder Zusätzliche Rohstoffe (andere als CO ₂ und H ₂)		Zusätzlicher nachgeschalteter Prozess (optional, Erhöhung der Anzahl möglicher CO ₂ -Produkte)
			Ja	Nein	
Punktevergabe	6	3	3	6	4,5

Tabelle 54 zeigt die Punktevergabe für die einzelnen Parameter die im Prozessindikator zusammengefasst sind. Ein *Stand Alone*-Prozess bekommt die maximale Punktzahl von 6, da kein zusätzlicher vorgeschalteter Prozess benötigt wird. Die optionalen zusätzlichen nachgeschalteten Prozesse werden 4,5 Punkten bewertet, da sie für die Vollständigkeit des Prozesses zwar nicht benötigt werden, aber die Anzahl möglicher CO₂-basierter Produkte erhöhen und somit, wenn genutzt auch die Anzahl der Prozessschritte erhöhen.

Ein *Multiple Step*-Prozess wird mit 3 Punkten bewertet, da ein zusätzlicher vorgeschalteter Prozess benötigt wird und CO₂ nicht direkt umgesetzt werden kann.

Die Notwendigkeit von H₂ und anderen Rohstoffe, außer CO₂, wird mit 3 Punkten bewertet, da für die Bereitstellung der zusätzlichen Rohstoffe auch zusätzliche, angrenzende Prozesse benötigt werden.

Je höher die Punktzahl, desto weniger Prozessschritte oder zusätzliche Rohstoffe (andere als CO₂) braucht der Prozess.

Tabelle 55: Prozessindikator – Punktevergabe für die verschiedenen technologischen Konzepte.

Technologisches Konzept	Stand Alone-Prozess (Direkte CO ₂ -Nutzung und kein vorgeschalteter Prozess)	Multiple Step-Prozess (Keine direkte CO ₂ -Nutzung und vorgeschalteter Prozess)	Wasserstoff-Elektrolyse oder Zusätzliche Rohstoffe (andere als CO ₂)	Zusätzlicher nachgeschalteter Prozess (optional, Erhöhung der Anzahl möglicher CO ₂ -Produkte)	Prozessindikator
-------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------

			und H ₂)			
			Ja	Nein		
Elektrochemie	6	-	3	-	-	9
rWGS (<i>reverse Water Gas Shift</i>)	6	-	3	-	4,5	13,5
Fischer-Tropsch Synthese	-	3	-	6	4,5	13,5
Hydrierung	6	-	3	-	4,5	13,5
Mineralisierung	6	-	3	-	-	9
Polycarbonat-synthese	6	-	3	-	4,5	13,5
<i>Methanol-to-Olefins</i> (MTO)	-	3	-	6	-	9
Steamcracken von CO ₂ -basiertem Naphtha	-	3	-	6	-	9
Polyurethane	-	3	3	-	-	6
Acetogenes Bakteriensystem	6	-	3	-	-	9
Archaea-basiertes System	6	-	3	-	-	9
Cyanobakterielles System	6	-	3	-	-	9
Mikroalgen System	6	-	3	-	-	9

Die höchst mögliche Punktzahl für den Prozessindikator liegt bei 16,5 Punkten. Tabelle 55 zeigt die Einzel- und Gesamtpunktvergabe für die 13 verschiedenen technologischen Konzepte.

Technology Readiness Level (TRL)-Indikator

Die technologische Reife, das *Technology Readiness Level* (TRL) entspricht denen in Kapitel 3.1.1, 3.1.2, 3.2 und 3.3 angegebenen TRL. Abweichungen sind entsprechend (*) in Tabelle 57 gekennzeichnet und beziehen sich auf die TRL der in Kapitel 3.2 und 3.3 dargestellten Produkte und deren Produktionsprozess.

Tabelle 56: TRL-Indikator – Punktevergabe.

TRL	<6	6-8	9
Punktevergabe	3	4,5	6

Tabelle 56 zeigt die Punktevergabe für die festgelegten TRL-Bereiche. Die Punktevergabe startet erst ab TRL 6, da zu Beginn festgelegt wurde, dass nur technologische Prozesse mit einem TRL von mindestens 5 betrachtet werden. Technologische Konzepte mit einem TRL von unter 6 bekommen die geringste Punktzahl mit 3, Prozesse mit einem TRL von 6-8 bekommen 4,5 Punkte und Konzepte mit einem TRL von 9 bekommen die Höchstpunktzahl mit 6 Punkten. Bei technologischen Konzepten mit TRL-Bereichen je nach hergestelltem Produkt wurde der Mittelwert des TRL gebildet und hierfür Punkte vergeben. Je höher die Punktzahl, desto höher ist das TRL des Prozesses.

Tabelle 57: TRL-Indikator – Punktevergabe für die verschiedenen technologischen Konzepte.

Technologisches Konzept	TRL	Punktevergabe
Elektrochemie	5-6*	3
rWGS (<i>reverse Water Gas Shift</i>)	9	6
Fischer-Tropsch Synthese	9	6
Hydrierung	9	6
Mineralisierung	9	6
Polycarbonatsynthese	4-9*	4,5
<i>Methanol-to-Olefins</i> (MTO)	7	4,5
Steamcracken von CO ₂ -basiertem Naphtha	5-9	4,5
Polyurethane	5-7	4,5
Acetogenes Bakteriensystem	5-9	4,5
Archaea-basiertes System	9	6
Cyanobakterielles System	5	3
Mikroalgen System	5	3

Die höchst mögliche Punktzahl für den TRL-Indikator liegt bei 6 Punkten. Tabelle 57 zeigt die Gesamtpunktevergabe für die 13 verschiedenen technologischen Konzepte.

Energieaufwandindikator

Der Energieaufwand gibt an wieviel MWh / Tonne Produkt für das einzelne, spezifische technologische Konzept benötigt wird. Der Energieaufwand vorgeschalteter Prozesse oder der Energieaufwand für Wasserstoff-Elektrolyse oder die Herstellung zusätzlich benötigter Rohstoffe wird hier nicht mit einbezogen.

Tabelle 58: Energieaufwandindikator – Punktevergabe.

MWh / Tonne Produkt	<2	2-5	5-10	Keine Angabe (k.A.)	10-20	>20
Punktevergabe	6	5	4	3	2	1

Tabelle 58 zeigt die Punktevergabe für die festgelegten Energieaufwandbereiche. Die Punktevergabe startet bei unter 2 MWh / Tonne Produkt und endet bei über 20 MWh / Tonne Produkt. Für den Energieaufwand mancher technologischer Konzepte liegen keine Daten vor und es können somit keine Angaben gemacht und entsprechende Punkte vergeben werden. Um diese technologischen Konzepte dennoch mit den anderen Vergleichen zu können wird diesen Prozessen mit keiner Energieaufwandangabe 3 Punkte vergeben. Bei technologischen Konzepten mit Energieaufwandbereichen je nach hergestelltem Produkt wurde der Mittelwert des Energieaufwands gebildet und hierfür Punkte vergeben. Je höher die Punktzahl, desto weniger Energie wird für den Prozess benötigt.

Tabelle 59: Energieaufwandindikator – Punktevergabe für die verschiedenen technologischen Konzepte.

Technologisches Konzept	Energieaufwand (MWh / Tonne Produkt)	Punktevergabe
Elektrochemie	Kohlenmonoxid: 9-16; 12,5 Ethanol: 30-50; 40 Ethylen: 40-60; 50 Mittelwert: 34	1
rWGS (<i>reverse Water Gas Shift</i>)	0,6 (50 grüne Wasserstoffüroduktion)	6
Fischer-Tropsch Synthese	3,4 (exklusive Synthesegasproduktion)	5
Hydrierung	Methan: 2,5 Methanol: 11 Mittelwert: 7	4
Mineralisierung	5	5
Polycarbonatsynthese	Diphenylcarbonat für aromatische Polycarbonate: 1 Ethylencarbonat für aliphatische Polycarbonate: 1,4 Polycarbonatpolyol: 1,4 Mittelwert: 1,3	6
<i>Methanol-to-Olefins</i> (MTO)	4	5
Steamcracken von CO ₂ -basiertem Naphtha	3	5
Polyurethane	-	3
Acetogenes Bakteriensystem	-	3
Archaea-basiertes System	1,5	6
Cyanobakterielles System	-	3
Mikroalgen System	-	3

Die höchst mögliche Punktzahl für den Energieaufwandindikator liegt bei 6 Punkten. Tabelle 59 zeigt die Gesamtpunktevergabe für die 13 verschiedenen technologischen Konzepte.

Strominputindikator

Der Strominputindikator beschreibt die Energie die in Form von Strom / Elektrizität für das einzelne, spezifische technologische Konzept benötigt wird. Der Strominput vorgeschalteter Prozesse oder der Strominput für Wasserstoff-Elektrolyse oder die Herstellung zusätzlich benötigter Rohstoffe wird hier nicht mit einbezogen. Teilweise wird hierfür schon erneuerbarer Strom genutzt, teilweise aber auch noch der aktuelle Strommix.

Tabelle 60: Strominputindikator – Punktevergabe.

Strominput	Ja	Prozess- / Anbieterabhängig	Nein
Punktevergabe	3	4,5	6

Tabelle 60 zeigt die Punktevergabe für die festgelegten Strominputbereiche. Wird Strom benötigt gibt es die geringste Punktzahl mit 3 Punkten, wird kein Strom benötigt gibt es die Höchstpunktzahl von 6 Punkten. Je nach Prozessaufbau und Technologie-/Prozessanbieter kann es sein, dass der Prozess auf die Nutzung von Strom für zum Beispiel die Wärmeerzeugung angewiesen ist, in diesem Fall werden 4,5 Punkte vergeben. Je höher die Punktzahl, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit das Strom für den Prozess benötigt wird.

Tabelle 61: Strominputindikator – Punktevergabe für die verschiedenen technologischen Konzepte.

Technologisches Konzept	Strominput / erneuerbare Energie Input	Punktevergabe
Elektrochemie	Ja	3
rWGS (<i>reverse Water Gas Shift</i>)	Prozess- / Anbieterabhängig, Wärme benötigt, kann durch elektrische Energie generiert werden.	4,5
Fischer-Tropsch Synthese	Nein	6
Hydrierung	Nein	6
Mineralisierung	Prozess- / Anbieterabhängig, Energie benötigt, kann durch elektrische Energie generiert werden.	4,5
Polycarbonatsynthese	Ja	3
<i>Methanol-to-Olefins</i> (MTO)	Prozess- / Anbieterabhängig, Wärme benötigt, kann durch elektrische Energie generiert werden.	4,5
Steamcracken von CO ₂ -basiertem Naphtha	Prozess- / Anbieterabhängig, Wärme benötigt, kann durch elektrische Energie generiert werden.	4,5
Polyurethane	Ja	3
Acetogenes Bakteriensystem	Ja	3

Archaea-basiertes System	Ja	3
Cyanobakterielles System	Ja	3
Mikroalgen System	Ja	3

Die höchst mögliche Punktzahl für den Strominputindikator liegt bei 6 Punkten. Tabelle 61 zeigt die Gesamtpunktvergabe für die 13 verschiedenen technologischen Konzepte.

Indikator für Anzahl CO₂-basierter Hauptprodukte, Folgeprodukte und Produktabnehmer

Die Indikatoren für die Anzahl CO₂-basierter Hauptprodukte, Folgeprodukte / Verwendungsoptionen und Produktabnehmer geben an wie viele Hauptprodukte (Kapitel 4.2, Abbildung 13) mit diesem Prozess hergestellt werden können. Wie viele Vor-, Neben- und Folgeprodukte (Kapitel 4.2, Abbildung 13) sowie direkte Verwendungsoptionen des Hauptprodukts sind möglich und wie viele potentielle Produktabnehmer gibt es derzeit in Baden-Württemberg. Grundlage hierfür sind die in Baden-Württemberg identifizierten potentiellen Akteure im Bereich CCU (Kapitel 4.3.2).

Tabelle 62: Indikator für Anzahl CO₂-basierter Hauptprodukte, Folgeprodukte und Produktabnehmer – Punktevergabe.

Anzahl Haupt-, Folgeprodukte und Verwendungsoptionen und potentieller Produktabnehmer	<5	5-10	10-15	15-20	20-25	>25
Punktevergabe	1	2	3	4	5	6

Tabelle 62 zeigt die Punktevergabe für die festgelegten Bereiche für die Anzahl der verschiedenen Produkte und potentielle Produktabnehmer. Je höher die Punktzahl, desto mehr Haupt- und Folgeprodukte, sowie Verwendungsoptionen und potentielle Produktabnehmer gibt es.

Tabelle 63: Indikator für Anzahl CO₂-basierter Hauptprodukte – Punktevergabe für die verschiedenen technologischen Konzepte.

Technologisches Konzept	Anzahl Hauptprodukte	Punktevergabe
Elektrochemie	3	1
rWGS (<i>reverse Water Gas Shift</i>)	1	1
Fischer-Tropsch Synthese	5	2
Hydrierung	2	1
Mineralisierung	1	1
Polycarbonatsynthese	2	1
<i>Methanol-to-Olefins</i> (MTO)	3	1
Steamcracken von CO ₂ -basiertem Naphtha	2	1
Polyurethane	1	1

Acetogenes Bakteriensystem	2	1
Archaea-basiertes System	1	1
Cyanobakterielles System	1	1
Mikroalgen System	7	2

Tabelle 64: Indikator für Anzahl CO₂-basierter Folgeprodukte / Verwendungsoptionen – Punktevergabe für die verschiedenen technologischen Konzepte.

Technologisches Konzept	Anzahl Folgeprodukte / Verwendungsoptionen	Punktevergabe
Elektrochemie	28	6
rWGS (<i>reverse Water Gas Shift</i>)	3	1
Fischer-Tropsch Synthese	2	1
Hydrierung	17	4
Mineralisierung	4	1
Polycarbonatsynthese	3	1
<i>Methanol-to-Olefins</i> (MTO)	4	1
Steamcracken von CO ₂ -basiertem Naphtha	2	1
Polyurethane	4	1
Acetogenes Bakteriensystem	17	4
Archaea-basiertes System	8	2
Cyanobakterielles System	6	2
Mikroalgen System	2	1

Tabelle 65: Indikator für Anzahl Produktabnehmer – Punktevergabe für die verschiedenen technologischen Konzepte.

Technologisches Konzept	Anzahl potentieller Produktabnehmer in BW	Punktevergabe
Elektrochemie	25	5
rWGS (<i>reverse Water Gas Shift</i>)	4	1
Fischer-Tropsch Synthese	12	3
Hydrierung	4	1
Mineralisierung	3	1
Polycarbonatsynthese	12	3
<i>Methanol-to-Olefins</i> (MTO)	12	3
Steamcracken von CO ₂ -basiertem Naphtha	8	2

Polyurethane	9	2
Acetogenes Bakteriensystem	34	6
Archaea-basiertes System	2	1
Cyanobakterielles System	15	3
Mikroalgen System	23	5

Die höchst mögliche Punktzahl für die Anzahlindikatoren liegt bei jeweils 6 Punkten. Tabelle 63, Tabelle 64 und Tabelle 65 zeigen die Gesamtpunktvergabe für die 13 verschiedenen technologischen Konzepte.

Gesamtbewertung der technologischen Konzepte

Tabelle 66 zeigt die Gesamtbewertung der technologischen Konzepte. Die mögliche, zu erreichende Gesamtpunktzahl liegt bei 52,5 Punkten. Diese Punktzahl hat keines der technologischen Konzepte erreicht. Die höchste Punktzahl hat die Fischer-Tropsch Synthese mit 36,5, gefolgt von der Hydrierung mit 35,5. Abbildung 23 zeigt die prozentuale Einstufung der technologischen Konzepte und ihres Potenzials in Baden-Württemberg.

Tabelle 66: Gesamtbewertung der technologischen Konzepte.

Dargestellt ist die Gesamtpunktzahl je technologischem Konzept und jeweiligem Indikator. Die Bezeichnung Indikator ist aus darstellerischen Gründen und zur Vereinfachung nicht genannt.

Technologisches Konzept	Prozess	TRL	Energieaufwand	Strominput	Hauptprodukte	Folgeprodukte / Verwendungsoptionen	Produktabnehmer	Gesamt
Elektrochemie	9	3	1	3	1	6	5	28
rWGS (<i>reverse Water Gas Shift</i>)	13,5	6	6	4,5	1	1	1	33
Fischer-Tropsch Synthese	13,5	6	5	6	2	1	3	36,5
Hydrierung	13,5	6	4	6	1	4	1	35,5
Mineralisierung	9	6	5	4,5	1	1	1	27,5
Polycarbonatsynthese	13,5	4,5	6	3	1	1	3	32
<i>Methanol-to-Olefins</i> (MTO)	9	4,5	5	4,5	1	1	3	28
Steamcracken von CO ₂ -basiertem Naphtha	9	4,5	5	4,5	1	1	2	27
Polyurethane	6	4,5	3	3	1	1	2	20,5

Acetogenes Bakteriensystem	9	4,5	3	3	1	4	6	30,5
Archaea-basiertes System	9	6	6	3	1	2	1	28
Cyanobakterielles System	9	3	3	3	1	2	3	24
Mikroalgen System	9	3	3	3	2	1	5	26
Maximal mögliche Punktzahl	16,5	6	6	6	6	6	6	52,5

Die Fischer-Tropsch-Synthese ist zwar ein *Multiple Step*-Prozess, es muss also ein Prozess vorgeschaltet werden, damit ein CO₂-basiertes Zwischenprodukt für die Fischer-Tropsch Synthese umgesetzt werden kann, in diesem Fall Synthesegas via *reverse Water Gas Shift* (rWGS) Reaktion, benötigt aber keine weiteren Rohstoffe als Input, wie z. B. zusätzliches H₂. Zudem bietet sich mit dem optionalen nachgeschalteten Prozess Steamcracken von CO₂-basiertem Naphtha die Möglichkeit die Anzahl der Hauptprodukte um zwei Folgeprodukte und Verwendungsoptionen zu erhöhen (Kapitel 4.2.1). Auch ist der Energieaufwand für die Fischer-Tropsch Synthese mit 3,4 MWh / Tonne Produkt vergleichsweise gering (nur der Energieaufwand der Fischer-Tropsch Synthese, der Energieaufwand für den vorgeschalteten Prozess der *reverse Water Gas Shift* (rWGS) Reaktion ist hier nicht berücksichtigt).

Die Hydrierung auf der anderen Seite ist zwar ein *Stand Alone*-Prozess, benötigt aber zusätzliche Rohstoffe wie H₂ um CO₂ in Methanol oder Methan umwandeln zu können. Der Energieaufwand liegt für die Hydrierung mit 7 MWh / Tonne Produkt doppelt so hoch wie bei der Fischer-Tropsch-Synthese, allerdings entstehen bei der Hydrierung auch mit 17 fast 8-mal so viele Folgeprodukte und Verwendungsoptionen im Vergleich zur Fischer-Tropsch Synthese.

Das acetogene Bakteriensystem zur biotechnologischen Umwandlung von CO₂ belegt Platz 5 in der Potenzialeinstufung der technologischen Konzepte, mit 58 % (Abbildung 23). Es ist ein *Stand Alone*-Prozess, je nach Prozessaufbau und verwendetem Mikroorganismus können allerdings zusätzliche Rohstoffe nötig sein. Die technologische Reife liegt mit 5-9 je nach Produkt niedriger als für chemische Umwandlungsprozesse wie zum Beispiel Fischer-Tropsch Synthese und Hydrierung, deren TRL bei 9 liegt.

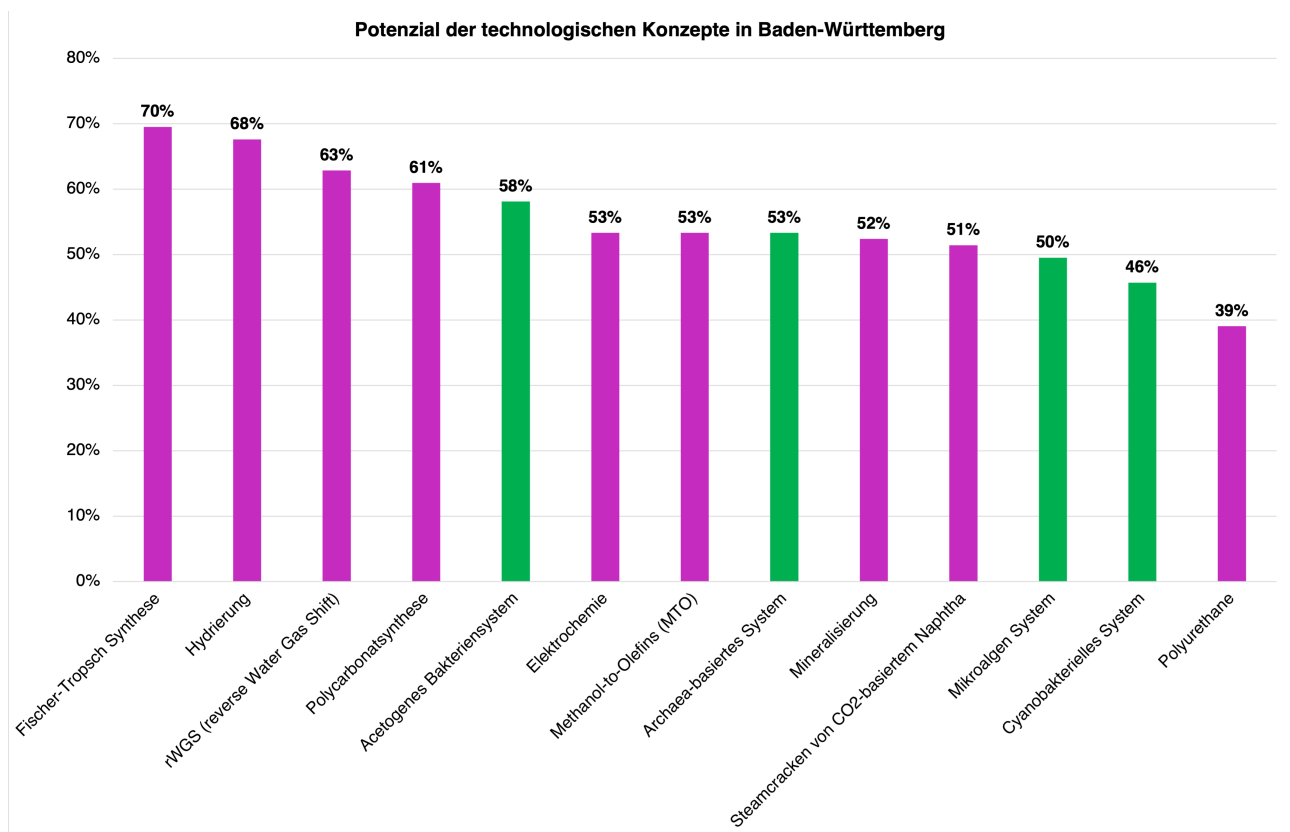


Abbildung 23: Potenzial der technologischen Konzepte in Baden-Württemberg. Magenta: Chemische Umwandlung von CO₂; Grün: Biotechnologische Umwandlung von CO₂.

Allerdings hat dieses biotechnologische Konzept mit 34 die höchste Anzahl an potentiellen

Produktabnehmern in Baden-Württemberg. Das liegt vor allem an der in Baden-Württemberg stark vertretenen Lack-, Arznei- und Heilmittelindustrie. Hier können die Hauptprodukte Butanol (Lackindustrie) und Ethanol (Arznei- und Heilmittelindustrie) als Lösungsmittel verwendet werden (Kapitel 4.2.5).

5 Notwendige Rahmenbedingungen und Handlungsoptionen

Für die erfolgreiche Etablierung von CO₂-Wertschöpfungsketten in Baden-Württemberg sind eine Reihe von verschiedenen Rahmenbedingungen und Grundvoraussetzungen notwendig. Im Folgenden werden zunächst die verschiedenen notwendigen Rahmenbedingungen und Grundvoraussetzungen und deren genereller und Baden-Württemberg-spezifischer Status quo erfasst. Dieser Status quo dient dann als Basis für Handlungsoptionen und Empfehlung für die erfolgreiche und nachhaltige Umsetzung von CCU in Baden-Württemberg.

Die notwendigen Rahmenbedingungen lassen sich in vier Kategorien einteilen: 1) Technologische Rahmenbedingungen, Politische / Rechtliche Rahmenbedingungen, Marktbezogene Rahmenbedingungen und Kompetenzrelevante Rahmenbedingungen (Tabelle 67). Diese werden in den folgenden Kapiteln beschrieben und erläutert.

Tabelle 67: Notwendige Rahmenbedingungen für die Etablierung von CCU in Baden-Württemberg.

Technologische Rahmenbedingungen	Politische / Rechtliche Rahmenbedingungen
<ul style="list-style-type: none"> • Welche zusätzlichen Rohstoffe werden benötigt? • Welche vor- und nachgeschalteten Prozesse werden benötigt? (CO₂-Abscheidung, Wasserstoff-Elektrolyse etc.) • Gibt es eine CO₂- und H₂-Infrastruktur? • Welche CO₂-Modellregionen / -Projekte/ -Initiativen in Deutschland und Europa (Bsp.)? 	<ul style="list-style-type: none"> • Welche politischen Instrumente zur Etablierung von CCU sind in der Umsetzung und/oder werden derzeit diskutiert – EU-Ebene? • Welche politischen Instrumente zur Etablierung von CCU sind in der Umsetzung und/oder werden derzeit diskutiert – nationale Ebene?
Marktbezogene Rahmenbedingungen	Kompetenzrelevante Rahmenbedingungen
<ul style="list-style-type: none"> • Wie hoch sind die derzeitigen Kapazitäten für CO₂-basierte Produkte? • Wie sind die Preise für CO₂ und H₂? • Wie hoch sind die Transportkosten? • Wie ist die gesellschaftliche Akzeptanz von CCU und CO₂-basierten Produkten? 	<ul style="list-style-type: none"> • Welchen Einfluss, welche Kompetenz hat die Landesregierung Baden-Württembergs? • Gibt es Vorarbeiten zu dem Thema? • Gibt es eine Anlaufstelle, ein Kompetenzzentrum? • Gibt es ein CCU-Netzwerk / Stakeholder-Netzwerk? • Wie sind die Genehmigungsverfahren, Auflagen für Anlagenbau? • Welche Fördermechanismen gibt es für CCU?

5.1 Technologische Rahmenbedingungen

Die technologischen Rahmenbedingungen sind auf Prozesse und Infrastruktur bezogen und beschäftigen sich mit den notwendigen Rohstoffen neben CO₂ für dessen Nutzung und dem allgemeinen Prozessaufbau und dessen Komplexität, aber auch mit der derzeitig vorhandenen oder nicht vorhandenen Infrastruktur und dem Transport für CO₂ und auch für H₂. Des Weiteren wurden in diesem Rahmen auch CO₂-Modellregionen oder Projekte in Deutschland und Europa identifiziert, die gegebenenfalls als Vorbild oder Blaupause für die Etablierung von CO₂-Wertschöpfungsketten in Baden-Württemberg dienen könnten.

Zusätzliche Rohstoffe und Prozesse

Um CO₂ chemisch oder biotechnologisch umwandeln und somit als Rohstoff nutzen zu können, benötigen die meisten technologischen Konzepte noch weitere Rohstoffe außer CO₂ selbst. Dies ist dann der Fall, wenn es sich um einen *Stand Alone*-Prozess handelt (Kapitel 4.4.1), *Multiple Step*-Prozesse hingegen verarbeiten ein CO₂-basiertes Zwischenprodukt, welches durch die Kombination von CO₂ mit einem anderen Rohstoff in einem vorgeschalteten Prozess hergestellt wurde. Tabelle 68 gibt eine Übersicht der technologischen Konzepte und der benötigten zusätzlichen Rohstoffe: Spalte „Wasserstoff-Elektrolyse“ für H₂ und Spalte „Zusätzliche Rohstoffe (andere als CO₂ und H₂)“.

Tabelle 68: Zusätzlich benötigte Rohstoffe und vor- und nachgeschaltete Prozesse.

Technologisches Konzept	CO ₂ -Abscheidung	Wasserstoff-Elektrolyse	Zusätzliche Rohstoffe (andere als CO ₂ und H ₂)	Zusätzlicher vorgeschalteter Prozess	Zusätzlicher nachgeschalteter Prozess
Elektrochemie	✓	X	H ₂ O	X	X
rWGS (<i>reverse Water Gas Shift</i>)	✓	✓	X	X	Optional: Fischer-Tropsch Synthese
Fischer-Tropsch Synthese	X	X	X	rWGS (<i>reverse Water Gas Shift</i>)	Optional: Steamcracken von CO ₂ -basiertem Naphtha
Hydrierung	✓	✓	X	X	Optional: <i>Methanol-to-Olefins</i> (MTO)
Mineralisierung	✓	X	CaO	X	X
Polycarbonatsynthese	✓	X	Epoxid	X	Optional: Polyurethane
<i>Methanol-to-Olefins</i> (MTO)	X	X	X	Hydrierung	X
Steamcracken von CO ₂ -basiertem Naphtha	X	X	X	rWGS (<i>reverse Water Gas Shift</i>) Fischer-Tropsch Synthese	X
Polyurethane	X	X	Isocyanat Diamin	Polycarbonatsynthese	X
Acetogenes Bakteriensystem	Prozess-spezifisch	Prozess-spezifisch	Prozess-spezifisch	X	X
Archaea-basiertes System	✓	✓	Prozess-spezifisch	X	X
Cyanobakterielles System	✓	X	Prozess-spezifisch	X	X
Mikroalgen System	✓	X	Prozess-spezifisch	X	X

Dieses Wissen über alle notwendigen Rohstoffe für das jeweilige technologische Konzept zur Umwandlung von CO₂ ist unerlässlich, um CO₂-Wertschöpfungsketten aufzubauen.

CO₂- und H₂-Infrastruktur

Diese zusätzlichen Rohstoffe, vor allem das CO₂ selbst und H₂, müssen gegebenenfalls auch vom Abscheidungs- oder Produktionsort zum Nutzungsort transportiert werden. Das geht natürlich in entsprechenden Tanks und Aufbewahrungsbehältern die via LKW, Schiff oder Zug transportiert werden können. Aber auch die Notwendigkeit und Etablierung von CO₂- und H₂-Pipelines werden immer mehr diskutiert, um somit einen einfacheren, flächendeckenderen Transport zu ermöglichen.

CO₂-Infrastruktur

Derzeit ist weder in Baden-Württemberg noch in Deutschland insgesamt eine CO₂-Pipeline in Betrieb. Eine CO₂-Infrastruktur ist im Entwurf der Carbon-Management-Strategie enthalten und die Bundesregierung „plant“ eine CO₂-Pipeline mit einer Länge von 4.800 km bis 2045, durch Nutzung von ausgedienten Erdgasleitungen. Neben den staatlichen Plänen für eine CO₂-Infrastruktur plant auch der Fernleitungsnetzbetreiber OGE die Erstellung eines CO₂-Startnetzes mit einer Länge von 964 km, hier allerdings durch einen kompletten Neubau der Infrastruktur³⁴.

³ <https://gas-h2.de/transformation-energiesystem/carbon-management/co2-netz>

⁴ https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/240226-eckpunkte-cms.pdf?__blob=publicationFile&v=6



Abbildung 24: Geplantes CO₂-Startnetz von OGE. (<https://gas-h2.de/transformation-energiesystem/carbon-management/co2-netz>).

H₂-Infrastruktur

In Deutschland sind derzeit ca. 380 km H₂-Pipeline in Betrieb (Tabelle 69). Mit dem Ausbau des im Oktober 2024 genehmigten H₂-Kernetzes sind bis 2032 eine Länge von über 9.000 km H₂-Pipeline in Deutschland geplant (Abbildung 25). Dieses Kernnetz beinhaltet auch derzeit laufende EU- und national geförderte Projekte zur Produktion von grünem Wasserstoff: Get H₂, MosaHyC, HHWin, Green Octopus Mitteldeutschland, AquaDuctus, Clean Hydrogen Coastline⁵⁶.

Tabelle 69: In Betrieb befindliche H₂-Pipelines.

Betreiber	Standort	Länge
Air Liquide	Rhein/Ruhr	240

⁵ <https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz-wasserstoff-kernetz/>

⁶ <https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/wasserstoff-kernetz-erste-525-kilometer-starten-noch-in-diesem-jahr/>

Linde	Leuna/Bitterfeld	135
Linde	Frankfurt-Hoechst	2



Abbildung 25: Geplantes und genehmigtes H₂-Kernnetz in Deutschland. (<https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz-wasserstoff-kernnetz/>)

In Baden-Württemberg ist ein Wasserstoffkernnetz mit einer Gesamtlänge von 556,5 km geplant. Davon werden 213 km durch neugebaute Pipelines und 271,5 km durch umgestellte Erdgasleitungen abgedeckt. 72 km sind potenzielle zusätzliche Pipelines und Abschnitte die von Netzbetreibern freiwillig betrieben werden und nicht Teil des genehmigten Wasserstoffkernnetzes sind⁵⁶ (Abbildung 26, Tabelle 70). 2019 startete zudem das Projekt „Wasserstofftechnologien am südlichen Oberrhein – H₂-SO“ (<https://h2-so.de>), welches 2022 abgeschlossen wurde.

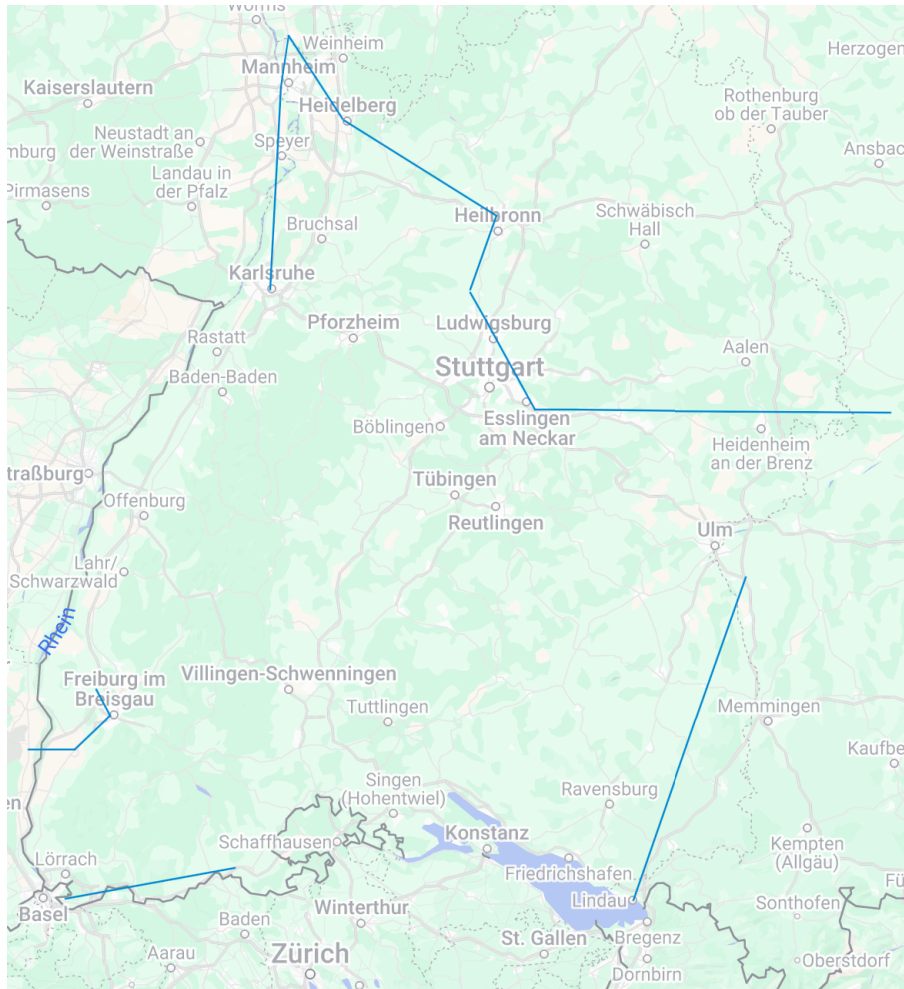


Abbildung 26: Geplantes und genehmigtes H₂-Kernetz in Baden-Württemberg.

Tabelle 70: Geplantes und genehmigtes H₂-Kernetz in Baden-Württemberg.

Betreiber / Projekt	Standort / Verlauf	Länge	Inbetriebnahme
Neubaumaßnahmen			
Gascade / Flow2H ₂ ercules	Lampertheim-Ludwigshafen	10	2029
Gascade / Flow2H ₂ ercules	Ludwigshafen-Karlsruhe	59	2030
terraneTS	Lampertheim-Heidelberg	29	2030
k.A.	Altbach-Bissingen	100	2032
RHYn Interco	Fessenheim-Bad Krozingen	15	2029
Umstellungsmaßnahmen			
terraneTS	Heidelberg-Heilbronn	60	2030
terraneTS	Heilbronn-Löchgau	25	2030

terraneTS	Löchgau-Altbach	44	2030
k.A.	Bad Krozingen-Freiburg	20	2029
k.A.	Hittistetten-Lindau	120	2032
k.A.	Freiburg-March	2,5	2029
Zusätzliche mögliche Wasserstoffleitungen (nicht Teil des genehmigten Wasserstoff-Kernnetzes)			
Netze BW GmbH	Esslingen-Esslingen	0,5	2032
Netze BW GmbH	Esslingen-Esslingen	2,4	2032
Netze BW GmbH	Esslingen-Altbach	0,7	2032
Netze BW GmbH	Altbach-Altbach	0,4	2032
badenoVA NETZE GmbH	March-Freiburg	10	2030
badenoVA NETZE GmbH	Waldshut-Tiengen-Grenzach	58	2030

CO₂-Modellregionen / -Projekte / -Initiativen in Deutschland und Europa

Derzeit gibt es eine Vielzahl von kleinen, großen und auch Verbundprojekten im Bereich der CO₂-Nutzung. Tabelle 71 zeigt eine kleine Auswahl an deutschen und europäischen Projekten und Initiativen im Bereich CCU.

Tabelle 71: Beispiele für CO₂-Modellregionen / -Projekte / -Initiativen in Deutschland und Europa.

Projekt / Fördermaßnahme	Förderung	Laufzeit	Beschreibung	Referenz
Carbon2Business	EU; Emissionshandelssystem Innovationsfonds	Phase I: 2022-2023 Phase II: 2024-2025 Phase III: 2026-2028 Phase IV: 2029 Phase V: 2030	CO ₂ -neutrale Zementanlage; Oxyfuel-Verbrennung und 100% Abscheidung des produzierten CO ₂ .	https://carbon2business.de
CO ₂ Hub Brunsbüttel	-	-	Transport des in Carbon2Business abgeschiedenen CO ₂ via Pipeline, von Lägerdorf zur Küste. Temporäre Speicherung und Weitertransport durch Partner via Schiff, Zug oder LKW.	https://www.chemcoast-park.de/de/news/hafenstandort-brunsbuttel-positioniert-sich-als-bedeutender-hub-fur-co2-export/
Carbflex von InnoEnergy	InnoEnergy wird vom European Institute of Innovation	2024-2030	Initiative von InnoEnergy mit dem Ziel eine europäische CO ₂ -Wertschöpfungskette zu etablieren. CO ₂ -Emittenten / CO ₂ -	https://innoenergy.com

	& Technology (EIT) gefördert		Quellen sollen mit CCU- / CCS-Projekten vernetzt werden.	
Carbon2Chem	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)	Phase I: 2016-2020 Phase II: 2020-2024 Phase III: Seit 2024	CO ₂ -Abscheidung aus Stahl, Zement oder Kalk unter Verwendung erneuerbarer Energien. CO ₂ -Nutzung für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen, Kunststoffe und Basischemikalien.	https://www.um-sicht.fraunhofer.de/de/carbonmanagement/kohlenstoffkreislauf.html
Chemport Europe	-	-	Initiative in Nord-Niederlanden zur Unterstützung und Etablierung einer nachhaltigen Chemie. Durch Nutzung / Herstellung von Biomasse, CO ₂ , Wasserstoff und zirkulären Polymeren.	https://www.chemport.eu
ReCO ₂ NWert	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)	2024-2028	ReCO ₂ NWert (Umsetzung der Ressourcenwende in der chemischen Industrie durch biotechnologische CO ₂ Nutzung in regionalen Wertschöpfungsketten) darauf ab, unvermeidbare Prozessgase biotechnologisch in industriell nutzbare Endprodukte umzuwandeln und auf diese Weise den darin gebundenen Kohlenstoff zu fixieren.	https://reco2nwert.de

Zwei dieser Verbundprojekte sind Carbon2Business und Carbon2Chem. Hier haben sich, gefördert von der EU und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, Akteure aus verschiedenen industriellen Bereichen zusammengefunden, um CO₂ als Rohstoff zu nutzen. Beide Projekte laufen schon seit mehreren Jahren, sind phasenweise aufgebaut und werden dementsprechend gefördert.

Initiativen zur Etablierung von Wertschöpfungsketten zur generellen Nutzung von erneuerbarem Kohlenstoff und explizit zur Nutzung von CO₂ gibt es in den Niederlanden und europaweit. Chemport Europe ist eine Initiative in Nord-Niederlanden zur Unterstützung und Etablierung einer nachhaltigen Chemie durch Nutzung / Herstellung von Biomasse, CO₂, Wasserstoff und zirkulären Polymeren. Carbflex von InnoEnergy ist eine Initiative mit dem Ziel eine europäische CO₂-Wertschöpfungskette zu etablieren. CO₂-Emittenten / CO₂-

Quellen sollen mit CCU- / CCS-Projekten vernetzt werden. Diese Projekte und Initiativen können gegebenenfalls als Vorbild oder Blaupause für die Etablierung von CO₂-Wertschöpfungsketten in Baden-Württemberg dienen.

5.2 Politische / Rechtliche Rahmenbedingungen

Politische / Rechtliche Rahmenbedingungen beinhalten die EU und nationalen politischen Instrumente zur Etablierung von CCU, die sich derzeit in der Umsetzung befinden oder diskutiert werden.

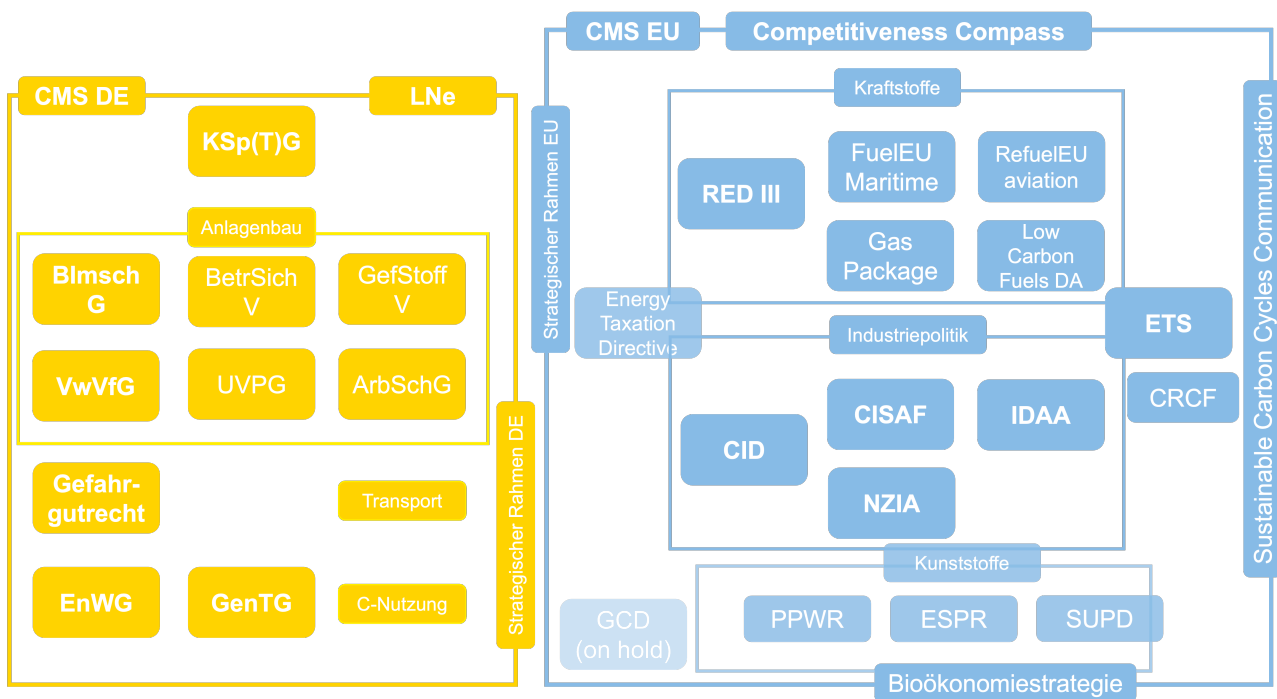


Abbildung 27: Übersicht Gesetze, Direktiven und Strategien die für CCU gelten.

Abbildung 27 zeigt eine Übersicht der nationalen und EU-relevanten Gesetze, Direktiven und Strategien, die sich auf CCU beziehen. Der nationale regulatorische Rahmen in Deutschland ist gut überschaubar. Relevante Anpassungen zur besseren Unterstützung von CCU-Maßnahmen sind in den nächsten Monaten zu erwarten. Entsprechende Grundlagen finden sich sowohl in den Arbeitsergebnissen der letzten Legislatur (der Ampelregierung) wie auch im aktuellen Koalitionsvertrag (Schwarz-Rot) und den Signalen aus dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE).

Die folgenden Abschnitte behandeln die deutsche Regulatorik in aller Kürze. Eine ausführliche technische Darstellung und die Einschätzung zur Rechtsauslegung sind im Gutachten der Umwelttechnik BW sehr gut dargelegt⁷.

Die maßgeblichsten Entwicklungen finden jedoch auf Ebene der EU statt. Dies betrifft Regelungen, die sowohl sektor- wie grenzübergreifend die Förderung und den Einsatz von CCU betreffen. Sowohl national als auch auf Ebene der EU ist CCU in Klimagesetzgebung bzw. -strategien eingebettet. Da sich aus diesen

⁷ Umwelttechnik BW GmbH (2024): Rechtsgutachten Biotechnologische CO₂-Nutzung

jedoch weder konkrete Maßnahmen noch Fördermöglichkeiten mit direktem CCU-Bezug ergeben, werden diese hier nicht im Detail beleuchtet.

Deutscher Rahmen

KSpG⁸: Der ganz maßgebliche Rechtsrahmen in Deutschland wird seit 2012 durch das Kohlendioxid-Speicherungsgesetz festgelegt. Eine Novelle des Gesetzes hat bereits 2024 die erste Lesung im Parlament durchlaufen, das Inkrafttreten noch in 2025 ist möglich und scheint durch die aktuelle Bundesregierung auch erwünscht. Wesentlicher Bestandteil der Novelle ist ausdrücklich auch der Themenbereich Transport, mit dem eine duale Nutzung von Pipelines sowohl zu Speicher- als auch zu Nutzungszwecken ermöglicht wird (neu KSpTG). Ebenfalls neu enthalten ist eine Länderöffnungsklausel, die es Landesregierungen erlaubt, entgegen der bundesweit gültigen Regelung auch geologische Speicherung an Land zuzulassen. Bei dem Bau von CO₂-Pipelines muss kein eigenes Planfeststellungsverfahren laufen, wenn sie parallel zu H₂-Pipelines gebaut werden. Das KSpTG wurde am 6. November 2025 im Bundestag verabschiedet und soll am 21. November 2025 vom Bundesrat bestätigt werden.

Abhängige Regelungen

Ob und welche weiteren Gesetze zu beachten sind, ergibt sich aus der Art der CCU-Anlage oder CCU-Infrastruktur.

BImSchG⁹ : Bei allen Anlagen, die keiner Planfeststellung unterliegen, ist das Bundesimmissionsschutzgesetz zu beachten, in dessen Rahmen auch über baurechtliche Vorgaben entschieden wird.

VwVfG¹⁰ : Planfeststellungsverfahren nach Verwaltungsverfahrensgesetz, bzw. dem gültigen Fachplanungsgesetz (z. B. KSpTG) sind für infrastrukturelle Maßnahmen anzuwenden, beispielsweise dem Bau von Pipelines.

EnWG¹¹: CO₂-Recyclinganlagen können dem Energiewirtschaftsgesetz unterliegen. Die Rechtslage ist hier jedoch nicht eindeutig.

Gefahrtrecht: Im Falle multimodalen CO₂-Transports (z. B. per Pipeline und Schiene) gelten die Bestimmungen des Gefahrtrechts.

GenTG¹²: Kommen im Rahmen der CCU-Maßnahmen biotechnologische Konversionsansätze zum Einsatz, sind ggf. das Gentechnikgesetz sowie die zugehörige Sicherheitsverordnung (GenTSV) zu beachten.

Weitere Regelungen: Je nach Art der Anlage können zudem das Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG), die Gefahrstoffverordnung (GefStoffV), die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV), das Wasserhaushaltsgesetz oder das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) zur Anwendung kommen.

Deutsche Carbon-Management-Strategie: Seit 2024 steht die Verabschiedung einer dezidierten,

⁸ Gesetz zur Demonstration der dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid 1) (Kohlendioxid-Speicherungsgesetz - KSpG).

⁹ Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG)

¹⁰ Verwaltungsverfahrensgesetz (VwVfG)

¹¹ Energiewirtschaftsgesetz

¹² Gesetz zur Regelung der Gentechnik (Gentechnikgesetz - GenTG)

bundesweiten CMS im Raum. Diese soll voraussichtlich noch in 2025 (3. Quartal) verabschiedet werden. Ob und in welcher Form Änderungen vom ursprünglichen Entwurf enthalten sind, ist Stand heute schwer zu beurteilen. Sicher scheint, dass die emissionsintensiven Industrien Kalk und Zement sowie die Abfallwirtschaft darin angesprochen werden. Ob weitere Sektoren wie Stahl oder Chemie ebenfalls darunterfallen werden, ist noch unklar. Der Einsatz von CCU bei Anlagen zur energetischen Verwendung von (Bio-)Gas und Biomasse ist sehr wahrscheinlich auch Teil der Strategie. Möglich ist eine Verschiebung der Strategie hin zur prioritären CO₂-Nutzung vor der langfristigen Speicherung. Die Strategie sieht außerdem die Ratifizierung des London Protokolls vor, welches den grenzüberschreitenden CO₂-Transport regelt.

Langfriststrategie Negativemissionen: Ebenfalls noch in 2025 (3. Quartal) verabschiedet werden soll die LNe. Auch hier ist ein Eckpunktepapier der letzten Regierung die Grundlage. Darin werden einige CCU-Anwendungen explizit benannt. Dazu gehören der Einsatz von CCU bei der Nutzung von Bioenergie (BECCU), bei der Müllverbrennung¹³ (WCCU), in Kombination mit Direct Air Capture (DACCU) sowie für die langfristige Bindung in Produkten. Änderungen am Entwurf, zum Beispiel der Einsatz an konventionellen Gaskraftwerken, sind denkbar aber schwer abzuschätzen.

Europäischer Rahmen

EU Industrial Carbon Management Strategie: Analog zur deutschen Carbon Management Strategie (CMS) ist auch die europäische Version eher als übergeordnete Richtungsweisung zu verstehen. Darin enthalten ist ein klares Bekenntnis, den Einsatz von Kohlenstoff aus nachhaltigen Quellen in der Industrie deutlich zu stärken. Der explizite Bezug in der Strategie auf Biotechnologien und die anstehende Biotechnologie-Initiative deuten zwar auf einen Fokus auf biogene Kohlenstoffe hin, CCU kann aber auch hier eine relevante Rolle spielen. Ebenfalls bedeutend ist die Betonung der Dringlichkeit nachfragefördernder Maßnahmen.

Bioökonomiestrategie: In die gleiche Richtung geht die anstehende Bioökonomiestrategie. Bisher zugängliche Entwürfe deuten jedoch darauf hin, dass CCU eher eine untergeordnete Rolle hinter Recycling und biogenen Quellen spielen soll. Sehr relevant ist jedoch, dass die Strategie anscheinend die kaskadische Nutzung von Kohlenstoff etablieren wird und darin die stoffliche über der energetischen Nutzung priorisiert wird. Dies findet sich auch in den bisher vorliegenden Entwürfen zum zugehörigen Circular Economy Act (CEA) wieder.

Sustainable Carbon Cycles Communication: Nicht bindend, aber mit deutlicher Außenwirkung. Bereits im Jahr 2021 hat die europäische Kommission ein ambitioniertes Ziel für den Chemiesektor als Schlüsselakteur kommuniziert. Bis 2030 sollen 20 % des Primärbedarfs an Kohlenstoff in Chemikalien und Folgeprodukten aus nachhaltigen, nicht-fossilen Quellen stammen. Hier wurde neben biogenem Kohlenstoff und Recycling auch explizit CCU genannt.

Clean Industrial Deal: Der CID ist die neue, übergeordnete Strategie der EU für eine nachhaltigere

¹³ Konkreter Text: thermische Verwertung von Abfall

Industrie mit explizitem Fokus auf der Wettbewerbsfähigkeit, insbesondere in energieintensiven Industrien (EEI) und dem Clean-Tech-Sektor. Unter dem Dach des CID sind eine ganze Reihe relevanter regulatorischer Maßnahmen gesammelt (z. B. auch eine Initiative für eine EU-weite grüne Mehrwertsteuererleichterung) und die meisten der folgend dargestellten Rahmenbedingungen sind im Kontext des CID zu lesen. Neben diversen Finanzierungsinstrumenten der EU setzt der CID auch einen neuen Rahmen für staatliche Beihilfen (siehe CISAF). Explizites Ziel des CID ist zudem die Schaffung europäischer Leitmärkte für abgeschiedenen Kohlenstoff.

Industrial Decarbonisation Accelerator Act: Der IDAA erlaubt in erster Linie beschleunigte Genehmigungsverfahren (explizit auch für CCU), setzt Anreize für die Nutzung erneuerbarer Kohlenstoffe (*clean carbon feedstocks*, gemeint sind CCU, recycling und nachhaltige Biomasse) und soll Leitmärkte durch EU-weite Mindestquoten in Produkten schaffen. Der Rechtsakt erlaubt außerdem die Identifikation von Pilotprojekten und -clustern. Im Fokus sind bestimmte energieintensive Industriesektoren und damit verbundene Wertschöpfungsketten (z. B. Chemie, Raffinerien, Zement). Mit einer Verabschiedung ist Ende 2025 zu rechnen.

Net Zero Industry Act: Der NZIA ist bereits 2023, noch vor dem CID in Kraft getreten. Kern ist das Ziel, bis 2030 insgesamt 40 % des industriellen Produktionsbedarfes der EU aus emissionsfreien (Net-Zero) Prozessen zu decken. Dazu erlaubt der NZIA ebenfalls vereinfachte Genehmigungsverfahren für strategische Projekte (z. B. die Anwendung überragenden öffentlichen Interesses) für strategische Technologien und Pilotregionen (Net-Zero Acceleration Valleys). Im eigentlichen Text findet sich kein expliziter Fokus auf CCU, der Anhang listet aber eine Reihe nachhaltiger Technologien auf, die als strategische Projekte gelten können. Dazu zählen Stand jetzt auch zwei Ansätze für CCU, die thermo- und elektrochemische CO₂-Nutzung. Stärker als CCU steht aber die dauerhafte Speicherung und die dafür notwendige Transport- und Marktinfrastruktur im Vordergrund des NZIA.

Clean Industrial Deal State Aid Framework: Das durch den CID eingeführte und sehr aktuelle Rahmenwerk (Juni 2025) CISAF regelt ab sofort die Möglichkeiten staatlicher Beihilfen für grüne Schlüsseltechnologien, darunter auch explizit die CCU-Anwendungen CO₂-Mineralisierung, Technologien für Kohlenstoffrecycling und CO₂-basierte Kraftstoffe. Anhang 2 präzisiert die konkreten Technologien und entspricht dem Anhang des NZIA. Veränderungen an beiden Leitlinien sollten also parallel betrachtet werden. Zu den aufgeführten Technologien mit CCU-Relevanz zählen beispielsweise RFNBO Anlagen oder auch diverse Abscheidetechnologien und Transportinfrastruktur.

Renewable Energy Directive III: Die RED III setzt wichtige Bedingungen für synthetische Kraftstoffe, zu denen insbesondere CCU-Kraftstoffe gehören. Zunächst einmal definiert die Richtlinie zwei mögliche Arten von Kraftstoffen, bei denen CCU zur Anwendung kommen kann: *Recycled Carbon Fuels* (RCFs) und *Renewable Fuels of Non-Biological Origin* (RFNBOs). Darüber hinaus gibt die RED-Mindestquoten für den Anteil dieser Kraftstoffe im Verkehrs- und Industriesektor (hier als Anteil des genutzten Wasserstoffes) vor. Alle Regularien mit Bezug zu Kraftstoffen beziehen sich auf RED, teilweise auch solche mit Bezug zu materieller Nutzung.

RefuelEU Aviation: Die Richtlinie regelt den Einsatz nachhaltiger Kraftstoffe in der Luftfahrt (*Sustainable Aviation Fuels* (SAF)), für die progressiv steigende Quoten am Gesamtverbrauch der Branche festgelegt

sind. Mit Bezug zu CCU ist hier die Kategorie synthetischer Kraftstoffe relevant, die explizit mit abgeschiedenem Kohlenstoff hergestellt werden sollen. Darüber hinaus kann die Kategorie synthetischer Kraftstoffe mit niedrigem Kohlenstoffgehalt (LCFs) relevant werden, sofern diese unter Einsatz erneuerbarer Energien produziert werden und ambitionierte Emissionsreduktionsziele erreichen. Synthetische Kraftstoffe sollen bis 2050 mindestens 35 % aller Luftkraftstoffe ausmachen. Ein zugehöriger delegierter Rechtsakt zur Festlegung der technischen Details über Produktionsprozesse und -technologien wird noch in diesem Jahr erwartet.

FuelEU Maritime: Für die Schifffahrt gibt es keine Quotenregelung für Kraftstoffe, allerdings gelten hier strikte Vorgaben zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen. Diese können nur durch den Einsatz alternativer Kraftstoffe erreicht werden, zu denen auch CCU-basierte Lösungen zählen (hier vor allem Methanol). Die Definition der zulässigen Kraftstofftypen folgt der RED.

Delegated Act on Low Carbon Fuels (tbd): Der delegierte Rechtsakt soll noch in diesem Jahr beschlossen werden. Er ist besonders relevant, da darin bestimmt wird, welche Prozesse für die Abscheidung von CO₂ für die Verwendung in Kraftstoffen zulässig sind (bspw. Verbrennung gemischter Abfallströme). Daneben finden sich darin Vorgaben zur Behandlung von CCU-Materialien am Ende ihrer Lebenszeit und wie Kohlenstoffströme (auch Kohlenstoffmonoxid) aus verschiedenen Quellen (z. B. biogene Quellen, Quellen aus dem Energiesektor) zugeordnet werden sollen.

Gas Package Directive: In 2024 verabschiedet, regelt die Richtlinie für erneuerbares Gas, neben zentralen Fragen zu Wasserstoff, den Umgang mit synthetischen Gasen. Dazu gehören der Zugang zu Gasnetzen, die Möglichkeit zur Senkung von Netzentgelten sowie technische Details und Vorgaben zur Zertifizierung emissionsarmer Gase. CCU-basierte Ansätze sind hier gemäß den Definitionen der RED miterfasst.

Emission Trading System: Das EU-Emissionshandelssystem hat in seiner letzten Revision die grundlegende Gleichstellung von CCU und CCS-Ansätzen festgeschrieben. Die Abscheidung und Speicherung (CCS) konnte bereits länger von den Gesamtemissionen eines Prozesses abgezogen werden. Selbiges gilt nun auch für Kohlenstoffe aus CCU-Prozessen, die in Produkten mindestens 35 Jahre gebunden sind. Nach der derzeit gültigen Definition aus dem zugehörigen delegierten Rechtsakt erfüllen zunächst nur Bauprodukte die notwendigen Voraussetzungen. Im derzeit laufenden Überarbeitsverfahren des ETS stehen jedoch drei relevante Themen auf dem Plan: die Berechnungsmethodik für nicht-dauerhafte CCU-Anwendungen und wie diese eingebunden werden können, die Integration von dauerhaften Negativemissionen (*permanent removals*) sowie, besonders relevant für CCU, die Erweiterung des ETS auf Abfallverbrennungsanlagen, für die dann die CO₂-Abscheidung und -nutzung ökonomisch interessant werden könnte. Die neuen Regeln sollen bis Ende 2026 entwickelt sein.

Carbon Removals and Carbon Farming: Eine klare Schnittstelle zum ETS beinhaltet seit 2024 auch das Rahmenwerk zur Zertifizierung negativer Emissionen. CCU findet hier Eingang, indem für zertifizierfähige Produkte die langfristige Speicherung von CO₂ auf mindestens 35 Jahre festgelegt wird. Die weitere Entwicklung des CRCF wird sich deutlich auf die Definition und zukünftige Rolle von CCU-Technologien im Kontext der materiellen Nutzung von CO₂ auswirken.

Kunststoffe: Es ist erwähnenswert, dass der regulatorische Rahmen für Kunststoffe bisher keine direkte

Rolle für CCU enthält. Dies steht im Widerspruch zu neueren Initiativen, die Alternativen zur Verdrängung fossiler Kohlenstoffe explizit in den Blick nehmen und damit auch CCU einschließen. Weder die EU-Ökodesign-Verordnung (ESPR) noch die europäische Verpackungsverordnung (PPWR) oder die Einwegkunststoff-Richtlinie (SUPD) enthalten Definitionen oder allgemeinen Text zu CCU. Die SUPD wird derzeit weiterentwickelt. Ein möglicher neuer Bezugspunkt könnten chemische Recyclingansätze sein, bei denen CCU zum Einsatz kommt.

Zudem wird erwartet, dass zukünftig auch Kunststoffe im Bau, wie heute Holzprodukte, als Carbon Removal zählen werden, soweit ihre Lebensdauer in der Anwendung länger als 35 Jahre ist.

Energy Taxation Directive: die Energiebesteuerungsrichtlinie ist eine ältere Initiative, die bereits seit 2021 verhandelt wird. Angestoßen durch den Competitiveness Compass, den CID und den IDAA könnte jedoch eine neue Dynamik entstehen. Im Kern steht die Möglichkeit, nachhaltigere Produkte vollständig oder teilweise von der Mehrwertsteuer zu befreien (Green VAT initiative). Eine zeitnahe, flächendeckende Umsetzung in nationale Steuersysteme erscheint jedoch zumindest fraglich.

Green Claims Directive: Die GCD soll klar festlegen, welche Aussagen zu Nachhaltigkeit und Umwelteinflüssen für Produkte zulässig sind. Im Wesentlichen soll jeder Claim unabhängig geprüft und durch Daten belegbar sein. Dies betreffe insbesondere die Vermarktung von CCU-basierten Produkten. Ursprünglich sollte die Richtlinie 2025 in Kraft treten, liegt jedoch seit Juni auf Eis und es ist derzeit unklar, ob sie überhaupt noch verabschiedet wird.

Zusammenfassung – Relevante Rahmenbedingungen für Baden-Württemberg

Gesetz zur Änderung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes: Der vom Kabinett verabschiedete Gesetzesentwurf zum neuen KSpTG sollte möglichst schnell verabschiedet werden. Das Land Baden-Württemberg kann sich gemäß dem Positionspapier der Landesregierung (vom 15.10.2024) im Bundesrat für eine schnelle Verabschiedung einsetzen.

Clean Industrial Deal State Aid Framework: Die Finanzierungsmöglichkeiten im Rahmen des CISAF (und der zugehörige NZIA) müssen schnell umgesetzt werden können. Insbesondere sollten die Schwerpunktbereiche Entwicklung von Fertigungskapazitäten für saubere Technologien und Förderung privater Investitionen in Clean Deal Technologien in Deutschland schnell zur Förderfähigkeit gebracht werden. Die Landesregierung kann sich hier für die Umsetzung im Rahmen der Carbon-Management-Strategie einsetzen.

Important Project of Common European Interest (IPCEI): Für große Pilotprojekte im CCU-Rahmen bietet sich das Finanzierungsinstrument IPCEI der EU an, unter dem Themendach CO₂-arme Industrie. Hier kann das Landesministerium interessierte Industrieakteure aktiv bei der Antragsstellung und der Zusammenarbeit mit der Beihilfestelle des BMWF und der EU-Kommission unterstützen. Notwendig ist hier eine Grenzüberschreitende Zusammenarbeit mit mindestens einem weiteren EU-Mitgliedsstaat.

5.3 Marktbezogene Rahmenbedingungen

Die marktbezogenen Rahmenbedingungen beschäftigen sich mit den derzeitigen weltweiten Kapazitäten für CO₂-basierte Produkte, die Preise und Transportkosten für CO₂ und H₂, sowie Themenstichpunkte zur gesellschaftlichen Akzeptanz von CCU und CO₂-basierten Produkten.

Kapazitäten CO₂-Produkte

Die weltweiten Kapazitäten für CO₂-basierte Produkte lagen in 2024 bei etwas über 1,7 Millionen Tonnen (Tabelle 72). Wobei Polycarbonate den größten Anteil ausmachen. Den voraussichtlich größten Zuwachs bis 2029 werden Methanol, Ethanol, synthetische Kraftstoffe, Methan und Olefine und Polyolefine verzeichnen.

Tabelle 72: Weltweite Kapazitäten für CO₂-Produkte.

*Chemische Umwandlung, **Biotechnologische Umwandlung, -: Keine Herstellung mit der jeweiligen CO₂-Umwandlung

Produkt	Kapazität 2024 (Tonnen / Jahr)	Kapazität 2029 (Tonnen / Jahr)
Butanol	Labormaßstab	-
DME	3.750	-
Ethanol	Labor- bis Pilotmaßstab*; 200.000**	-; 700.000**
Ethylen	Labor- bis Pilotmaßstab	
Kalziumkarbonat	-	-
Kohlenmonoxid	Labor- bis Pilotmaßstab	-
Kohlenwasserstoffe: Benzin, Diesel, Kerosin, Naphtha, Wachse	21.000*	800.000*
Methan	1.000*; Pilotmaßstab**	55.000*; 320.000**
Methanol	450.000	16.000.000
Olefine	-	300.000
Polycarbonat	1.000.000	-
Polycarbonatpolyol	40.000	-
Polyolefine	-	300.000
Synthesegas	Labor- bis Pilotmaßstab	-

Methanol zeigt hierbei das erwartete größte Wachstum bis 2029. Der größte Ausbau für Methanolkapazitäten ist in China geplant, mit einem Anteil von 52 %. Europe, zusammen mit Afrika und dem Mittleren Osetn, sowie Amerika haben einen Anteil von jeweils 22 %.

Preise CO₂ und H₂

Die Preise für CO₂ und H₂ sind abhängig davon, welchen Bereich und welche Art von CO₂ und H₂ man betrachtet.

Für CO₂ unterscheidet man vor allem zwischen dem CO₂-Preis im Emissionshandel (EU ETS), der derzeit bei 55 € / Tonne liegt und dem Vertriebspreis, der für CO₂ in technischer Qualität bei 7-10 € / kg liegt und für CO₂ in Nahrungsmittelqualität bei 12-20 € / kg. Darüber hinaus gibt es dann natürlich noch die Transport- und Speicherkosten für CO₂. Die geschätzten zukünftigen Kosten in Deutschland liegen hierfür bei 48-104 € / Tonne¹⁴:

Für H₂ gibt es im allgemeinen unterschiedliche Preise, je nachdem wie und in welchem europäischen Land der Wasserstoff hergestellt wurde (Tabelle 73). Grauer Wasserstoff, wird durch Dampfreformierung aus fossilen Brennstoffen (Erdgas) gewonnen und ist mit um die 4 € / kg der günstigste Wasserstoff. Gefolgt vom blauen Wasserstoff mit ca. 6 € / kg. Das ist grauer Wasserstoff, dessen CO₂ bei der Erzeugung aufgefangen und gespeichert wird.

Tabelle 73: Preisspannen und Durchschnittspreise für H₂ in Europa.

Art von Wasserstoff	Preisspanne (€ / kg H ₂)	Durchschnittspreis (€ / kg H ₂)
Grauer Wasserstoff	2,7-5,60	4,15
Blauer Wasserstoff	4,50-10	6,38
Gelber Wasserstoff	3,90-16,44	9,85
Grüner Wasserstoff	4,18-9,60	6,87

Am teuersten sind derzeit gelber und grüner Wasserstoff, mit durchschnittlich fast 10 € / kg und 7 € / kg. Die große Preisspanne vor allem beim gelben Wasserstoff liegt an den unterschiedlichen Strompreisen in den europäischen Ländern. Denn sowohl gelber als auch grüner Wasserstoff werden durch Elektrolyse hergestellt. Für die Elektrolyse vom gelben Wasserstoff kommt die Energie aus dem Strommix und bei grünem Wasserstoff werden ausschließlich erneuerbare Energien aus Wind, Wasser und Sonne genutzt. Erneuerbarer Strom ist im Sommer extrem preiswert, zum Teil sogar mit negativem Preis. Diese Zeiten nehmen jedes Jahr zu. Würde man das fluktuierende Angebot durch Batteriespeicher konstant gestalten, könnte der Solarstrompreis im Sommerhalbjahr in Deutschland zwischen 3 und 7 cent/kWh liegen. Durch einen Ausbau der erneuerbaren Energien sowie Batteriespeicher wären zukünftig deutlich günstigere Preise für grünen Wasserstoff möglich.

Die Transportkosten für H₂ sind unabhängig von der Herstellungsart und bedingt durch die Art der verwendeten Pipelines¹⁵. Für den Transport durch neue H₂-Pipelines liegen die Kosten bei 0,3 € / kg / 1.000 km für den Transport durch umgewandelte Erdgas-Pipelines liegen sie bei 0,1 € / kg / 1.000 km.

¹⁴ <https://www.catf.us/ccs-cost-tool/>;

¹⁵ Hydrogen Europe (2024): Hydrogen infrastructure the recipe for a hydrogen grid plan

Gesellschaftliche Akzeptanz von CCU

Die gesellschaftliche Akzeptanz von CCU und dessen Analyse ist ein komplexes Themengebiet welches unter verschiedenen sozioökonomischen und sozialen Aspekten betrachtet und analysiert werden kann.



Abbildung 28: Themenüberblick gesellschaftliche Akzeptanz von CCU.

Eine valide Auswertung der gesellschaftlichen Akzeptanz von CCU bedarf einer eigenständigen Studie die sowohl Interviews und Fragebögen mit Personen mit verschiedenen gesellschaftlichen, beruflichen und schulischen Hintergründen sowie dessen Auswertung beinhaltet. Solch eine Analyse kann im Rahmen dieser Potenzialanalyse nicht durchgeführt werden. Deswegen werden im Folgenden nur thematische Stich- und Schwerpunkte die immer wieder im Rahmen der gesellschaftlichen Akzeptanz genannt werden, benannt und erläutert. Hierbei handelt es sich um sechs verschiedene Themenschwerpunkte die direkt oder indirekt mit CCU zu tun haben (Abbildung 28).

Bei der CO₂-Nutzung an sich gibt es zum Beispiel gesundheitliche Bedenken, je nach CO₂-Produkt welches hergestellt wurde, ob das im Produkt gebundene CO₂ wieder freigesetzt werden kann und dann dem Verbraucher schadet. Ähnliche Sicherheitsbedenken gibt es beim Auf- und Ausbau von CO₂- und H₂-Pipelines. Mit der CO₂-Nutzung und/oder Speicherung, sowie der Etablierung einer funktionierenden CO₂-Infrastruktur sind dann natürlich auch sogenannte Lock-In Effekte verknüpft, also die Förderung von Infrastruktur und die Verlängerung der Nutzung fossil-basierendem CO₂ und somit gleichzeitige Hemmung von Investitionen in CO₂-neutrale Alternativen. Die CO₂-Speicherung aber auch die Erzeugung erneuerbarer Energien betreffend, die wesentlich für eine funktionierende CCU-Wirtschaft sind, kommt es auch immer wieder zum sogenannten NIMBY-Effekt ("Not In My Back Yard"). Dieser Effekt beschreibt das Verhalten von Menschen, die zwar prinzipiell für bestimmte Entwicklungen, wie den Ausbau erneuerbarer Energien sind, aber nicht in ihrer direkten Nachbarschaft.

Ein weiterer kritisch betrachteter Aspekt ist die Elektrolyse von Wasserstoff, als notwendiger zusätzlicher Rohstoff für die CO₂-Nutzung, aber natürlich auch als Energieträger generell. Für die Herstellung von 1 kg H₂ benötigt man ca. 10 L Wasser, was sich im ersten Moment, für die Gesellschaft, viel anhört und somit Bedenken entstehen, dass somit irgendwann unser wertvolles Trinkwasser nicht ausreicht, wenn damit flächendeckend H₂ hergestellt werden soll. Diese Bedenken sind aber keineswegs gerechtfertigt und sind in Unwissenheit und vielleicht auch zu wenig verfügbare und einfach verständliche Informationen und Transparenz zurückzuführen. Die Initiative GetH₂ (<https://www.get-h2.de>) hat zu diesem Thema ein

Factsheet veröffentlicht. Für die bis 2030 in Deutschland geplanten 10 GW Elektrolyseleistung bräuchte man jährlich 7,6 Millionen m³ Wasser. Laut statistischem Bundesamt stehen in Deutschland jährlich 176 Milliarden m³ Wasser zur Verfügung, davon genutzt werden rund 14 %. Die für die Wasserstoff-Elektrolyse notwendigen 7,6 Millionen m³ würden diesen Verbrauch also nur um 0,35 % ansteigen lassen. Ein letzter Punkt ist die zunächst einmal unvermeidbare Kostensteigerung CO₂-basierter Technologien und auch Produkte, wobei letzteres natürlich dann auch auf den Verbraucher umgelegt wird.

Wie zu Beginn erläutert handelt es sich hier nur um die Darstellung der häufigsten Stich- und Schwerpunkte in Bezug auf die gesellschaftliche Akzeptanz von CCU. Obwohl die Bedenken teilweise, zum Beispiel die Kostensteigerung, berechtigt sind, sind die meisten Bedenken begründet auf genereller Unwissenheit, fehlender, unvollständiger oder missverständlicher Informationen. Welcher man mit entsprechenden Maßnahmen eventuell Abhilfe schaffen könnte (siehe Kapitel 5.5).

5.4 Kompetenzrelevante Rahmenbedingungen

Während die vorherigen Rahmenbedingungen eher genereller Natur sind, sind die kompetenzrelevanten Rahmenbedingungen sehr spezifisch auf das Land Baden-Württemberg ausgerichtet. Hier geht es um den Einfluss und die Kompetenz die das Land Baden-Württemberg hat, um CCU zu etablieren und zu fördern und welche Expertise, Fördermechanismen und Instrumente das Land Baden-Württemberg im Bereich CCU hat.

Status Quo in Baden-Württemberg

Das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft hat die Kompetenz auf Landesrecht-Ebene Einfluss auf Fördermechanismen für die Etablierung von CCU in Baden-Württemberg zu nehmen.

Zurzeit gibt es die Umwelttechnik Baden-Württemberg als Kompetenzzentrum für CCU. Hier ist die Stelle für Carbon Management und der Innovation Hub CCUBio, verantwortlich für den Netzwerk und Stakeholder-Aufbau im Bereich CCU, angesiedelt. Experten und Technologien für Ressourceneffizienz und Klimaschutz sind im Experten- und Technologieatlas BW verzeichnet, allerdings keine explizite CCU-Ausweisung. Des Weiteren gibt es den ThinkTank Industrielle Ressourcenstrategien, der als gemeinsame Initiative von Industrie und Politik mit Unterstützung der Wissenschaft gegründet wurde. Die Landesregierung Baden-Württemberg hat wissenschaftliche Grundlagen und zukünftige Strategien im Bereich CCU durch vorangegangene verschiedene Studien und Positionspapiere geschaffen:

- Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, 2020: Machbarkeitsstudie zur Erzeugung von synthetischem Kerosin aus Zementwerk-Abgasen – CO₂ als Rohstoff für reFuels (durchgeführt im Rahmen des Projekts „reFuels-Kraftstoffe neu denken“).
- Fraunhofer ISI, 2021: Technologie- und Marktstudie: Übersicht über Technologien zur bioinspirierten CO₂-Fixierung und –Nutzung sowie der Akteure in Baden-Württemberg (durchgeführt im Rahmen des Programms „BWPLUS – Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“)
- Umwelttechnik BW, 2022: Machbarkeitsstudie im Themenfeld Carbon Economy: Modulare Abgas-Raffinerie mit biologischen und hybriden Technologien mit Schwerpunkt auf CO₂-Recycling aus CO₂-Punktquellen

- Umwelttechnik BW, 2024: Rechtsgutachten Biotechnologische CO₂-Nutzung
- Landesregierung Baden-Württemberg, 2024: Positionspapier der Landesregierung Baden-Württemberg zu Carbon Management

Des Weiteren gibt es entsprechende Zuständigkeiten und Kompetenzen im Bereich CCU im Ministerium Umwelt, Klima und Energiewirtschaft. In Abteilung 2: Klima, Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz, Kreislaufwirtschaft gibt es das Referat 21: Grundsatzfragen Klimaschutz, Monitoring und das Referat 24: Ressourceneffizienz, Green Tech, Bioökonomie.

Ebenfalls gibt es verschiedene Fördermechanismen und Initiativen im Bereich CCU unter Mitwirkung des Ministeriums Umwelt, Klima und Energiewirtschaft:

- Innovation Hub CCUBio (2021-2024)
- ThinkTank Industrielle Ressourcenstrategien
- EFRE-Förderprogramm „Förderung von Demonstrations- und Pilotanlagen zum biologischen Rohstoff – und CO₂-Recycling (XCUBio und CCUBio) aus Gasmischungen und Abgas“
- GreenTech BW
- Ressourceneffizienz – und Kreislaufwirtschaftskongress BW
- Umwelttechnikpreis BW

5.5 Handlungsoptionen und Empfehlungen

Basierend auf den in Kapitel 5.1 bis 5.4 dargestellten Rahmenbedingungen werde im folgenden nun Handlungsoptionen und Empfehlungen dargestellt. Teilweise handelt es sich hierbei nicht direkt um explizite Handlungsempfehlungen, sondern eher um Themen und Fragestellungen, die für die Etablierung von CCU in Baden-Württemberg grundlegend und ausschlaggebend sind, und deswegen betrachtet werden müssen. Diese Handlungsoptionen, Empfehlungen und Fragestellungen sind gemäß den zuvor vorgestellten Rahmenbedingungen in technologisch, politisch / rechtlich und kompetenzrelevant gegliedert. Marktbezogene Handlungsoptionen und Empfehlungen wurden hier nicht formuliert, da diese nicht direkt von der Landesregierung beeinflusst werden können, außer natürlich durch entsprechende Forschungs- und Investitionsförderung, die hier unter kompetenzrelevante Handlungsoptionen und Empfehlungen fallen. Teilweise gibt es zwischen den einzelnen Handlungsoptionen und Empfehlungen auch Überschneidungen, aber durch die unterschiedlichen Betrachtungspunkte (z. B. technologisch oder politisch / rechtlich) wurden diese nicht zusammengefasst.

Technologische Handlungsoptionen und Empfehlungen

- 1) Eine konsistente und konsequent verfolgbare Strategie zur Sicherung von genügend erneuerbaren Energien und Wasserstoff für die chemische Industrie, Automobil und Energiewirtschaft ist notwendig.
 - Wie ist der Stand der erneuerbaren Energien in BW? Wieviel wird für die einzelnen Sektoren/Industrien benötigt?
 - Aufbau großer Batteriespeicher, um preiswerte erneuerbare Energien über größere Zeiträume

und große Fluktuationen anbieten zu können.

- Wie hoch ist die Kapazität für erneuerbaren Wasserstoff? Wieviel wird für die chemische Industrie benötigt? Wieviel soll in den Sektor Verkehr / Mobilität fließen?
→ Wasserstoff Roadmap Baden-Württemberg, wurden die Ziele, anders als die der EU, erreicht?
- 2) Eine H₂-Infrastruktur muss etabliert werden.
- Was wurde aus dem Projekt „Wasserstofftechnologien am südlichen Oberrhein – H₂-SO“ (<https://h2-so.de>)?
 - Derzeit läuft die nationale Etablierung des Wasserstoffkernnetzes, Baden-Württemberg geht als eines der letzten Bundesländer ans Netz.
 - Sind zum Übergang andere Wege der Logistik, Transportwege und Bereitstellung von Wasserstoff geplant?
- 3) Eine CO₂-Infrastruktur muss etabliert werden.
- Teil der Carbon Management Strategie
 - Wird bei der Etablierung der CO₂-Infrastruktur deutschlandweit, so vorgegangen wie beim Wasserstoffkernnetz? Zeitlich gestaffelt und von Norden nach Süden?
 - Vor allem Umwandlungstechnologien, bei denen CO₂ in verwertbare Zwischenprodukte wie Methanol oder Synthesegas / Naphtha / Ethanol umgewandelt wird, müssen priorisiert werden, um die Lücke der Wertschöpfungskette zwischen Abscheidung und Endprodukten zu schliessen.
- 4) Gleichwertige Förderung und Relevanz der chemischen sowie auch biotechnologischen CO₂-Umwandlung
- Elektrochemie als neue Prozesstechnologie zur nachhaltigen Produktion ohne Cracker. Gerade hoch spannend für CCU. Das könnte auch ein Schwerpunkt der Technologieentwicklung und Implementierung werden.
 - Produktion von *Sustainable Aviation Fuels* (SAF), da es hier eine große Marktnachfrage geben wird.

Politische / Rechtliche Handlungsoptionen und Empfehlungen

- 5) Eine Interessensvertretung in EU und Bund wird benötigt.
- CCU braucht starke politische Unterstützung über die Landesebene hinaus. Geeignete Positionen finden sich beispielsweise bei der Renewable Carbon Initiative (RCI) und dem Verband CO₂Value Europe.
- 6) Den Fokus auf den Ausbau der Infrastruktur für Abscheidung und Transport setzen.
- In Abstimmung mit Bund und Ländern (z. B. über die Arbeitskreise Industrie (AKI) und Umwelt (AKU) der Wirtschaftsministerkonferenz) Bedarfe und konkrete Ausbaumaßnahmen festlegen. Eine finanzielle Beteiligung des Landes an der Transportinfrastruktur sollte geprüft werden.
 - Die Zertifizierung von CO₂-Stoffströmen in Baden-Württemberg muss ermöglicht werden.

Notwendig sind klare Rahmenbedingungen für die Zertifizierung der betreffenden Stoffströme sowie ein Bilanzierungssystem, das die Nachverfolgung von Quelle, Transport und die Nutzung großer Mengen CO₂ erlaubt. Haftungsfragen für Leckagen sind zu berücksichtigen.

- Gewährleistung schneller und einheitlicher Genehmigungsverfahren für den Bau und Betrieb von Anlagen zur Produktion von erneuerbarer Energie, grünem Wasserstoff, Abscheidungsanlagen und Logistikinfrastruktur. Der anzuwendende übergeordnete Rechtsrahmen ist klarzustellen, unter welchem genehmigungsrelevante Prozesse zusammengefasst werden können¹⁶.
- 7) Unterstützende Maßnahmen für den Marktaufbau.
- Die zusätzlichen Möglichkeiten zur staatlichen Förderung investiver Maßnahmen im Rahmen des NZIA (Net-Zero Acceleration Valleys), CISAF (CO₂-Mineralisierung, CO₂-basierte Kraftstoffe) oder durch ein IPCEI Projekt sollten geprüft und ausgereizt werden.
 - Die Gleichstellung von CCU mit anderen Formen von Carbon Management (z. B. CCS, naturbasierten Lösungen) auf rechtlicher und strategischer Ebene und in der Förderlandschaft muss gewährleistet sein.
 - Die lokale Nachfrage für CCU-Produkte kann auf Landesebene beispielsweise durch Programme der öffentlichen Beschaffung im Bausektor auf Landes- und Kommunalebene gestärkt werden.
 - Förderung der Abnehmerstrukturen bsp. für CO₂-basierte Flugtreibstoffe und Chemikalien. Hier könnte es bsp. gezielte Förderung von Flughäfen und Transportunternehmen geben.
 - Resiliente Versorgung des Militärs mit Treibstoffen, Diesel und Kerosin.
- 8) CCU als tragende Säule von Industriepolitik verankern.
- CCU muss als Kernelement in industriepolitischen Entscheidungen fest verankert sein, beispielweise mit konkreten Maßnahmen in der Carbon Management Strategie. CO₂ muss als wichtiger Rohstoff für die Industrie klar benannt werden.
 - Aufklärung und Dialog stärken. Das Wissen um die Rolle und Möglichkeiten von CCU sind in Bevölkerung und Wirtschaft ausbaufähig. Zur Stärkung der Akzeptanz bieten sich Maßnahmen wie fortlaufende Stakeholderdialoge, insbesondere mit Industrie und Forschung an.

Kompetenzrelevante Handlungsoptionen und Empfehlungen

CCU als Begriff, Technologie und Konzept ist ein Konglomerat aus verschiedenen einzelnen Prozessen, Umwandlungsmöglichkeiten und Produkten. Diesem liegen verschiedene technologische Konzepte und weitere angrenzende / abhängige Technologien (erneuerbare Energien und Wasserstoffproduktion) zugrunde. Diese wiederum sind von verschiedenen politischen / rechtlichen Rahmenbedingungen abhängig. Somit fällt CCU unter (und ist abhängig von) verschiedenen Maßnahmen im Klima-Maßnahmen-Register Baden-Württemberg, in verschiedenen Sektoren und so in die Zuständigkeit verschiedener Ministerien in Baden-Württemberg.

- 9) Enge Abstimmung und Zusammenarbeit zum Thema CCU zwischen den einzelnen, verantwortlichen Ministerien.

¹⁶ für detaillierte Ansätze, siehe Empfehlungen Umwelttechnik BW GmbH (2024): Rechtsgutachten Biotechnologische CO₂-Nutzung

- Gibt es Austausche zwischen den einzelnen Ministerien zu verschiedenen Studien, Stakeholdern, Fördermechanismen?
 - Gibt es vielleicht eine Ministerien-übergreifende Arbeitsgruppe CCU?
 - Gibt es eine interne Informationsplattform, die alles rund um CCU und angrenzende Technologien und Maßnahmen bündelt?
- 10) Etablierung eines CCU-Netzwerks / Stakeholderaufbau.
- Nutzung, Erweiterung der Carbon Management Geschäftsstelle der Umwelttechnik BW
 - Involvierung von allen Akteuren entlang der CCU-Wertschöpfungskette: CO₂-Emittenten, CO₂-Abscheidung, Wasserstoffbereitstellung, erneuerbare Energien, CO₂-Umwandlung (chemisch und biotechnologisch), Produktabnehmer.
 - Regelmäßige Netzwerktreffen CCU etablieren, Akteure oder interessierte Stakeholder sind intern gelistet, gibt es hier schon nicht-öffentliche Netzwerktreffen? Keine spezifischen Veranstaltungen zum Thema Carbon Management sind auf der Webseite gelistet.
- 11) Etablierung eines CCU-Informationsnetzwerk / Wissenstransfer / "Aufklärung".
- Nutzung, Erweiterung der Carbon Management Geschäftsstelle der Umwelttechnik BW
 - Informationsveranstaltungen für Akteure aber auch Bevölkerung: Workshops, Webinare, Informationsblätter: CCU-Technologien, politische / rechtliche Rahmenbedingungen, Fördermechanismen
 - Leitfaden Biotechnologisches CO₂-Recycling
 - Rechtsgutachten Biotechnologisches CO₂-Recycling
 → Beide Dokumente sollten auf der Carbon Management-Seite verlinkt sein
- 12) „Offenere“ CCU-Darstellung / Wahrnehmung und Förderung
- Offenere Gestaltung des Themas CCU in der Förderung und in Informationsbereitstellung wäre von Vorteil.
 - Derzeit starker Fokus auf biotechnologischer CO₂-Nutzung was aktuelle Förderung und veröffentlichte vorangegangene Studien, Leitfäden und Rechtsgutachten angeht.
 - Neben Förderung von Forschung und Entwicklung auch Förderung / Unterstützung von Investitionen in Form von Investitionspaketen, Investitionsbeihilfen oder Steuersenkungen.

6 Fazit

Ziel der vorliegende Studie war eine Analyse des Potenzials zur Umsetzung von *Carbon Capture & Utilisation* (CCU) in Baden-Württemberg. Dazu wurden verschiedene relevante Teilaspekte für die initiale und dauerhaft erfolgreiche Implementierung von CCU in Baden-Württemberg betrachtet: 1) Welche CO₂ Quellen stehen in Baden-Württemberg zur Verfügung? 2) Welche technologischen Konzepte zur Nutzung und Umwandlung von CO₂ gibt es? 3) Welche schon aktiven und potentiellen CCU-Akteure gibt es in Baden-

Württemberg und welche CCU-Wertschöpfungsketten können etabliert werden? und 4) Welche Rahmenbedingungen gibt es und welche Handlungsempfehlungen resultieren daraus?

Generell besteht hohes Potenzial in Baden-Württemberg für die Implementierung von CCU. Große Mengen an CO₂, vollständig biogen, teilbiogen und fossil sind verfügbar. Ebenfalls sind in Baden-Württemberg Anbieter für die vielversprechendsten technologischen Konzepte ansässig, sowie eine Vielzahl von bereits CCU-aktiven Unternehmen und potentiellen CCU-Akteuren.

Generelle Handlungsoptionen und Empfehlungen für eine Etablierung und ein Voranbringen von CCU in Baden-Württemberg sind detailliert in Kapitel 5.5 beschrieben. Im folgenden werden deshalb Ergebnisse aus der Analyse herausgearbeitet die relevant für die Entwicklung einer CO₂-Modellregion sind.

Identifizierte CO₂-Quellen in Baden-Württemberg

Die gesamten betrachteten, voraussichtlich langfristig verfügbaren CO₂-Emissionen in Baden-Württemberg belaufen sich auf rund 11 Millionen Tonnen, verteilt auf 196 emittierende Anlagen. 2,6 Millionen Tonnen sind als biogene Emissionen ausgewiesen, wobei die tatsächliche biogene Gesamt-CO₂-Menge höher liegen kann, da nicht für alle CO₂-Quellen und Anlagen Daten verfügbar sind.

Die höchsten Gesamt-CO₂-Emissionen stammen aus der Verarbeitung/Herstellung von nicht-metallischen Mineralien (Zementwerke, Kalk, Glasherstellung) mit 3,5 Millionen Tonnen. Biomassekraftwerke mit der höchsten Anzahl an Einzelanlagen (77) emittieren 1,4 Millionen Tonnen Gesamt-CO₂, die nahezu 100 % biogen sind und Biogas- und Biomethaneinspeiseanlagen, mit der zweithöchsten Anzahl an Einzelanlagen (55, ohne Hofbiogasanlagen), emittieren knapp 160.000 Tonnen 100 % biogenes CO₂. Aufgrund der flächendeckenden und großen Anzahl von Anlagen zur Biogas- und Biomethanproduktion (Kapitel 2.5, Abbildung 4) und Biomassekraftwerken (Kapitel 2.6, Abbildung 5), sowie dem großen emittierten CO₂-Volumen von Zementwerken und der kalkverarbeitenden Industrie (Nicht-metallische Mineralien, Kapitel 2.9, Abbildung 8) bieten diese drei Industriezweige das derzeit größte Potenzial, um als CO₂-Quelle zu dienen.

Auch wenn der Prozess der Kohlenstoff- und Kohlenstoffdioxidabscheidung nicht Gegenstand der vorliegenden Analyse war, ist dies doch ein Aspekt, der bei der Auswahl der CO₂-Quellen berücksichtigt werden sollte. Was die effiziente Abscheidung aus den oben genannten Quellen betrifft, haben Biogas- und Biomethaneinspeiseanlagen einen Vorteil gegenüber den anderen beiden Quellen. Biogas besteht lediglich aus zwei Bestandteilen, CO₂ und Methan (CH₄), und enthält keine weiteren Komponenten, die entfernt werden müssen. Die Konzentration des CO₂ im Biogas ist mit 30-40 % sehr hoch im Gegensatz zu anderen industriellen Punktquellen und der Direktabscheidung aus der Umgebungsluft (Direct Air Capture). Das spricht für eine effizientere sowie auch kostengünstigere CO₂-Abscheidung im Vergleich zur Abscheidung von anderen Quellen. Im Allgemeinen spricht man davon, dass je höher die CO₂-Konzentration und je geringer der Anteil an weiteren Komponenten ist, desto geringer der Preis für die Tonne abgeschiedenes CO₂ ist. Des Weiteren sind viele der Biogasanlagen, wenn Bestandteil einer Biomethaneinspeiseanlage, grundsätzlich mit einem CO₂-Abscheidungsprozess ausgestattet, um dieses aus dem Gas zu entfernen und reines Biomethan ins Gasnetz einspeisen zu können.

Zudem ist ein hohes Interesse an einer Implementierung von CCU in Baden-Württemberg von Stakeholdern aus den oben genannten Industrien vorhanden und eine Beteiligung an dieser Umsetzung gewünscht. Das wurde u.a. durch die Teilnahme von MVV Umwelt GmbH, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Holcim (Süddeutschland) GmbH, sowie SCHAEFER KALK GmbH & Co. KG am Stakeholderworkshop sowie deren bisherigen Aktivitäten zur CO₂-Abscheidung deutlich.

Technologische Konzepte und Akteure

Die technologischen Konzepte wurden anhand eines Bewertungsschemas bewertet, welches sieben zentrale Indikatoren für eine Implementierung beinhaltet. Dadurch konnte den einzelnen technologischen Konzepten pro Indikator eine Punktzahl zugeordnet werden (Kapitel 4.4). Das hier genutzte Schema beinhaltet keine ökonomischen Aspekte oder Nachhaltigkeitsindikatoren, sondern betrachtet und bewertet die Technologie selbst anhand ihres Entwicklungsstandes sowie deren Einbindung in (potenziellen) Wertschöpfungsketten mit schon aktiven oder potentiellen CCU-Akteuren.

Aufgrund der in diesem Bewertungssystem erreichten Punktzahl wurden die folgenden drei technologischen Konzepte als solche mit dem derzeit größten Potenzial für Baden-Württemberg eingestuft: 1) Fischer-Tropsch Synthese mit der höchsten Punktzahl, 2) die Hydrierung auf dem zweiten Platz und als biotechnologisches Umwandlungskonzept 3) das acetogene Bakteriensystem. Die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen in Form von nachhaltig produzierten Kerosin für den Flugverkehr und Methanol als Kraftstoff für den Schiffverkehr stoßen derzeit weltweit auf großes Interesse und auch die Herstellung von Ethanol mit einem acetogenen Bakteriensystem und einen darauffolgenden Upgrade zum Flugtreibstoff ist begehrt. Zudem ist es auch möglich, Methanol sowie Ethanol und Naphtha aus der Fischer-Tropsch Synthese, je nach Prozessbedingungen, als Rohstoff in der chemischen Industrie zu nutzen (siehe Wertschöpfungsketten 1, 3, und 5, Kapitel 4.2.1, 4.2.3, 4.2.5). Die Herstellung von Kohlenwasserstoffen mittels Fischer-Tropsch Synthese zeigt bis 2029/2030 eine erwartete Wachstumsrate von 107 %, gefolgt von Methanol mit 104 % und Ethanol mit 28 %. Technologieanbieter für die Fischer-Tropsch Synthese und die Hydrierung von CO₂ zu Methanol sind mit Ineratec (Fischer-Tropsch Synthese) und ICODOS GmbH (Methanolsynthese) ebenfalls in Baden-Württemberg ansässig. Letztere war auch Teilnehmer des Stakeholder-Workshops und ist generell interessiert an einer Etablierung von CCU in Baden-Württemberg. Was das acetogene Bakteriensystem betrifft, so ist der Vorreiter dieser Technologie das amerikanische Unternehmen LanzaTech, welches, auch wenn nicht ansässig in Baden-Württemberg, als Technologieanbieter hinzugezogen werden könnte. Als lokale Anbieter oder akademische Partner kämen gegebenenfalls die Universitäten Ulm und Tübingen in Frage, die sich mit acetogenen Bakterien beschäftigen.

Handlungsoptionen und Empfehlungen für eine CO₂-Modellregion

Eine CO₂-Modellregion könnte sich an den oben genannten CO₂-Quellen Biogas- und Biomethaneinspeiseanlagen, Biomassekraftwerke und Zementwerke orientieren. Die vielversprechenden Technologien Fischer-Tropsch Synthese, Hydrierung zu Methanol und die biotechnologische Herstellung von Ethanol können eventuell in Form modularer Anlagen an den Standorten der CO₂-Quellen etabliert werden. Um die Möglichkeit einer solchen Modellregionen zu erörtern und zu diskutieren, sollte das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, wenn so gewünscht, mit den entsprechenden Akteuren und Interessenten in einen gezielten Dialog treten. So kann gemeinsam entschieden werden, inwieweit und unter welchen Bedingungen die Umsetzung einer solchen, ersten CO₂-Modellregion in Baden-Württemberg möglich ist.