



DECHEMA

Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.

STUDIE

Verfahren zur klimaneutralen Bereitstellung und Verarbeitung von Kohlenstoff für die Herstellung von chemischen Grundstoffen

Die Studie wurde für das Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft (ESYS) II“ erstellt, welches durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert wurde.



Januar 2026



Alternative Kohlenstoffquellen für Grundstoffe

Impressum

Herausgeber



DEHEMA

Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main

Telefon (069) 75 64-0
info@dechema.de
www.dechema.de

Autor:innen

Dr. Marcel Dorf
Angee Fehling
Johanna Gassenheimer
Dennis Krämer
Dr. Michaela Löffler

Ansprechpartner:innen

Dennis Krämer
dennis.kraemer@dechema.de

Dr. Michaela Löffler
michaela.loeffler@dechema.de

ISBN-Nummer:

978-3-89746-257-1

Foto:

Titelseite AdobeStock.com

Verfasst im Auftrag des: Akademienprojektes „Energiesysteme der Zukunft II“ (ESYS). Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 03EDZ2016 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor:innen.

Frankfurt, 2026



Inhaltsverzeichnis

Executive Summary

1. Hintergrund

- 1.1. Globaler Kohlenstoffkreislauf
- 1.2. Konzepte im Umgang mit Kohlenstoff
- 1.3. Regulatorische Entwicklungen im Umgang mit Kohlenstoff

2. Petro-chemische Wertschöpfungsketten

- 2.1. Produktion von Grundchemikalien
- 2.2. Produktionsprozesse zentraler (petro-)chemischer Grundstoffe
- 2.3. Aktuelle Kohlenstoffbedarfe der chemischen Industrie

3. Alternative Kohlenstoffquellen

- 3.1. Biomasse
- 3.2. Kunststoffabfälle
- 3.3. CO₂ als Kohlenstoffquelle
- 3.4. Gegenüberstellung und Bewertung alternativer Kohlenstoffquellen

4. Vom Synthesegas zu Grundchemikalien - der Einstieg in die chemische Wertschöpfung

- 4.1. Methanolsynthese
- 4.2. Fischer-Tropsch-Synthese
- 4.3. Harnstoffproduktion

5. Künftige Entwicklungen - Szenarien zur Kohlenstoffnutzung

- 5.1. Rahmenbedingungen und allgemeine Annahmen
- 5.2. Szenarien zur Bereitstellung alternativer Kohlenstoffquellen für die chemische Industrie
- 5.3. Einordnung der Szenarien und weiterführende Überlegungen

6. Fazit

7. Literaturverzeichnis

Anhang I – Technologiesteckbriefe

- I.a. Biomasse
- I.b. Chemisches Recycling
- I.c. CO₂-Nutzung

Anhang II – Fördermaßnahmen

- II.a Fördermaßnahmen der EU
- II.b. Fördermaßnahmen in Deutschland

Anhang III – Forschung und Entwicklung

- III.a. Technologiereifegrad
- III.b. Forschung und Entwicklung: (chemisches) Recycling
- III.c. Forschung und Entwicklung: Biomassenutzung
- III.d. Forschung und Entwicklung: CCU

Anhang IV – Ableitung des Rohstoffbedarfs an Kohlenstoff für die Herstellung von petrochemischen Grundchemikalien der deutschen chemischen Industrie



Abkürzungsverzeichnis

Allgemeine Begriffe

| | |
|----------|--|
| ASU | Luftzerlegungsanlage (engl.: air separation unit) |
| BEHG | Brennstoffemissionshandelsgesetz |
| CDR | Kohlenstoffdioxid Entnahme (engl.: carbon dioxide removal) |
| Cefic | Verband der europäischen Chemieindustrie |
| CMS | Kohlenstoffmanagement Strategie (engl.: carbon management strategy) |
| CCS | CO ₂ -Abscheidung und Speicherung (engl.: carbon dioxide capture and storage) |
| CCU | CO ₂ -Abscheidung und Nutzung (engl.: carbon dioxide capture and utilization) |
| CCUS | CO ₂ -Abscheidung, Nutzung und Speicherung (engl.: carbon dioxide capture, utilization and storage) |
| DAC | Direkte Abtrennung von CO ₂ aus der Luft (engl.: direct air capture) |
| DOC | Direkte Abscheidung von CO ₂ aus Meerwasser (engl.: direct ocean capture) |
| EU | Europäische Union |
| EU-ETS | Emissionshandelssystem der EU (engl.: EU emissions trading system) |
| EU-ETS 2 | 2. Emissionshandelssystem der EU für Gebäude und Verkehr |
| EuGH | Gerichtshof der Europäischen Union |
| FM | Frischmasse |
| FT | Fischer-Tropsch-Verfahren |
| KSG | Bundes-Klimaschutz Gesetz |
| KSpG | Kohlendioxid-Speicherungsgesetz |
| KSpTG | Kohlendioxid-Speicherungs- und Transportgesetz |
| KUP | Kurzumtriebsplantagen |
| LCA | Ökobilanz, Lebenszyklusanalyse (engl.: life cycle assessment) |
| NZIA | Netto-Null-Industrie-Verordnung (engl.: net zero industry act) |
| MRV | Überwachen, Berichten und Prüfen (engl.: monitoring, reporting, verification) |
| PSA | Druckwechseladsorption (engl.: pressure swing adsorption) |
| RED | Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU (engl.: renewable energy directive) |
| RCF | Wiederverwertete kohlenstoffhaltige Kraftstoffe (engl.: recycled carbon fuels) |
| RFNBO | Erneuerbare Kraftstoffe nicht-biologischen Ursprungs (engl.: renewable fuels of non-biological origin) |
| rWGS | Reverse Wassergas-Shift-Reaktion (engl.: reverse water-gas-shift) |
| SMR | Erdgasdampfreformierung (engl.: steam methane reforming) |
| THG | Treibhausgas(e) |
| TM | Trockenmasse |
| TRL | Technologiereifegrad (engl.: technology readiness level) |
| TSA | Temperaturwechseladsorption (engl.: temperature swing adsorption) |
| TVSA | Temperatur-Vakuum-Wechseladsorption (engl.: temperature vacuum swing adsorption) |
| UNFCCC | Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (engl.: United Nations Framework Convention on Climate Change) |



Einheiten und deren Größenordnung

| | |
|--------|------------------|
| a | Jahr |
| g | Gramm |
| Gew.-% | Gewichtsprozent |
| M | Molare Masse |
| mol | Mol (Stoffmenge) |
| t | Tonne |

Präfixe

| | |
|---|----------------------------|
| k | Kilo: Tausend (10^3) |
| M | Mega: Million (10^6) |
| G | Giga: Milliarde (10^9) |

Chemische Verbindungen und Mineralien

| | |
|------------------------|--|
| ABS | Acrylnitril-Butadien-Styrol |
| C | Kohlenstoff |
| CaCO_3 | Calciumkarbonat, Kalkstein bildendes Mineral |
| CaO | Calciumoxid, auch Branntkalk genannt |
| CH_3OH | Methanol |
| CH_4 | Methan |
| CO | Kohlenstoffmonoxid |
| CO_2 | Kohlenstoffdioxid |
| H | Wasserstoff |
| H_2 | Molekularer Wasserstoff |
| H_2O | Wasser |
| NH_3 | Ammoniak |
| N_2O | Distickstoffmonoxid, Lachgas |
| NO_x | Stickoxide |
| O | Sauerstoff |
| O_2 | Molekularer Sauerstoff |
| PA | Polyamid |
| PC | Polycarbonat |
| PE | Polyethylen |
| PET | Polyethylenterephthalat |
| PS | Polystyrol |
| PVC | Polyvinylchlorid |
| SAN | Styrol-Acrylnitril |



Executive Summary

Alltägliche Produkte wie zum Beispiel Kunststoffe, Farben, Lösemittel, Kosmetika und pharmazeutische Erzeugnisse werden derzeit zum größten Teil aus den fossilen Rohstoffen Mineralöl und Erdgas hergestellt. Der darin gebundene Kohlenstoff wird am Ende des Lebensweges der Produkte meist in Form des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid (CO_2) emittiert. Als Konsequenz aus den Klimaschutzzielen in Deutschland und der Europäischen Union hin zur Klimaneutralität kann die Nutzung von fossilen Rohstoffen in dieser Weise nicht weitergeführt werden. Vor diesem Hintergrund zeigt die vorliegende Studie Möglichkeiten auf, wie die Integration von alternativen Kohlenstoffquellen wie Biomasse, Kunststoffabfälle und CO_2 in die vorhandenen Wertschöpfungsketten der chemischen Industrie dazu führen kann, zukünftig auf fossile Rohstoffe als Kohlenstofflieferant zu verzichten. Um zu verstehen, wie alternative Kohlenstoffquellen integriert werden können, wird zunächst skizziert, über welche Pfade und Zwischenprodukte fossile Rohstoffe in die Endprodukte gelangen. Daraus wird ersichtlich, dass die Grundchemikalien Ethylen, Propylen, C_4 -Produkte (u.a. Butene), Benzol, Toluol, Xylol, Methanol und Harnstoff am Anfang der Wertschöpfungskette vieler Produkte stehen und aus diesen nahezu alle kohlenstoffhaltigen Produkte der chemischen Industrie synthetisiert werden können. Ammoniak ist eine weitere wichtige Grundchemikalie, die zwar keinen Kohlenstoff enthält, für deren Produktion allerdings momentan fossiles Methan genutzt wird. Gelingt es, diese Produkte komplett auf Basis von Biomasse, Kunststoffabfällen und CO_2 herzustellen, kann die Produktion rohstoffseitig klimaneutral werden.

Insgesamt beinhalten die oben genannten Grundchemikalien bezogen auf die Produktionsmenge von 2023 10 Millionen Tonnen Kohlenstoff (Mt C) in Deutschland und 31 Mt C in der EU. Anhand dieser Produktionsmengen und der Berechnung des Kohlenstoffgehalts wird bestimmt, wie viel Kohlenstoff aus alternativen Quellen in Deutschland und der Europäischen Union zukünftig benötigt wird, und ob die verfügbaren Mengen ausreichend sind, um vollumfänglich auf fossile Rohstoffe verzichten zu können. Darauf basierend wird die Frage diskutiert, wie sich die Produktionsmengen, sowie die Nutzung und Etablierung der alternativen Kohlenstoffquellen, ausgehend von 2023, bis zur angestrebten Klimaneutralität in Deutschland in 2045 und in der EU in 2050, entwickeln werden.

Das ermittelte theoretisch nutzbare Potenzial von Kohlenstoff aus Biomasse ist mit 14 Mt C pro Jahr (Mt Kohlenstoff pro Jahr) in Deutschland und 72 Mt Kohlenstoff pro Jahr in der EU sehr groß, unterliegt jedoch auch großem Konkurrenzdruck durch andere Industrien. Im Gegensatz dazu ist das theoretische Potenzial von Kunststoffabfällen derzeit gering. In Deutschland könnten ca. 2 Mt Kohlenstoff pro Jahr aus Kunststoffabfällen genutzt werden, in der EU ca. 5 Mt Kohlenstoff pro Jahr.

Abgesehen von aus der Atmosphäre abgeschiedenem CO_2 als Kohlenstofflieferant wurde das theoretische Potenzial von industriellen CO_2 -Quellen betrachtet, die auch zukünftig zur Verfügung stehen. So sind, unter anderem durch die mineralverarbeitende Industrie, in Deutschland ca. 13 Mt Kohlenstoff pro Jahr und ca. 123 Mt Kohlenstoff pro Jahr in der EU vorhanden.

Um zu erfassen, wie die Nutzung von alternativen Kohlenstoffquellen den vorhandenen Bedarf decken kann, wird der Stand der Technik der relevantesten Verfahren zu deren Nutzung für die Produktion von Grundchemikalien betrachtet. Dabei zeigt sich, dass nur wenige Prozesse bereits jetzt eine hohe technologische Reife erreicht haben. Im Fall von Biomasse und dem chemischen Recycling von Kunststoffen eignen sich besonders thermochemische Umwandlungsverfahren wie Pyrolyse und Vergasung. Dabei entstehen wiederverwendbare chemische Ausgangsstoffe – Monomere, Synthesegas oder Pyrolyseöle –, die als Grundchemikalien in die chemische Wertschöpfungskette eingeführt werden können.

Im Fall von CO_2 -Nutzung müssen die stabilen CO_2 -Moleküle zunächst durch die reverse Watergas-Shift Reaktion zu Kohlenstoffmonoxid (CO) mit H_2 reduziert werden. Ein Gasgemisch aus überwiegend CO und H_2 , meist als Synthesegas bezeichnet, stellt eine zentrale Zwischenstufe für die Herstellung verschiedenster Kohlenwasserstoffe, wie Olefine, Aromaten oder Kraft- und Brennstoffe, dar. Auch die direkte CO_2 -basierte Methanolsynthese ist ein weiterer vielversprechender Prozess, um CO_2 als alternative Kohlenstoffquelle für die chemische Industrie einzusetzen. Dabei ist kein Zwischenschritt über CO nötig.

Mit diesen Verfahren ist prinzipiell der Grundstein gelegt, damit alternative Kohlenstoffquellen fossile Rohstoffe ersetzen und ein Großteil der Wertschöpfungskette der chemischen Industrie intakt bleiben kann. Jedoch ist bisher keine der genannten Technologien in einem industriell relevanten Maßstab umgesetzt. Es existieren einige erste Anlagen, die gerade über die Größenordnung einer Demonstration hinaus gehen. Aktuell sind die alternativen Prozesse zur Erzeugung von Grundchemikalien noch deutlich teurer als konventionelle, auf fossilen Rohstoffen basierende Prozesse.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wird untersucht, wie sich diese Technologien hinsichtlich ihrer technologischen Reife, Ska-



lierung und Wirtschaftlichkeit entwickeln müssen, um in der Zukunft eine relevante Rolle zur Deckung des Kohlenstoffbedarfs der chemischen Industrie zu spielen. Dazu wurde ein Szenario zur Integration der alternativen Kohlenstoffquellen und die zeitliche Entwicklung in Deutschland und der EU entwickelt. Basierend auf dem Stand der Technik und den unterschiedlichen Hürden zur Nutzung der alternativen Kohlenstoffquellen werden im Szenario sogenannte Durchdringungsraten für die Nutzung von Biomasse, Kunststoffabfällen und CO₂ bis 2035 und 2045/2050 angenommen. Dies ist ein Prozentsatz, der wiedergibt, welchen Anteil die alternativen nicht-fossilen Kohlenstoffquellen gemessen an ihrem theoretischen Gesamtpotenzial zur Produktion im Jahr 2035 und 2045/2050 beitragen.

In einem Basis-Szenario wird ein Wachstum der chemischen Grundstoffproduktion von jährlich - 1 % von 2023 bis 2035 und - 0,5 % von 2035 bis 2045/50 angenommen. Dies erlaubt eine Projektion auf den zukünftigen Kohlenstoffbedarf. Um eine Sensitivität abzubilden, werden zusätzlich eine optimistische und pessimistische Variante des Basis-Szenarios dargestellt. Hierbei werden Abweichungen von plus und minus 2 % der Wachstumsrate der chemischen Grundstoffchemie betrachtet. Die Anteile der jeweiligen alternativen Kohlenstoffquellen variieren zwischen der optimistischen und pessimistischen Variante.

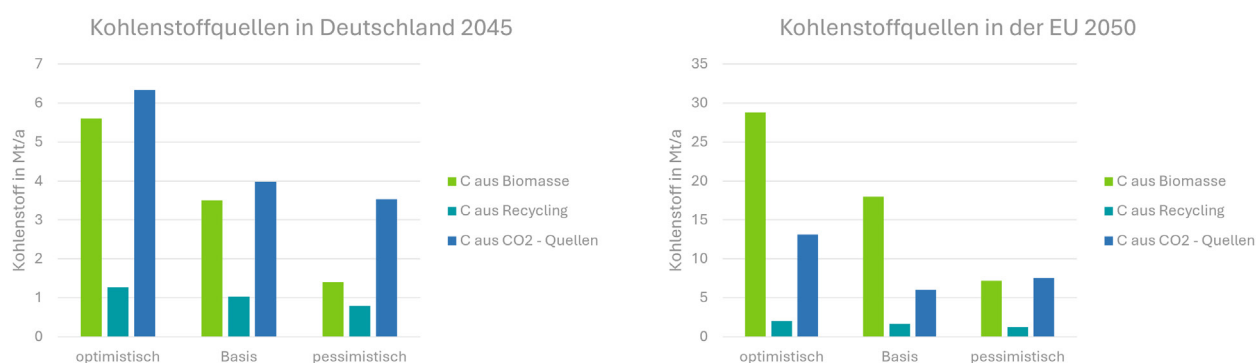


Abbildung 1: Kohlenstoffbedarfe nach Quelle und Szenario für Deutschland (links) und die Europäische Union (rechts).

Für die drei Szenarien liegt die Durchdringung von Biomasse als Kohlenstoffquelle bei 5 ± 2 % in 2035 und 25 ± 15 % in 2045/2050. In Deutschland könnten so im Jahr 2045 zwischen 1,4 und 5,6 Mt C aus Biomasse genutzt werden und entsprechend in der EU im Jahr 2050 zwischen 7,2 und 28,8 Mt C – siehe auch Abbildung 1.

Für die Durchdringung der Kohlenstoffnutzung durch chemisches Recycling wird ein Anteil von 5 ± 2 % bis zum Jahr 2035 angenommen, mit einem Anstieg auf 65 ± 15 % bis 2045/2050. In Deutschland könnte demnach im Jahr 2045 zwischen 0,8 und 1,3 Mt Kohlenstoff pro Jahr Kohlenstoff aus Kunststoffabfällen stofflich genutzt werden. Für die EU wird bis 2050 mit einer Nutzung zwischen 1,3 und 2,0 Mt Kohlenstoff pro Jahr gerechnet.

Durch die Errichtung von ersten CCU-Anlagen (Carbon Dioxide Capture and Utilization) bis 2035 könnten in Deutschland zwischen 0,1 und 0,5 Mt Kohlenstoff pro Jahr stofflich genutzt werden. Um den verbleibenden Kohlenstoffbedarf, der nicht durch Biomasse und Recycling gedeckt werden kann, zur Produktion der ausgewählten Chemikalien bis 2045 zu gewährleisten, müssten demnach in Deutschland zwischen 3,5 und 6,3 Mt Kohlenstoff pro Jahr durch CO₂-Abscheidung zur Verfügung gestellt und genutzt werden.

Aufgrund der höheren Verfügbarkeit von Biomasse und Kunststoffabfällen in der EU relativ zum Produktionsvolumen, ist in der europäischen Betrachtung der Bedarf an CO₂ in Relation kleiner. In der EU fallen demnach bis zum Jahr 2050 Kohlenstoffbedarfe aus CO₂ zwischen 6,0 und 13,1 Mt Kohlenstoff pro Jahr an.

Die Betrachtung zeigt, dass es basierend auf den getroffenen Annahmen und Berechnungen möglich ist, den gesamten Bedarf an Kohlenstoff für die Herstellung der Grundchemikalien aus Biomasse, Kunststoffabfällen und CO₂ zu decken. Der zukünftige Bedarf hängt jedoch von vielen unterschiedlichen Faktoren ab, die nicht in den Berechnungen berücksichtigt werden konnten, wie z.B. in welchen Regionen der Erde in der Zukunft in welchen Größenverhältnissen Chemikalien hergestellt werden. Selbst bei gleichbleibender globaler Produktionsmenge kann sich der Bedarf in Deutschland, oder der EU, aufgrund von Standortverlagerungen verringern. Andererseits kann ein geändertes Konsumverhalten dazu führen, dass generell weniger Produkte benötigt werden. Auch der Ausbau der Kreislaufwirtschaft und Verbesserungen des mechanischen Recyclings könnten den Bedarf an Grundchemikalien verringern.



1. Hintergrund

Im Rahmen der vorliegenden Studie wird untersucht, wie sich alternative Kohlenstoffquellen in bestehenden Wertschöpfungsketten der chemischen Industrie integrieren lassen. Derzeit beruht die Produktion auf fossilen Rohstoffen wie Erdöl und Erdgas. Sie dienen als Ausgangspunkt für eine Reihe von alltäglichen Produkten wie zum Beispiel Kunststoffe, Farben, Lösemittel, Düngemittel, Kosmetika und pharmazeutische Erzeugnisse. Der im Produkt gebundene Kohlenstoff wird am Ende des Lebensweges der Produkte meist in Form des Treibhausgases Kohlendioxid emittiert.

Für eine klimaneutrale Zukunft muss auf fossile Rohstoffe verzichtet werden. Dies kann nur gelingen, indem alternative und gleichzeitig klimaneutrale Kohlenstoffquellen erschlossen werden. Im Rahmen der vorliegenden Studie soll deren Potenzial zum Einsatz in der chemischen Industrie beleuchtet werden.

1.1. Globaler Kohlenstoffkreislauf

Kohlenstoff kann in unterschiedlichen Bereichen und in unterschiedlichen Stoffen auf und in der Erde angetroffen werden. Diese Bereiche lassen sich grundlegend einteilen in:

- Lithosphäre Gesteine und Böden¹
- Biosphäre Biomasse: alle lebenden Organismen
- Hydrosphäre Gewässer, Schnee- und Eismassen
- Technosphäre menschliche Erzeugnisse
- Atmosphäre gasförmige Erdhülle.

Zwischen diesen Sphären bestehen Wechselwirkungen und Kohlenstoffflüsse. Diese Prozesse können in unterschiedlichen Geschwindigkeiten ablaufen. Die Spanne reicht hierbei von sehr kurzen² zu geologischen³ Zeiträumen. Bei der Entstehung von Braunkohle aus Biomasse beispielsweise geht der enthaltene Kohlenstoff innerhalb geologischer Zeiträume aus der Bio- in die Lithosphäre über. Schnelllebig ist beispielsweise die Nutzung durch Pflanzen, bei der atmosphärischer Kohlenstoff zu Biomasse wird.

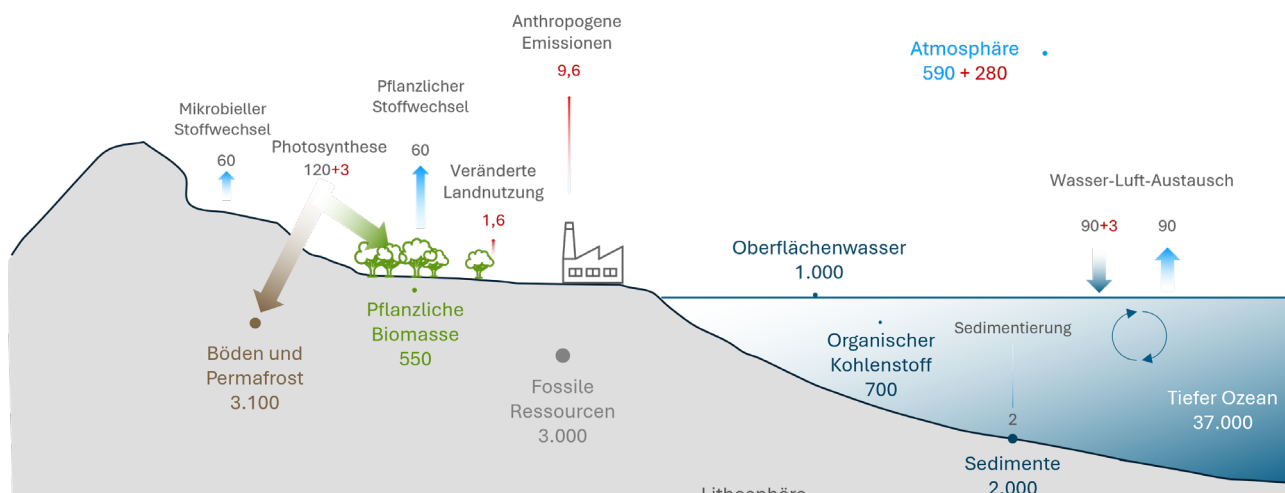


Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung des globalen Kohlenstoffkreislaufs in Gt Kohlenstoff für Kohlenstoffreservoirs bzw. Gt pro Jahr für Flüsse (Bruhwiler et al. 2018; Friedlingstein et al. 2023; Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2023; Janowiak et al. 2017; Riebeek 2011). Kohlenstoffreservoirs sind mit Ausnahme der Lithosphäre und des Ozeans als Kreise und Flüsse als Pfeile dargestellt. Anthropogene Einflüsse sind rot hinterlegt.

1 Manchmal werden Böden auch einzeln als Pedosphäre geführt
2 Beispielsweise Tageszyklen der Photosynthese
3 Millionen Jahre



In Abbildung 2 werden vereinfacht Kohlenstoffreservoirs und -flüsse zwischen diesen dargestellt. Der Großteil des Kohlenstoffs auf der Erde ist in der Lithosphäre in Mineralen und Gesteinen gebunden, beispielsweise in Kalkstein oder Dolomit.

Menschliche Aktivitäten haben diesen natürlichen Kreislauf beeinflusst. Durch die Förderung und Nutzung fossiler Ressourcen wird zusätzlich Kohlenstoff aus der Lithosphäre zunächst in die Technosphäre und weiter in die Atmosphäre überführt. Dies hat Einfluss auf bestehende Flüsse des globalen Kohlenstoffkreislaufs.

1.1.1. Atmosphärischer Kohlenstoff und CO₂-Emissionen

Besonderes Augenmerk wird auf die Kohlenstoffflüsse in die Atmosphäre gelegt. Kohlenstoff liegt hier meist in Form von Gasen vor, wie etwa Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Methan (CH₄). Es kann jedoch auch zu einem temporären Eintrag von Feststoffen, wie beispielsweise Rußpartikeln von Flugzeugen, kommen. Dieser ist im Vergleich zu gasförmigen Emissionen jedoch gering. Treibhausgase (THG) in der Atmosphäre, wie das lang verweilende CO₂, tragen erheblich zur Erderwärmung durch den sogenannten Treibhausgaseffekt bei. Neben CO₂ haben auch andere Gase, wie CH₄ oder Lachgas (N₂O), in der Atmosphäre hierauf einen Einfluss. Anthropogene Emissionen aus der Technosphäre haben hier in den globalen Kohlenstoffkreislauf eingegriffen. Im Jahr 2024 wurden nach einer Berechnung der Internationalen Energieagentur demnach etwa 37,8 Gt CO₂ und damit 10,3 Gt Kohlenstoff (International Energy Agency 2025) emittiert.

1.1.2. Kohlenstoffflüsse der Technosphäre

Der Begriff der Technosphäre umfasst unter anderem alle von Menschen hergestellten Substanzen, Materialien, Gegenstände, Infrastrukturen und industriellen Technologien (Zalasiewicz et al. 2017). Sie stellt eine weitere Erdsphäre dar und interagiert mit diesen, etwa durch Land- und Forstwirtschaft in der Biosphäre oder die Nutzung natürlicher Ressourcen der Lithosphäre. Durch diese Interaktionen haben sich bestehende Kohlenstoffflüsse im globalen Kohlenstoffkreislauf verändert. Beispielhaft sind verwendete Rohstoffe und entstehende Produkte in Abbildung 3 dargestellt.

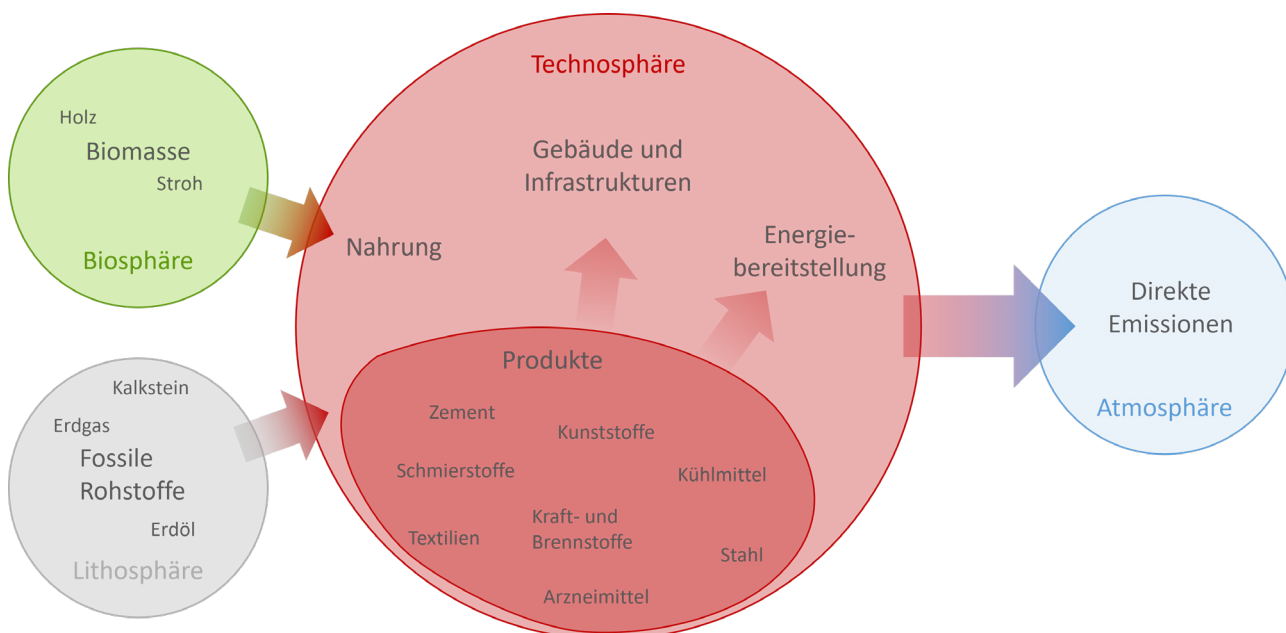


Abbildung 3: Schematische Interaktion der Technosphäre mit Bio-, Litho- und Atmosphäre. Genutzte Rohstoffe sowie entstehende Produkte sind hier beispielhaft gelistet. Bei der Produktion entstehen direkte Treibhausgasemissionen.

Land- und Forstwirtschaft beeinflussen den natürlichen Kohlenstoffzyklus, etwa durch die Entnahme geschlagenen Holzes oder durch die Trockenlegung von Mooren. Auch die zunehmende Produktion von Biogas zur energetischen Nutzung kann die Kohlenstoffflüsse aus der Bio- in die Atmosphäre verändern, da nun in der Technosphäre Emissionen bei der Biogasproduktion



und -nutzung entstehen, die bei einer natürlichen Zersetzung nur teilweise und deutlich langsamer auftreten würden. Prozesse der Technosphäre nutzen häufig die Lithosphäre, insbesondere durch die Förderung fossiler Ressourcen für Kraft- und Brennstoffe. Aber auch andere Nutzungen dieser greifen in den Zyklus ein. So entfernt der Abbau von Karbonatgestein, zum Beispiel Kalkstein für die Produktion von Zement, langfristig gebundenen Kohlenstoff aus der Lithosphäre und überführt diesen in die Technosphäre.

Durch die Nutzung fossiler und biogener Ressourcen tragen Prozesse in der Technosphäre zu einer Erhöhung der THG-Konzentrationen, wie CO_2 und CH_4 , in der Atmosphäre bei. Ein Teil des fossilen oder biogenen Kohlenstoffs verbleibt jedoch zunächst in der Technosphäre (Hidiroglu et al. 2024), beispielsweise in Kunststoffherzeugnissen oder Betongebäuden.

Diese Studie betrachtet den Kohlenstoffbedarf der Technosphäre mit besonderem Fokus auf der chemischen Grundstoffindustrie. Industrielle Emissionen von Kohlenstoff in die Atmosphäre lassen sich grundsätzlich in drei Kategorien einteilen: Prozess-, rohstoff- und energiebedingte Emissionen. Dies wird anhand von petro-chemischen Wertschöpfungsketten in Kapitel 2 detailliert beleuchtet.

1. 2. Konzepte im Umgang mit Kohlenstoff

Der Umgang mit Kohlenstoff stellt eine zentrale Herausforderung für die Transformation der Industrie hin zur Klimaneutralität dar. Dabei stehen verschiedene Strategien zur Verfügung, die sich je nach Branche und technologischem Reifegrad ergänzen können. Ein wesentlicher Ansatz ist die Elektrifizierung industrieller Prozesse, durch die fossile Energieträger ersetzt werden können – etwa in Nieder- und Mitteltemperaturprozessen, wie bei der Dampferzeugung. Voraussetzung dafür ist jedoch eine zuverlässige und erneuerbare Stromversorgung. Wo direkte Elektrifizierung an technische Grenzen stößt, können synthetische Kraft- und Brennstoffe eine Rolle spielen.

Ein weiterer zentraler Baustein ist die Abscheidung und Speicherung von CO_2 (carbon dioxide capture and storage; CCS). Dort, wo CO_2 prozessbedingt anfällt – etwa in der Zement- oder Kalkherstellung – kann CCS helfen, unvermeidbare Emissionen dauerhaft zu binden. Parallel dazu wird intensiv an der Erschließung alternativer Kohlenstoffquellen gearbeitet, um weiterhin ein ähnliches Produktspektrum anbieten zu können. Hierzu zählen etwa Biomasse, Kunststoffabfälle oder CO_2 , welche beispielsweise mithilfe von grünem Wasserstoff in wertvolle Produkte wie Methanol, synthetische Kraftstoffe oder Grundchemikalien überführt werden kann. Durch Recyclingverfahren könnte Kohlenstoff im Kreislauf gehalten und so Emissionen vermieden werden. Mit der Nutzung alternativer Kohlenstoffquellen könnte in Zukunft das gewohnte Produktspektrum klimaneutral bereitgestellt werden.

Auch die Entnahme von CO_2 aus der Atmosphäre und eine dauerhafte Bindung in Produkten kann einen Weg zu klimaneutralen Produkten darstellen. Langfristig wird es auf einen klugen Mix aller genannten Konzepte ankommen, um Industrieprozesse nachhaltig zu gestalten.

Ausgleichsmechanismen wie z. B. das Carbon Offsetting⁴ ist ein Konzept, das genutzt werden kann, wenn direkte Emissionsvermeidungen nicht möglich oder wirtschaftlich nicht tragbar sind. Der Einsatz und die Wirksamkeit von einigen Kompensationsmöglichkeiten sind jedoch umstritten.

1.2.1. Bilanzierung von Kohlenstoffemissionen

Ebenso entscheidend wie die technische Umsetzung der CCS und carbon dioxide capture and utilization (CCU) Technologien⁵, ist die richtige Bilanzierung des entnommenen und weiterverarbeiteten CO_2 in dem angemessenen Bilanzrahmen. Nur durch eine umfassende Betrachtung aller Emissionsquellen und -senken kann beurteilt werden, ob eine Netto- CO_2 -Reduktion erzielt wird oder ob die Maßnahme lediglich zu einer Verschiebung der Emissionen auf nachfolgende Bilanzgrenzen oder Verzögerung der Emissionen führt. Wasserstoff wird bei vielen CCU-Verfahren als Reaktionspartner verwendet. Wird zum Beispiel der Wasserstoff nicht klimaneutral hergestellt, muss dies in die Bilanzierung aufgenommen werden, da dies einen entscheidenden Einfluss auf die Nachhaltigkeit des CCU-Verfahrens hat. Die Bilanzierung dient somit dazu, die Klimawirkung der genutzten Kohlenstoffquellen vergleichbar, nachvollziehbar und transparent zu machen. Unabhängig von der Quelle basiert die Bilanzierung auf der Lebenszyklusanalyse (LCA), welche den gesamten Pfad des Kohlenstoffs abbildet und somit die Beurteilung eines möglichen Netto-Treibhausgas-effektes im Vergleich zur Referenz erlaubt. Gesetzliche Vorgaben und Richtlinien geben jedoch Aufschluss über die zu beachtenden Bilanzierungsmethoden von CO_2 -Strömen, einschließlich der Bilanzgrenzen, Methodik zur Erfassung, Bewertung und Anrechnung von Emissionen und Ein-

⁴ Kompensationsmechanismen für emittierten Kohlenstoff

⁵ CCU bezeichnet Technologien, welche CO_2 aus Abgasen oder der Luft abscheiden und in Folgeprozessen verwenden.



sparungspotenzialen, bspw. nach internationalen Standards wie ISO 14067, dem Greenhouse Gas Protocol oder Vorgaben des IPCC (DIN n.d.).

Im Falle von biogenen Kohlenstoffquellen sowie bei der CO_2 -Entnahme aus der Luft gilt grundlegend, dass vorerst eine CO_2 -Senke durch die Abscheidung erreicht wird, bei anschließender CO_2 -Freisetzung beispielsweise durch Verbrennung des erzeugten Produktes, die Nettobilanz wieder ausgeglichen wird. Bei der Abscheidung aus Abgasströmen wird CO_2 genutzt, das ohne anderweitige Nutzung ohnehin emittiert worden wäre. Hier bewertet die Bilanzierung, ob die stoffliche Nutzung den Kohlenstoff länger im Kreislauf halten kann und welche Emissionen durch den Energieeinsatz zur Abtrennung entstehen. Werden fossile Abgasströme betrachtet, bleibt der zu bilanzierende Kohlenstoff fossil und eine Anrechnung als Emissionsminderung erfolgt nur, wenn entweder fossile Rohstoffe oder emissionsintensive Prozesse ersetzt werden oder das CO_2 dauerhaft in Produkten gebunden bzw. geologisch gespeichert wird (Richtlinie (EU) 2023/2413 2023).

1.2.2. Rohstoffhierarchie

Die Nutzung alternativer Rohstoffe in (bestehenden) industriellen Prozessen ist mit energetischem Aufwand verknüpft. Kohlenstoffhaltige Rohstoffe liegen meist nicht in der für den gewünschten Prozess benötigten Form vor. Dadurch wird eine Aufbereitung erforderlich. Dies kann je nach Rohstoff sehr unterschiedlich ausfallen und Prozesse wie Sortieren, Zerkleinern, Vergasen oder Abtrennen beinhalten. Beeinflusst wird der Energieaufwand solcher Verfahren durch den Kohlenstoffgehalt des Rohstoffes und des physikalischen Zustandes. Flüssige oder halbfeste Rohstoffe müssen anders gehandhabt werden als feste oder gasförmige. Die Entscheidung, wie mit Rohstoffen umgegangen wird, hängt von vielen Faktoren ab, beispielsweise dem Energieaufwand oder dem Rohstoffpreis.

So kann eine generalisierte Rohstoffnutzungshierarchie abgeleitet werden, welche der möglichen Wertschöpfung folgt. Dies muss nicht für alle Anwendungsfälle zutreffen, da je nach betrachtetem Prozess manche Ausgangsstoffe und Zwischenprodukte einfacher oder günstiger integriert werden können. Meist wird zunächst eine Kreislaufführung durch Recyclingmaßnahmen angestrebt, wie etwa bei manchen Kunststoffen. Erst in der Folge wird auf Biomasse zurückgegriffen. Und zum Schluss der Rohstoffnutzungskaskade steht die CO_2 -Abscheidung (siehe Abbildung 4).

Rohstoffkaskade

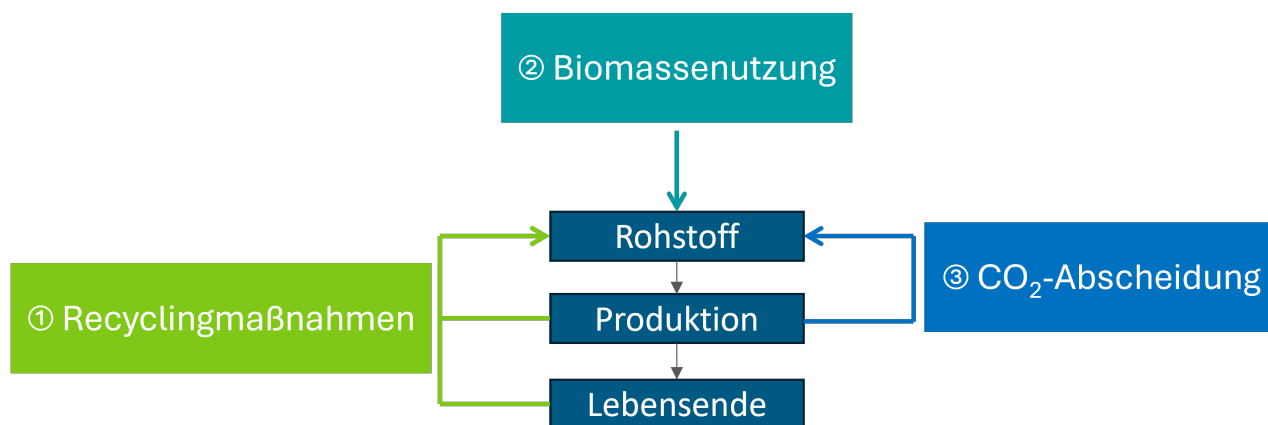


Abbildung 4: Generalisierte Rohstoffnutzungshierarchie für die Bereitstellung nötiger Rohstoffe der chemischen Grundstoffindustrie

1.2.3. Gesellschaftliche Entwicklungen

Das zunehmende Bewusstsein der Gesellschaft in den Bereichen Umwelt- und Klimaschutz hat auch den Umgang mit Produkten verändert. Aufpreise für grüne oder nachhaltige Produkte werden von bestimmten Zielgruppen akzeptiert, wie beispielsweise das in den letzten Dekaden ausgebaute Biosegment demonstriert.

Weiterhin gibt es ein wachsendes Bewusstsein für die Auswirkungen von Plastikmüll in den Weltmeeren, welches zu einem politischen Umdenken beigetragen hat. So gibt es heute EU-Vorschriften, um Kunststoffverpackungen zu reduzieren, häufiger wiederzuverwenden



und zu recyceln (Neue EU-Vorschriften: weniger Verpackungen, mehr Wiederverwendung und Recycling 2024; Ragonnaud 2024). Zusätzlich entstanden gesellschaftliche Strömungen, wie etwa die zero-waste-Bewegung. Hierbei legen Konsument:innen Wert darauf, möglichst wenig Müll zu generieren. Durch geringere Nachfrage nach Kunststoffen kann der Gesamtbedarf an Kohlenstoff für Produkte der chemischen Industrie sinken.

1.3. Regulatorische Entwicklungen im Umgang mit Kohlenstoff

Der globale Klimaschutz ist das Ergebnis eines vielschichtigen politischen Prozesses, der auf verschiedenen Ebenen stattfindet – von internationalen Verhandlungen über europäische Gesetzgebung bis hin zur konkreten Umsetzung in den Mitgliedstaaten. Der folgende Abschnitt gibt einen kurzen Überblick über wesentliche Klimaschutzstrategien und -Gesetzgebungen auf verschiedenen Ebenen mit Fokus auf Kohlenstoff, insbesondere in Form von CO₂.

1.3.1. Internationale Ebene – Der völkerrechtliche Rahmen

Der Ursprung der internationalen Klimapolitik liegt in der Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro (1992). Dort wurde die Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen⁶ (United Nations 1992) verabschiedet. Diese trat 90 Tage nach der 50. Ratifizierung durch einen der Mitgliedstaaten am 21. März 1994 in Kraft und bildet bis heute die Grundlage der internationalen Zusammenarbeit im Kampf gegen den Klimawandel. Darauf aufbauend folgten zwei weitere zentrale Meilensteine: Verabschiedung des Kyoto-Protokolls (1997) als Zusatz zur Klimarahmenkonvention (United Nations 1997). Dies war das erste völkerrechtlich verbindliche Abkommen zur Reduktion von Treibhausgasen – allerdings nur für Industrieländer – und trat im Februar 2005 in Kraft.

Mit dem Pariser Abkommen (2015) verpflichteten sich erstmals alle Staaten, also Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländer, zur Begrenzung der globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 °C, möglichst 1,5 °C. Jeder Staat legt hierfür eigene Klimaschutzbeiträge fest und muss diese regelmäßig verschärfen. (Europäischer Rat and Rat der Europäischen Union 2025b; Übereinkommen von Paris 2016)

Weiterhin wird der grenzüberschreitende Transport, sowie die dauerhafte Speicherung von CO₂ in geologischen Schichten unterhalb des Meeres, durch internationale Verträge, wie das (OSPAR 2007) oder das London-Protokoll (United Nations 1972), (United Nations 1996)⁷, geregelt.

Zur Verringerung von Plastikabfällen in der Umwelt bestehen Bestrebungen, ein internationales Abkommen zu verabschieden. Dadurch würden beispielsweise Kunststoffprodukte zur Einfachnutzung langsam aus der Produktpalette entfernt werden (United Nations Environment Programme 2024). Dies hätte daher Auswirkungen, welche Kunststoffarten in welcher Menge künftig für Recycling zur Verfügung stehen. Die nächste Verhandlungsphase beginnt im August 2025, nachdem bisher keine Einigung zu verbindlichen Maßnahmen erzielt werden konnte (Intergovernmental Negotiating Committee on Plastic Pollution n.d.; Tagesschau 2024; United Nations Environment Programme n.d.).

Im Bereich der Biomassenutzung sind mehrere internationale Abkommen und Bestrebungen relevant. Zum einen wurde im Jahr 2022 auf der 15. Konferenz des Übereinkommens über die biologische Vielfalt (1993) der globale Biodiversitätsrahmen von Kunming-Montreal (Convention on Biological Diversity 2022) beschlossen. Zum anderen soll mit einer internationalen Vereinbarung gegen Entwaldung (United Nations Economic and Social Council 2015) diese eingeschränkt werden. Dies wurde auch 2021 im Rahmen der Klimakonferenz in Glasgow mit einem Finanzierungsversprechen bekräftigt (Rannard and Gillett 2021; UNFCCC Sekretariat 2021; United Nations Climate Change Conference 2021). Gleichzeitig soll nachhaltige Biomasse für die Erzeugung von Bioenergie eine wichtige Rolle spielen (Joint statement on sustainable bioenergy for climate and development goals 2024).

1.3.2. Europäische Ebene

Im Folgenden werden wichtige Verordnungen, Richtlinien und Maßnahmen der Europäischen Union (EU), die hauptsächlich auf die Verringerung von CO₂-Emissionen in die Atmosphäre abzielen, dargestellt. Auch der Umgang mit Biomasse und Kohlenstoff wird auf

6 UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change

7 Eine Ratifizierung der Änderungen zur Ermöglichung von CO₂-Export und -Speicherung aus dem Jahr 2009 wurde bisher nicht erreicht. Eine vorläufige Anwendung durch die bisher acht unterzeichnenden Staaten ist möglich. Deutschland gehört nicht dazu.



europäischer Ebene diskutiert und reguliert. Für die weitere Arbeit ist jedoch insbesondere der Umgang mit CO₂, welches auch als Zwischenprodukt aus diesen Rohstoffen entstehen kann, von Interesse.

Grundlegender Baustein der europäischen Politik ist, dass nur solche CO₂-haltige Produkte als CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre anerkannt werden, die aus der Atmosphäre oder biogenen Ursprungs sind, und bei denen das CO₂ dauerhaft gebunden wird, wie etwa in Baustoffen. Kurzlebige Anwendungen, wie beispielsweise die Herstellung synthetischer Kraftstoffe, gelten hingegen als Emissionsvermeidung und nicht als dauerhafte CO₂-Entnahme.

Die EU hat früh eigene Instrumente für den Klimaschutz etabliert. Zentrales Element ist das EU-Emissionshandelssystem (EU-ETS, EU emissions trading system), das 2005 eingeführt wurde (Europäische Kommission n.d.; Europäisches Parlament and Rat der Europäischen Union 2003b). Es deckt große Teile der Energieerzeugung, der verarbeitenden Industrie und innereuropäischen Luftfahrt und des maritimen Transports ab und basiert auf dem Prinzip der Begrenzung und des Handels mit Emissionszertifikaten (Europäische Kommission n.d.). Zertifikate sollen voraussichtlich bis ca. 2040 herausgegeben werden. Sobald alle Zertifikate genutzt wurden und damit das vorgegebene Budget für Treibhausgasemissionen verbraucht ist, darf es in den unter EU-ETS geführten Emittenten keine Emissionen mehr geben.

Wegweisend im Bereich Kohlenstoffnutzung ist die Schaefer-Kalk-Entscheidung des Gerichtshofs der Europäischen Union (EuGH). In seinem Urteil vom 19. Januar 2017 stellte der EuGH klar (Gerichtshof der Europäischen Union 2017), dass nur tatsächlich in die Atmosphäre freigesetztes CO₂ im Sinne der Emissionshandelsrichtlinie als „Emission“ gilt. In dem Verfahren hatte die Klägerin beantragt, die bei der Herstellung von gefällttem Calciumcarbonat⁸ chemisch gebundenen CO₂-Mengen von der Emissionsbilanz abzuziehen. Der Gerichtshof entschied, dass das CO₂, das dauerhaft und nachweislich chemisch gebunden wird und nicht in die Atmosphäre gelangt, nicht als Emission zu werten ist.

Die entsprechende Bestimmung der damaligen Verordnung (EU) Nr. 601/2012 (Europäische Kommission 2012), die die Anrechnung solcher CCU-Mengen ausschloss, wurde so vom EuGH für ungültig erklärt, da sie den Begriff der Emission unangemessen ausweitete und nicht im Einklang mit der Emissionshandelsrichtlinie stand. Dies beeinflusste die Auslegung und spätere Anpassung der Delegierten Verordnung (EU) 2019/331 (Europäische Kommission 2018), welche harmonisierte Regeln für die kostenlose Zuteilung von Emissionszertifikaten festlegt. Insbesondere betrifft dies die Methodik zur Bestimmung der Emissionen, die für die Zuteilung relevant sind (Europäische Kommission 2024). Im Rahmen des Fit-for-55-Pakets wurde mit der Richtlinie (EU) 2023/959, welche die Emissionshandelsrichtlinie 2003/87/EG novelliert (Europäisches Parlament and Rat der Europäischen Union 2023), der Regelungsrahmen zur Berücksichtigung von CO₂ in CCU-Produkten überarbeitet. Mit dieser Novellierung ist es dem europäischen Gesetzgeber gelungen, eine Rechtslücke zu schließen. Die Europäische Kommission ist jedoch beauftragt, noch weitere sekundäre Rechtsvorschriften zu erlassen, welche klären, wann CCU als dauerhaft chemisch gebunden gilt.

Nach dem Abschluss des Pariser Abkommen im Jahr 2015 und dem darin formulierten Ziel der Klimaneutralität hat die EU ihre Klimapolitik weiter verschärft. Der Europäische Green Deal (2019) (Europäische Kommission 2019) stellt in der Folge eine umfassende Strategie für eine klimaneutrale, ressourcenschonende und sozial gerechte Transformation der Wirtschaft dar. Ein Kernelement bildet hierbei das EU-Klimagesetz (2021) (Europäisches Parlament and Rat der Europäischen Union 2021), das die Klimaneutralität bis 2050 rechtlich verankert und ein verbindliches Zwischenziel von mindestens 55 % Minderung der Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 im Vergleich zum Jahr 1990 festlegt.

Zur Umsetzung dieser Strategie enthält das „Fit für 55“-Paket (Europäischer Rat and Rat der Europäischen Union 2025a) zahlreiche Gesetzesinitiativen, darunter eine Reform und Ausweitung des EU-ETS, sowie die Einführung eines zweiten Emissionshandelssystems für Gebäude und Verkehr, sowie weitere Sektoren (EU-ETS 2) (Europäische Kommission n.d.). Die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED, Renewable Energy Directive) III (Europäische Kommission n.d.) ist eine zentrale EU-Richtlinie zur Förderung erneuerbarer Energien. Sie wurde 2023 als Teil des Fit-für-55-Pakets (Europäische Kommission n.d.; Europäischer Rat and Rat der Europäischen Union 2025a) überarbeitet und durch die Richtlinie (EU) 2023/2413 (Richtlinie (EU) 2023/2413 2023) des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Oktober 2023 zur Änderung der Richtlinie (EU) 2018/2001 („RED II“) (Europäisches Parlament and Rat der Europäischen Union 2018) erlassen. Die RED III enthält neue, ambitioniertere Ausbauziele für erneuerbare Energien sowie verbindliche Vorgaben zur Nutzung nachhaltiger Biomasse und zur Integration erneuerbarer Kraftstoffe nicht-biogenen Ursprungs (RFNBO, renewable fuels of non-biological origin) in die verschiedenen Sektoren wie Verkehr, Industrie und Energie. Ein wichtiger Bezugspunkt für die RED III ist die delegierte Verordnung (EU) 2023/1185 zur RED II (Europäische Kommission 2023), insbesondere der Anhang zur Lebenszyklusanalyse (LCA, life cycle assessment) von RFNBO, der im Februar 2023 von der Europäischen Kommission veröffentlicht wurde.

8 Kalk



Die delegierte Verordnung ergänzt die RED II und wird auch für die RED III herangezogen, solange keine abweichenden oder neuen Vorgaben beschlossen werden. Sie bildet die rechtsverbindliche technische Grundlage für die Bewertung und Regulierung von RFNBO im Rahmen der RED II und der geänderten RED III. Dies enthält auch, welche CO₂-Quellen für RFNBO zulässig sind und wie die Treibhausgasemissionen berechnet werden.

RFNBO sind synthetische Kraftstoffe, die aus erneuerbarem Wasserstoff und nachhaltigem – also nicht-fossilem – CO₂ hergestellt werden. RED III schreibt vor, dass diese Kraftstoffe im Vergleich zu fossilen Äquivalenten mindestens 70 Prozent geringere Treibhausgasemissionen aufweisen müssen, um als nachhaltig eingestuft zu werden. Gleichzeitig wurden im Rahmen der RED III die Nachhaltigkeitskriterien für die Nutzung von Biomasse verschärft. Dies wirkt sich auch auf die Verfügbarkeit biogenen CO₂ für CCU-Prozesse aus, da insbesondere die Nutzung von Rest- und Abfallstoffen bevorzugt wird, um indirekte Landnutzungsänderungen und damit verbundene Emissionen zu vermeiden.

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit sieht RED III zudem eine standardisierte Berechnungsmethodik auf Basis von Lebenszyklusanalysen vor, um die Treibhausgasbilanz von Produkten einheitlich und transparent bewerten zu können.

Die Anrechnung von CO₂ in den vorgegeben Quoten von SAFs, das im Rahmen der Herstellung synthetischer Kraftstoffe genutzt wird, ist grundsätzlich möglich, unterliegt jedoch strengen Voraussetzungen. So muss das eingesetzte CO₂ aus nachhaltigen Quellen stammen. Hierzu zählen biogene Quellen wie Biomasse oder Biogas, aber auch CO₂ aus der Luft sowie CO₂ aus industriellen Prozessen, sofern es sich um unvermeidbare Emissionen handelt, die andernfalls in die Atmosphäre freigesetzt würden. Letztere gelten laut der RED III als weiterverwendete, kohlenstoffhaltige Kraftstoffe (RCF, recycled carbon fuels) und deren Einsatz ist in der delegierten Verordnung (EU) 2023/1185 geregelt. So wird nur bereits in einem Bepreisungssystem berücksichtigtes CO₂ angerechnet. Zusätzlich werden auch nur bestimmte industrielle Prozesse nach der Richtlinie 2003/87/EG (Europäisches Parlament and Rat der Europäischen Union 2003a) anerkannt. Zeiträume für diese Anerkennung sind an die Verwendung gebunden: für CO₂ aus der Stromerzeugung nur bis 2036 und für die restlichen CO₂-Quellen bis 2041. Für nachhaltige oder natürliche CO₂-Quellen bestehen keine zeitlichen Einschränkungen.

Trotz des langsamen Umdenkens der Europäischen Union im Bereich der CCU-Produkte bleibt nur die dauerhafte CO₂-Speicherung im EU-ETS anrechenbar. Unterstützend wurde auch eine Verordnung zur Schaffung eines freiwilligen Unionsrahmens für die Zertifizierung von dauerhaften CO₂-Entnahmen aus Luft und Biomasse, kohlenstoffspeichernder Landbewirtschaftung und der CO₂-Speicherung in Produkten verabschiedet (Europäisches Parlament 2024; Rat der Europäischen Union 2024).

Weitere wichtige Maßnahmen der Europäischen Union sind die Verordnung über die Netto-Null-Industrie (Net-Zero Industry Act, NZIA) sowie die Strategie für das industrielle CO₂-Management, in welcher politische Maßnahmen und Prozesse für den zukünftigen Umgang mit CO₂ vorgestellt wurden.

Die Mitteilung der Europäischen Kommission über eine Strategie für das industrielle CO₂-Management in der EU (2024) (Europäische Kommission n.d., n.d.) enthält mehrere politische Maßnahmen, die zur Umsetzung der Klimaneutralität beitragen sollen. Im Mittelpunkt steht die Notwendigkeit, sowohl technologische als auch politische Rahmenbedingungen zu schaffen, die das CO₂-Management auf europäischer Ebene koordinieren und skalieren

Der NZIA (Europäisches Parlament and Rat der Europäischen Union 2024), von der Europäischen Kommission im Juni 2024 verabschiedet und im selben Monat in Kraft getreten, zielt darauf ab, die Herstellung klimaneutraler Technologien in der EU zu fördern und bis 2030 mindestens 40 % des jährlichen Bedarfs an Netto-Null-Technologien durch europäische Produktion zu decken. Der NZIA erkennt CO₂-Abscheidung, -Transport, -Nutzung und -Speicherung als essenzielle Technologien für die Defossilisierung der Industrie an. Dabei wird die Schaffung einer robusten Infrastruktur für den CO₂-Transport und die CO₂-Speicherung als eine der wichtigsten Maßnahmen betrachtet, um die wirtschaftliche und technologische Basis für die CO₂-Entnahme und -Verwertung weiter auszubauen. Der NZIA soll diese Entwicklungen durch beschleunigte Genehmigungsverfahren und finanzielle Anreize erleichtern. Dafür wurden spezifische Ziele für die CO₂-Abscheidung und -Speicherung festgelegt. Ein zentrales Element ist das unionsweite Ziel, bis zum Jahr 2030 eine jährliche CO₂-Einspeicherkapazität von mindestens 50 Mt zu erreichen. Dieses Ziel soll die Entwicklung von CO₂-Speicherstätten fördern und die Defossilisierung industrieller Prozesse unterstützen. Zusätzlich sieht der NZIA die Möglichkeit vor, diese Speicherziele über das Jahr 2030 hinaus anzupassen, um den langfristigen Klimazielen der EU gerecht zu werden. Die Europäische Kommission ist befugt, die Speicherziele entsprechend zu aktualisieren und sicherzustellen, dass die CO₂-Speicherkapazitäten mit den Anforderungen zur Erreichung der Netto-Null-Emissionsziele übereinstimmen. Nach den in der EU-Mitteilung zum Klimaziel 2040 verwendeten Modellen (European Com-



mission on behalf of the European Union 2024b) müssten bis 2040 etwa 280 Mt und bis Mitte des Jahrhunderts etwa 450 Mt pro Jahr abgeschieden werden.

Des Weiteren ist die CO₂-Transportinfrastruktur eine notwendige Voraussetzung für eine umfassende Abscheidung, Speicherung und Nutzung von CO₂. Nach der Verordnung (EU) 2022/869 vom 30. Mai 2022 (Europäisches Parlament and Rat der Europäischen Union 2022) soll die transeuropäische Energieinfrastruktur abgeschiedenes, unvermeidliches CO₂ und für die dauerhafte Speicherung bestimmtes CO₂ transportieren können. Für die geologische Speicherung wurde die Richtlinie (EU) 2009/31/EG (Europäisches Parlament and Rat der Europäischen Union 2009) vom 23. April 2009 erlassen.

1.3.3. Nationale Ebene – Deutschland

Die internationalen und europäischen Verpflichtungen bilden den Rahmen für die nationale Klimapolitik. In Deutschland geschieht dies durch ein Bündel von Gesetzen, Programmen und Strategien, die seit dem Pariser Abkommen kontinuierlich erweitert und angepasst wurden.

Die deutschen Treibhausgasreduzierungsziele sind im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) festgelegt (Bundesrepublik Deutschland 2019a). Das KSG aus dem Jahr 2019 legt verbindliche sektorale Emissionsziele für Bereiche wie Energie, Industrie, Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft und Abfallwirtschaft fest. Es schreibt eine jährliche Überprüfung und ggf. Nachsteuerung bei Zielverfehlung vor. Mit der Novelle vom Juli 2024 wurde das KSG erneut angepasst (Bundesrepublik Deutschland 2019b). Neu ist insbesondere, dass die Nachsteuerung künftig auf einer sektorübergreifenden Gesamtbetrachtung der Emissionsmengen basiert und nicht mehr auf einzelnen Sektorzielen. Zudem wurde erstmals die Verpflichtung aufgenommen, einen Beitrag technischer Senken für die Jahre 2035, 2040 und 2045 zu entwickeln (Paragraf 3b des KSG) (Bundesrepublik Deutschland 2019a). Damit erkennt das Gesetz an, dass neben natürlichen Senken (wie Wäldern) auch technische Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung eine wichtige Rolle beim Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen spielen können. Diese Zielsetzung soll auf Basis einer Langfriststrategie zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen erfolgen. In diesem Zusammenhang wurde bereits ein Eckpunktepapier mit dem Titel „Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen“ (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2024c), sowie Eckpunkte für eine Carbon Management Strategie (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2024b) veröffentlicht. Im Eckpunktepapier zur Carbon Management Strategie der Bundesregierung wird angekündigt, die rechtlichen Hürden für die Anwendung von CCS/CCU in Deutschland zu beseitigen und die Rahmenbedingungen für den Hochlauf dieser Technologien zu schaffen. Auch die Bundesländer und Kommunen entwickeln teils eigene Klimaschutzstrategien. So hat beispielsweise das Land Nordrhein-Westfalen eine eigene Carbon Management Strategie entwickelt (Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen 2021).

Ein weiteres zentrales, zunächst nationales Instrument ist das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) (Bundesrepublik Deutschland 2019b), das seit 2021 eine nationale CO₂-Bepreisung für die Sektoren Wärme und Verkehr einführt – zunächst bis 2025 über Festpreise. Ab 2026 soll ein nationaler Emissionshandel entstehen, welcher ab 2027 in das EU-ETS 2 überführt werden soll.

Das bestehende Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) (Bundesrepublik Deutschland 2012) regelt in Deutschland die Erprobung und Demonstration der geologischen Speicherung von CO₂. Die CO₂-Speicherung an Land ist faktisch ausgeschlossen. Der Umgang mit einer eventuellen CO₂-Infrastruktur ist daher derzeit als sehr restriktiv anzusehen. Zusätzlich können Bundesländer die Speicherung von CO₂ in ihrem Gebiet teilweise untersagen. Eine umfassende Novelle ist in Vorbereitung (Kohlendioxid-Speicherungs- und Transportgesetz, KSpTG) (Bundesregierung n.d.), die künftig auch die Nutzung und Speicherung von CO₂ aus schwer vermeidbaren industriellen Quellen sowie den Aufbau von CO₂-Transportinfrastruktur ermöglichen soll.

Hervorgegangen aus dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) der Bundesregierung von Olaf Scholz wurden im Februar 2024 Eckpunkte einer Carbon Management-Strategie (CMS) (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2024b) veröffentlicht. Damit wurde ein wichtiger Impuls für die Zukunft von CCS und CCU gesetzt. Die Erarbeitung der Eckpunkte erfolgte auf Grundlage eines breit angelegten Stakeholderdialogs mit Vertreterinnen und Vertretern aus Zivilgesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft. Nach der Ressortabstimmung und Anhörung der Länder und Verbände wurde das Papier am 29. Mai 2024 vom Bundeskabinett verabschiedet. Die Eckpunkte definieren den politischen Rahmen für den zukünftigen Umgang mit Carbon Management in Deutschland. Sie markieren nicht nur den Auftakt für die Ausarbeitung einer umfassenden Carbon Management-Strategie, sondern könnten auch als Richtschnur für kommende gesetzgeberische Initiativen dienen. Ziel ist es, die Rolle von CCU und CCS als komplementäre Instrumente zur Emissionsreduktion zu konkretisieren – insbesondere in schwer vermeidbaren industriellen Prozessen – und die erforderlichen Rahmenbedingungen für deren verantwortungsvollen und effektiven



Einsatz zu schaffen. Zentraler Bestandteil der künftigen Strategie wird die Identifikation relevanter Anwendungsfelder sowie der Aufbau einer tragfähigen Infrastruktur sein. Dabei sollen ökologische, ökonomische und rechtliche Voraussetzungen so gestaltet werden, dass sowohl Innovationspotenziale erschlossen als auch Umwelt- und Sicherheitsaspekte angemessen berücksichtigt werden (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2024a, 2024b).

2. Petro-chemische Wertschöpfungsketten

Die petrochemische Industrie ist ein zentraler Bestandteil der modernen Wirtschaft und liefert essenzielle chemische Grundstoffe für eine Vielzahl von Industrien. Kunststoffe, Düngemittel, Arzneimittel oder Kraftstoffe – viele dieser Produkte basieren auf Kohlenstoffverbindungen, die aktuell nahezu ausschließlich aus fossilen Rohstoffen wie Erdöl und Erdgas gewonnen werden. Vor dem Hintergrund globaler Klimaschutzbemühungen stellt sich die Frage, inwiefern eine Reduktion der THG-Emissionen in der Petrochemie möglich ist.

Kohlenstoff bildet die chemische Basis der meisten petrochemischen Produkte. Er ist ein elementarer Bestandteil von organischen Molekülen und somit unersetzlich für die Herstellung der genannten chemischen Produkte. Während in der Energiewirtschaft eine vollständige Dekarbonisierung durch erneuerbare Energiequellen möglich ist, liegt der Fokus in der Petrochemie auf der Defossilisierung, also dem Ersatz fossiler Rohstoffe und Energien durch alternative Kohlenstoff- und Energiequellen. Die CO₂-Emissionen der petrochemischen Industrie lassen sich in zwei Hauptkategorien unterteilen:

- **Energiebedingte Emissionen:** Diese entstehen durch die Verbrennung von Energieträger zur Bereitstellung von Prozessenergie. Die Emissionen können dabei am Produktionsstandort oder bei einem Energielieferanten anfallen. Beispiele sind die Dampfreformierung von Methan oder die Verbrennung von Heizöl zur Dampferzeugung. In besonderen Fällen können energiebedingte Emissionen auch als Teil von Prozessemissionen anfallen, wenn im Prozess Rohstoffe teilverbrannt werden, um die benötigte Energie bereitzustellen.
- **Prozessbedingte und rohstoffbedingte Emissionen:** Diese Emission lassen sich im Gegensatz zu den energiebedingten Emissionen durch den Einsatz von erneuerbaren Energien nicht vermeiden. Prozessbedingte und rohstoffbedingte Emissionen entstehen durch die stoffliche Nutzung von kohlenstoffhaltigen Rohstoffen, so dass unvermeidbar CO₂ oder andere THG als Nebenprodukt entstehen. Die Verwendung der Rohstoffe ist hierbei eng mit den verfügbaren Prozessen verknüpft, da alternative Rohstoffe meistens auch alternative Prozesse bedingen. Ein Beispiel für prozess- bzw. rohstoffbedingter Emissionen ist die CO₂-Freisetzung bei der Spaltung von Kalkstein zur Klinkerproduktion. Dabei wird Calciumoxid (Branntkalk) unter anderem für die Zementherstellung gewonnen, während das freigesetzte CO₂ direkt aus dem Rohstoff stammt und nicht durch eine Verbrennungsreaktion entsteht.

Im Gegensatz zu anderen Branchen werden die rohstoffbedingten Treibhausgasemissionen in der chemischen Industrie im EU-ETS nicht immer dort erfasst, wo sie tatsächlich entstehen. Im Fall der Harnstoffproduktion reagiert Ammoniak (NH₃) mit CO₂, das zuvor im sogenannten Dampfreformer erzeugt wurde. Obwohl das CO₂ in diesem Prozess als Rohstoff genutzt wird, wird es den Emissionen der Düngemittelproduktion zugerechnet – tatsächlich wird es aber erst bei der späteren Nutzung in der Landwirtschaft freigesetzt (Ausfelder, Herrmann, and López González 2022).

Alternativen Rohstoffe werden aktuell noch nicht in größerem Maße in die bestehenden Wertschöpfungsketten integriert. Stattdessen werden im kleinen Maßstab direkt Grundchemikalien wie Methanol oder Spezialchemikalien erzeugt, die häufig eigene Infrastrukturen für Aufarbeitung und Weiterverarbeitung der Produkte besitzen.

2.1. Produktion von Grundchemikalien

Die petrochemischen Wertschöpfungsketten beginnen mit der Gewinnung fossiler Rohstoffe, vornehmlich Erdöl und Erdgas. Diese Rohstoffe werden in Raffinerien und petrochemischen Anlagen weiterverarbeitet, um verschiedene Kohlenwasserstoffe zu erzeugen. Eine zentrale Rolle spielt dabei die fraktionierte Destillation von Rohöl, die unterschiedliche Destillate wie Naphtha, Benzin und Schweröle liefert. Die leichten Kohlenwasserstoffe wie Methan, Ethan und Propen werden oft durch Steamcracken oder katalytisches Cracken weiterverarbeitet, um wertvolle petrochemische Grundstoffe zu erzeugen.

Die Herstellung von Grundchemikalien aus Erdöl und Erdgas erfolgt über verschiedene chemisch-technischen Prozesse, welche fossile Rohstoffe in wichtige Ausgangsstoffe für die chemische Industrie umwandeln. Zu den wichtigsten Verfahren zählen:



- **Steamcracken** (Dampfcracken): Erdölfraktionen wie Naphtha oder Gase wie Ethan und Propan werden bei 800 bis 900 °C in Gegenwart von Wasserdampf thermisch gespalten, um Produkte wie Ethylen, Propylen, Butadien und BTX-Aromaten (Benzol, Toluol, Xylol) zu erhalten. Es ist das wichtigste Verfahren zur Herstellung von Grundchemikalien für Kunststoffe, Lösungsmittel und weitere organische Verbindungen.
- **Dampfpreformierung von Methan** (SMR): Bei der Dampfpreformierung von Methan (SMR) wird Erdgas mit Wasserdampf zu einem Wasserstoff- und Kohlenmonoxid-haltigen Rohgas (Synthesegas) umgesetzt. Das Synthesegas⁹ dient als Ausgangsgemisch für Grundchemikalien wie Methanol oder Fischer-Tropsch-Produkte (mit entsprechend eingestelltem H₂/CO-Verhältnis). Über eine nachgeschaltete Wassergas-Shift entsteht zusätzlich CO₂ und mehr H₂. SMR ist derzeit das weltweit wichtigste Verfahren zur Wasserstoffproduktion.
- **Fischer-Tropsch-Synthese** (FT): Durch die Umsetzung von Synthesegas zu längeren Kohlenwasserstoffketten werden bei der FT-Synthese synthetische Kraft- und Treibstoffe wie zum Beispiel Diesel und Kerosin, und Wachse gewonnen. Aktuell wird vor allem Synthesegas aus fossilen Quellen eingesetzt.

In Abbildung 5 wird der Aufbau der (petro-)chemischen Industrie aufgezeigt, ausgehend von den Kohlenstoffquellen bis hin zu den Zwischen- und Hauptprodukten. In der obersten Zeile sind die derzeitigen Kohlenstoffquellen angegeben:

- die fossilen Quellen Erdöl und Erdgas,
- die biogenen Quellen Biomethan, Bioethanol und Bionaphtha,
- chemisches Recycling bzw. Pyrolyseöle,
- CO₂ + H₂, wobei CO₂ hier sowohl fossil, biogen oder abgetrennt aus Industrieprozessen oder der Atmosphäre sein kann.

Durch verschiedene Aufarbeitungsprozesse, zu denen beispielsweise der Fischer-Tropsch-Prozess oder eine Raffination zählt, werden die Rohstoffe in die chemischen Grundstoffe Methanol, Methan, Propan, Ethan und Naphtha überführt. Diese stehen nun für Folgeprozesse zur Verfügung. Produkte der Erdölraffinerie sind zum Beispiel Benzin, Kerosin, Diesel, Gas- und Heizöl, Schmierstoffe und Asphalt, welche direkte Marktanwendung finden.

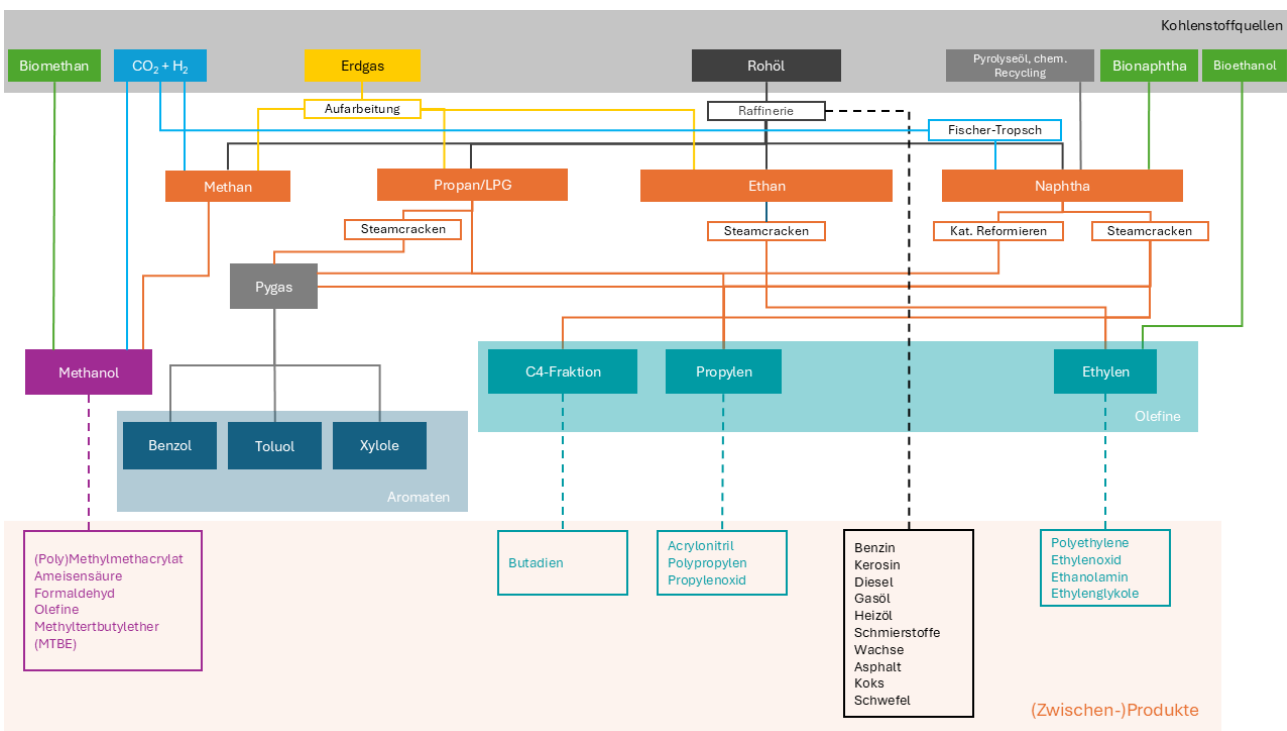


Abbildung 5: Vereinfachte Darstellung der Kohlenstoffquellen sowie (Zwischen-)Produkte der (petro-)chemischen Industrie, eigene Darstellung in Anlehnung an petrochemicals europe (petrochemicals europe 2023).

⁹ Entgegen der teilweise gebräuchlichen genau definierten Zusammensetzung wird Synthesegas im Folgenden für beliebige Mischungsverhältnisse von H₂ und CO (meist zusätzlich mit CO₂, H₂O u.a. durchsetzt) verwendet. Je nach Prozessbedarf kann das Verhältnis angepasst werden.



Prozesse, wie etwa Steamcracken und katalytisches Reformieren, ermöglichen die Produktion von Olefinen und Aromaten. Diese stellen die Ausgangsstoffe für verschiedenste chemische Produkte dar. Die Anwendungsgebiete sind dabei sehr vielfältig, zu ihnen zählen beispielsweise Düngemittel, Kunststoffverpackungen, Kosmetika, Farben und Lacke sowie Spezialchemikalien. Alternativen Rohstoffe werden aktuell noch nicht in größerem Maße in die bestehenden Wertschöpfungsketten integriert. Stattdessen werden im kleinen Maßstab direkt Grundchemikalien wie Methanol oder Spezialchemikalien erzeugt, die häufig eigene Infrastrukturen für Aufarbeitung und Weiterverarbeitung der Produkte besitzen.

2.2. Produktionsprozesse zentraler (petro-)chemischer Grundstoffe

Die petrochemische Industrie produziert eine Vielzahl von Grundchemikalien, die als Ausgangsstoffe für weiterverarbeitende Industrien dienen. Nachfolgend werden einige der wichtigsten Chemikalien und deren konventionellen Herstellungsverfahren betrachtet. Treibhausgasneutrale Alternativen zu den hier beschriebenen Prozessen auf Basis von erneuerbaren Energien sowie den alternativen Kohlenstoffquellen Biomasse, Kunststoffabfällen und CO_2 sind im Kapitel 4 erläutert.

2.2.1. Methanol

Methanol ist eine zentrale Plattformchemikalie, die für die Herstellung von Formaldehyd, Essigsäure und Kraftstoffzusätzen genutzt wird. Die Produktion erfolgt hauptsächlich aus Synthesegas, welches durch die Dampfreformierung von Erdgas erzeugt wird. Daran schließt sich eine Wassergas-Shift-Reaktion an, bei der das Verhältnis von CO zu H_2 für die Methanolsynthese eingestellt wird.

2.2.2. Ammoniak

Ammoniak ist eine der wichtigsten chemischen Verbindungen, insbesondere für die Düngemittelproduktion. Die industrielle Herstellung erfolgt durch das Haber-Bosch-Verfahren, bei dem Stickstoff aus der Luft mit Wasserstoff unter hohem Druck und Temperatur zu Ammoniak reagiert. Die Wasserstoffgewinnung basiert aktuell meist auf der Dampfreformierung oder auf partieller Oxidation von Methan und ist hochgradig in die Anlage zur Ammoniaksynthese integriert.

2.2.3. Harnstoff

Harnstoff ist ein zentraler Grundstoff für die Düngemittelproduktion und wird in großen Mengen in der Landwirtschaft eingesetzt. Die Herstellung erfolgt in einem zweistufigen Prozess aus Ammoniak und CO_2 . Das benötigte Ammoniak stammt üblicherweise aus dem Haber-Bosch-Verfahren, während das Kohlendioxid als Nebenprodukt bei der Wasserstoffproduktion durch Dampfreformierung von Methan anfällt.

2.2.4. Ethylen, Propylen und Butadien

Diese Olefine sind essenzielle Bausteine für die Kunststoffproduktion. Sie werden hauptsächlich durch Steamcracken von Naphtha oder Ethan hergestellt, wobei lange Kohlenwasserstoffketten bei hohen Temperaturen unter Anwesenheit von Wasserdampf gespalten werden. Je nachdem welcher Rohstoff eingesetzt wird und welche Temperatur gewählt wird, verändert sich das Produktgemisch des Steamcrackers.

2.2.5. BTX-Aromaten (Benzol, Toluol, Xylol)

BTX-Verbindungen sind wichtige Ausgangsstoffe für die Produktion von Kunststoffen, Lösungsmitteln und Pharmazeutika. Sie entstehen typischerweise durch katalytisches Reforming oder als Nebenprodukte beim Steamcracken.

2.3. Aktuelle Kohlenstoffbedarfe der chemischen Industrie

Um zu berechnen, ob alternativen Kohlenstoffquellen den zukünftigen Bedarf decken können, müssen zunächst die aktuellen Kohlenstoffbedarfe der chemischen Industrie erfasst werden. Der jährliche Kohlenstoffbedarf der chemischen Industrie resultiert aus der Summe des Kohlenstoffs aller Produkte. Im Fokus dieser Betrachtung stehen Grundchemikalien, da diese die Ausgangsbasis für zahlreiche Folgeprodukte darstellen. Werden diese über alternative Routen mit nicht-fossilem Kohlenstoff produziert, so können auch alle Folgeprodukte als fossilfrei gelten.

Für die Grundchemikalien Ethylen, Propylen, C₄-Produkte, Benzol, Toluol, Xylol, Methanol und Harnstoff wurden die Produktionsdaten für Deutschland und der Europäischen Union über den Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Kaspar et al. 2024;



Verband der Chemischen Industrie (VCI 2024) bzw. die PRODCOM-Datenbank von Eurostat (eurostat 2025), sowie Daten der IFA (International Fertilizer Association (IFA) 2024) ermittelt (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Produktionsvolumina von Grundchemikalien in Deutschland und der EU 27 für das Jahr 2023 in (kt) nach Angaben des VCI (Kaspar et al. 2024), der IFA (International Fertilizer Association (IFA) 2024), sowie der PRODCOM-Datenbank (eurostat 2025).

| Grundstoffchemikalien | Deutschland | | EU27 | |
|-----------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| | Produktionsmenge in kt | Kohlenstoffgehalt in kt | Produktionsmenge in kt | Kohlenstoffgehalt in kt |
| Ethylen | 3.900 | 3.300 | 10.800 | 9.200 |
| Propylen | 2.900 | 2.500 | 9.200 | 7.900 |
| C4-Produkte | 1.900 | 1.600 | 4.100 | 3.500 |
| Benzol | 1.200 | 1.100 | 4.800 | 4.400 |
| Toluol | 500 | 500 | 1.200 | 1.100 |
| o- und p-Xylol | 400 | 400 | 800 | 700 |
| Methanol | 900 | 300 | 8.500 | 3.200 |
| Harnstoff | 1.900 | 400 | 5.800 | 1.200 |

Der enthaltene Kohlenstoff in den Produkten wurde stöchiometrisch ermittelt. So lässt sich zum Beispiel der enthaltene Kohlenstoff der Gesamtproduktion von Methanol (CH_3OH), über die molaren Massen (M [g/mol]) von Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) berechnen (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Molare Masse von Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff.

| | Kohlenstoff | Wasserstoff | Sauerstoff |
|-----------------------|-------------|-------------|------------|
| Molare Masse in g/mol | 12,0107 | 1,00794 | 15,9994 |

Daraus ergibt sich insgesamt ein Kohlenstoffbedarf für die folgende Analyse (siehe Kapitel 5) dieser Grundchemikalien von etwa 10,1 Mt C in Deutschland und 31,2 Mt C in der Europäischen Union im Jahr 2023.





3. Alternative Kohlenstoffquellen

In diesem Kapitel werden Möglichkeiten der Erschließung und Integration alternativer Kohlenstoffquellen für die Herstellung der bereits genannten Grundchemikalien aufgeführt. Es werden Prozesse des Kunststoffrecyclings, sowie Biomasse und CO₂-Abscheidung betrachtet. Dabei kann die Abscheidung von CO₂ am Ende verschiedener Prozessketten und Produkte stehen. So kann zum Beispiel CO₂ durch die Verbrennung von Kunststoffen in der Müllverbrennung entstehen, welche abgeschieden werden könnten. Das gleiche gilt für CO₂ aus biogenen Prozessen.

Für die folgende Betrachtung sind Kohlenstoffquellen und Prozesse von Interesse, bei denen Synthesegas, Methanol und Naphtha-ähnliche Produkte hergestellt werden können, die jeweils für die Weiterverarbeitung im Cracker geeignet sind. Diese dienen als Basis für die sogenannten Grundchemikalien und können in das bestehende Produktionsnetzwerk eingebracht werden. Bei dieser Betrachtungsweise bleiben die finalen Konsumartikel gleich. Während der Transformation des Rohstoffeintrags von fossilen Rohstoffen hin zu einer Kreislaufführung von Kohlenstoff kann durch eine allgemeine Massenbilanz erfasst werden, welchen Anteil nicht-fossiler Kohlenstoff im System einnimmt.

Als alternative Kohlenstoffquellen zählen Biomasse, Kunststoffabfälle, sowie CO₂, das bspw. aus industriellen Punktquellen oder der Luft abgetrennt werden kann. Diese Kohlenstoffquellen werden aktuell nur im kleinen Maßstab genutzt und könnten fossile Rohstoffe substituieren. Der Kohlenstoff aus diesen Quellen kann gezielt dort bereitgestellt werden, wo die Industrie ihn benötigt (International Energy Agency 2019), was zu einer stärkeren Verknüpfung verschiedener Industriesektoren führen kann. Mit diesem Kohlenstoff und grünem Wasserstoff könnten e-Fuels, aber auch langlebigere Produkte der chemischen Industrie, hergestellt werden. Mit klimaneutral bewertetem CO₂ und Wasserstoff könnte beispielsweise erneuerbares Methanol als ein Ausgangsstoff für viele Endprodukte hergestellt werden. Schätzungen zufolge wird die jährliche weltweite Nachfrage nach Chemikalien und daraus hergestellten Materialien bis zum Jahr 2050 auf etwa 1.000 Mt/a Kohlenstoff ansteigen (European Commission on behalf of the European Union 2024b; Kähler et al. 2021). Wenn solche Produkte am Ende ihrer Lebensdauer recycelt werden, kann derselbe Kohlenstoff aufgefangen und wiederverwendet werden, was zu einer zirkulären Nutzung des Kohlenstoffs führt. Wird der Kohlenstoff eines CCU-Produkts nicht wieder freigegeben, könnten je nach gesetzter Bilanzgrenze sogar negative Emissionen erzielt werden.

Um in der chemischen Industrie auf fossile Rohstoffe verzichten zu können, müssen folglich die alternativen Kohlenstoffquellen identifiziert und erschlossen werden, die aus Nachhaltigkeitsgründen und wirtschaftlicher Sicht am sinnvollsten sind. Die generellen Möglichkeiten zur Erschließung von alternativen Kohlenstoffquellen sind in der Abbildung 6 aufgeführt.

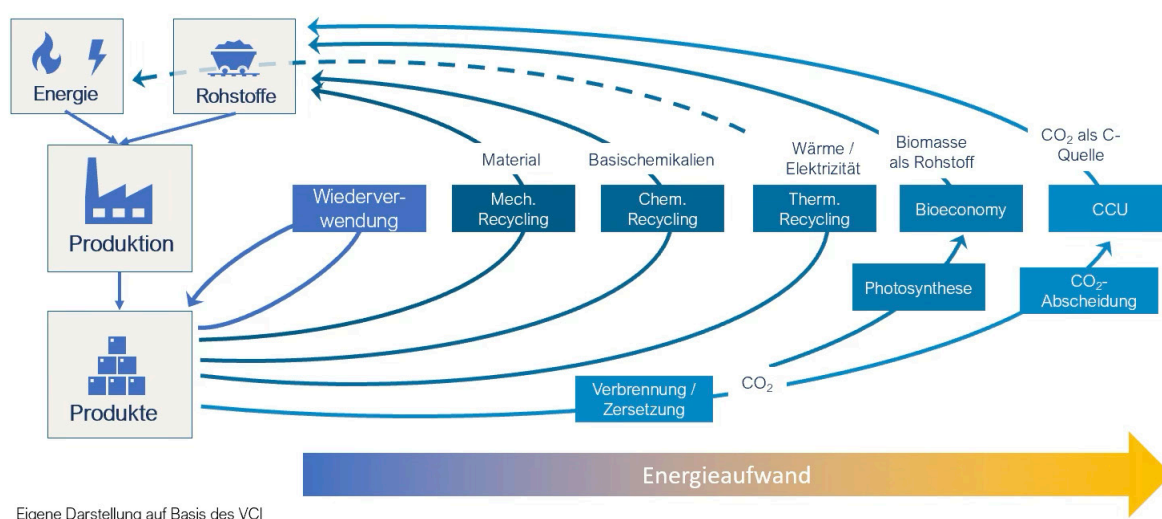


Abbildung 6: Rohstoffwende der chemischen Industrie – Alternative Kohlenstoffquellen erschließen. Eigene Darstellung nach (Verband der Chemischen Industrie (VCI) 2023).



3.1. Biomasse

Biomasse bezeichnet organische Stoffe biogenen Ursprungs, darunter pflanzliche und tierische Materialien sowie biologisch abbaubare Rückstände und Abfälle. Gemäß Definition der Europäischen Union, insbesondere in der Richtlinie (EU) 2018/2001 (RED II), gilt nur der biologisch abbaubare Anteil von Produkten, Abfällen und Reststoffen als Biomasse im Sinne der energetischen Nutzung. Im Gegensatz zu fossilen Rohstoffen wie Erdöl, Erdgas oder Kohle ist Biomasse ein erneuerbarer Kohlenstoffträger. Der Kohlenstoffgehalt von Biomasse liegt, bezogen auf die Trockenmasse (TM), je nach Art zwischen etwa 25 % (biogene Reststoffe/Abfälle) und rund 50 % (feste biogene Rohstoffe) (Kaltschmitt, Hartmann, and Hofbauer (Hrsg.) 2016). Pflanzen nehmen während ihres Wachstums Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf und wandeln dieses mittels Photosynthese in organische Kohlenstoffverbindungen um. Wird diese Biomasse genutzt, kann der enthaltene Kohlenstoff als klimaneutral gelten, wenn bei der Nutzung kein zusätzlicher Kohlenstoff aus natürlichen Senken dauerhaft freigesetzt wird. Die CO₂-Emissionen aus der Nutzung entsprechen idealerweise dem CO₂, das zuvor durch das Pflanzenwachstum gebunden wurde. Eine tatsächliche Klimaneutralität liegt jedoch nur dann vor, wenn durch Ernte, Nutzung und Verwertung keine langfristigen Minderungen der Kohlenstoffvorräte entsteht und der Verlust durch nachwachsende Biomasse im Bewertungszeitraum ausgeglichen wird.

Nicht berücksichtigt in dieser Definition sind weitere THG-Emissionen, die entlang der Wertschöpfungskette anfallen können. Gesetzlich ist insbesondere im Energiebereich die Betrachtung der gesamten Lebenszykluskette vorgeschrieben (vgl. RED II) (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2025). Eine vollständige Klimaneutralität kann daher nur durch eine nachhaltige, umwelt- und naturschutzverträgliche Erzeugung der Biomasse erreicht werden. Aus gesamtsystemischer Perspektive ist es daher auch langfristig erforderlich, dass natürliche Kohlenstoffsinken mehr CO₂ speichern als freisetzen. Biogener Kohlenstoff ist nur begrenzt nachhaltig verfügbar, bildet aber eine wertvolle Ergänzung zu anderen Strategien für eine klimaneutrale (Ausfelder et al. 2023) Transformation chemischer Rohstoffe.

Zusätzlich sollte bedacht werden, dass sich zukünftige Landnutzungen ändern können, auch bei heute nachhaltig bewirtschafteten Flächen. Solche Veränderungen können potenziell zu höheren THG-Emissionen führen. Beispielsweise kann eine verstärkte Holzentnahme aus Wäldern, die in Vegetation und Böden gespeicherte Kohlenstoffmenge reduzieren. Dies schwächt die Senkenleistung und kann die Nutzung von Biomasse klimatisch negativ beeinflussen (Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Strategien für eine nachhaltige Bioenergienutzung 2019).

3.1.1. Biomassepotenziale in Deutschland und der EU

Aktuell wird nur ein Teil der insgesamt theoretisch zur Verfügung stehenden Biomasse auch genutzt. Daher wird bei diesem theoretischen Potenzial zunächst meist zwischen einem technischen Potenzial, das genutzt wird oder durch den Einsatz von Technologien nutzbar gemacht werden könnte, und einem nicht mobilisierbaren, also voraussichtlich langfristig nicht nutzbaren, Potenzial unterschieden (vgl. Abbildung 7).

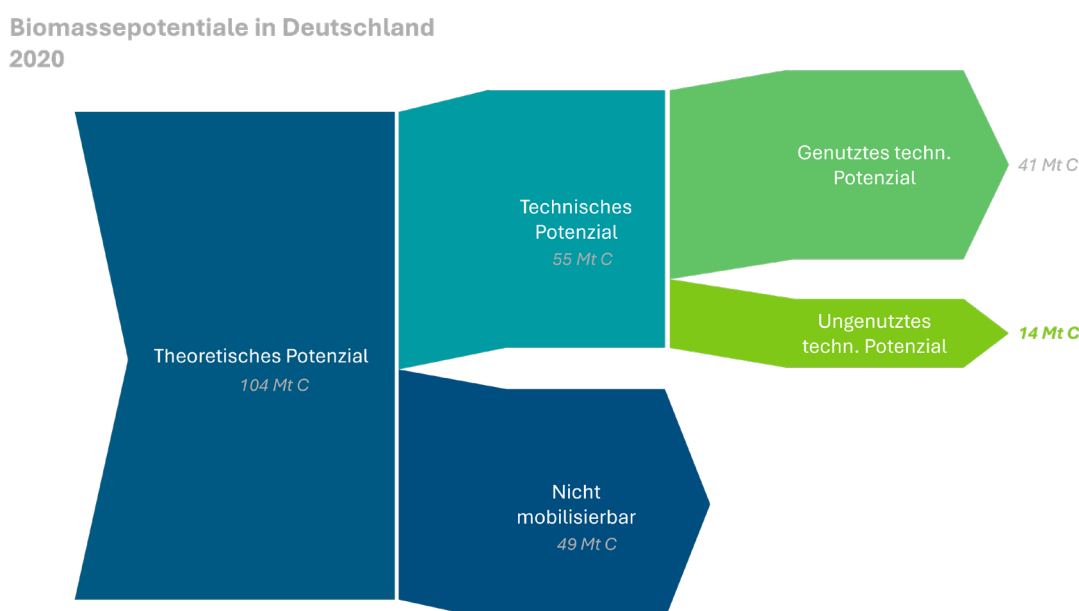


Abbildung 7: Gemittelte Biomassepotenziale in Mt Kohlenstoff in Deutschland im Jahr 2020 (Naegeli de Torres et al. 2024). Eigene Darstellung.



Innerhalb des technischen Potenzials kann noch zwischen genutztem und ungenutztem Potenzial unterschieden werden. Dieses dient als Abschätzung für die Berechnung der Szenarien (vgl. Kapitel 5.1.2). Für Deutschland wurde dabei ein Biomassepotenzial von etwa auf etwa 28 Mt TM/a angenommen und liegt damit bei 14 Mt Kohlenstoff pro Jahr, wobei hier davon ausgegangen wurde, dass diese Biomasse einen Kohlenstoffgehalt von rund 50 % hat. Für die Europäische Union beläuft sich das Potenzial auf rund 143 Mt TM/a (bzw. 72 Mt Kohlenstoff pro Jahr) (European Environment Agency 2023; Naegeli de Torres et al. 2024). Grundsätzlich sollte die in Zukunft eingesetzte Biomasse nachhaltiger Natur sein. Das für die chemische Industrie relevante Biomassepotenzial umfasst vor allem bislang das ungenutzte technische Potenzial, da dieses im Vergleich zu anderen Biomassequellen weniger Nutzungskonflikte aufweist. Derzeit liegen jedoch keine Daten zum nachhaltig bewirtschafteten technischen Potenzial vor, sodass davon auszugehen ist, dass das ausgehende ungenutzte Potenzial in diesem Fall geringer ausfallen würde. Alle genannten Potenzialangaben in diesem Kapitel umfassen Mittelwerte aus Literaturquellen. Deutschland ist Netto-Importeur von Biomasse. Der heimische Bedarf übersteigt die inländische Erzeugung, sodass erhebliche Mengen an Agrarrohstoffen, Futtermitteln und verarbeitete Biomasseprodukte importiert werden. Mit diesem Hintergrund kann eine nachhaltige Biomasse-nutzung nur auf globaler Ebene erfolgen. (Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Strategien für eine nachhaltige Bioenergienutzung 2019).

Als Kohlenstoffquelle für die rohstoffliche Biomassenutzung eignen sich insbesondere holzartige Biomassen sowie organische Rest- und Abfallstoffe. Die nachfolgend näher beschriebenen Biomassearten sind in Tabelle 3 zusammengefasst und werden bezüglich ihrer Eigenschaften und Potenziale für die Chemieindustrie gegenübergestellt. Nachwachsende Rohstoffe (NaWaRos), die gezielt für industrielle, energetische und stoffliche Zwecke angebaut werden, trugen 2022 in Deutschland etwa zu 13 % (0,97 Mt C) zum stofflich eingesetzten Kohlenstoff in der chemischen Industrie bei (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2025).

Tabelle 3: Übersicht über Biomassearten, deren Quellen, Eigenschaften und Nutzungspotenziale für die Chemieindustrie.

| Biomasseart | Typische Quellen | Eigenschaften | Potenzial für die Chemieindustrie |
|------------------------------|--|--|---|
| Landwirtschaftliche Biomasse | Getreide, Mais, Ölfrüchte, tierische Nebenprodukte | Hoher Stärke- und Zuckergehalt und gute Fermentationseigenschaften | Hohes technisches Potenzial, jedoch Nutzungskonkurrenz und limitierende Einsatzmenge |
| Holzartige Biomasse | Rundholz, Wald-Industrierestholz | Hoher holzartiger Anteil (Lignocellulosegehalt), schwankende Verfügbarkeit | Relevant für holzbasierte Bioraffineriekonzepte |
| Sekundäre Biomasse | Stroh, Ernterückstände, Bioabfälle, Gärreste, organische Nebenprodukte | Heterogene Zusammensetzung, potenzielle Schadstoffbelastungen, nachhaltige Biomassenutzung | Geeignete Kohlenstoffquelle, begrenzte technische Verfügbarkeit aufgrund logistischer Herausforderung |
| NaWaRos | Raps, Mais, Pappel, Weide | Zielgerichteter Anbau, homogene Qualität, aber oft Monokulturen mit negativen Umweltauswirkungen | Derzeit kleinerer Beitrag, langfristig als Ergänzung zu Rest- und Abfallbiomasse relevant. |

Landwirtschaftliche Biomasse stellt derzeit (2023) mengenmäßig die bedeutendste Form der Biomassenutzung dar. Ein wesentlicher Teil entfällt auf den Anbau von Mais, der vorwiegend in Biogasanlagen zur Methangewinnung für die Energieerzeugung eingesetzt wird. Eine stoffliche Nutzung ist beispielsweise durch die Aufbereitung zu Biomethan möglich. Das dabei entstehende CO₂ kann für CCUS-Anwendungen genutzt werden (vgl. Kapitel 3.3.2).

Im Vergleich zur landwirtschaftlichen Biomasse enthält holzartige Biomasse einen niedrigeren Aschegehalt, einen höheren Brennwert sowie Kohlenstoffgehalt, wodurch sich diese vorzugsweise für die Anwendung in thermochemischen Vergasungs-



anlagen und damit zur Synthesegaserzeugung eignet. Zudem ist holzartige Biomasse für die Herstellung von Grundchemikalien besonderes relevant, da sie fermentiert, vergast sowie pyrolysiert werden kann, um Alkohole, Synthesegase und Bionaphtha zu produzieren (Akhmetova et al. 2025). Nach Mengenangaben aus der im Jahr 2022 in Deutschland genutzten holzartigen Biomasse fallen rund 5 Mt TM (2,5 Mt C) als ungenutztes technisches Potenzial an (destatis 2025; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2025).

Sekundäre Biomassen umfassen biogene Abfälle, Reststoffe sowie Nebenprodukte und stehen im Gegensatz zu primär angebaute Biomasse, wie landwirtschaftliche Biomasse, nicht in direkter Nutzungskonkurrenz mit anderen Sektoren wie der Nahrungs- und Futtermittelproduktion. Ihre rohstoffliche Nutzung würde somit eine ressourcenschonendere Verwertung biogener Materialien ermöglichen und das Prinzip der Nutzungshierarchie (vgl. Kapitel 3.1.5) verfolgen. Das technisch genutzte Potenzial der sekundären Biomasse beträgt in Deutschland rund 52 Mt TM/a (18 bis 26 Mt Kohlenstoff pro Jahr)¹⁰ und das ungenutzte technische Biomassepotenzial, welches für die chemische Industrie zusätzlich in Frage kommen würde, beläuft sich auf 16 Mt TM/a (4 bis 8 Mt Kohlenstoff pro Jahr) (Naegeli de Torres et al. 2024).

Im Jahr 2023 wurden in Deutschland rund 2 Mt nachwachsende Rohstoffe in der chemischen Industrie rohstofflich verwendet (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2025; Verband der Chemischen Industrie 2025). Im Wesentlichen waren dies Fette und Öle sowie Kohlenhydrate. Diese Substanzen dienen direkt als Einsatzstoffe für Spezialchemikalien und nicht zur Herstellung von Grundchemikalien. Das in Abbildung 8 dargestellte Gesamtpotenzial, würde theoretisch ausreichen, den Bedarf der chemischen Industrie vollständig zu decken. Allerdings reicht die, für die industrielle Nutzung relevante ungenutzte, sekundäre Biomasse allein nicht aus, um diese Nachfrage zu erfüllen. Zudem wurden bei der Potenzialermittlung weder Nutzungskonkurrenzen, etwa anderer Industriezweige, noch Transportaspekte berücksichtigt. Deshalb ist davon auszugehen, dass weniger als 4 Mt Kohlenstoff pro Jahr aus ungenutzter sekundärer Biomasse verfügbar wären. Für eine realistische Einschätzung sollten auch zukünftig Entwicklungspotenziale biogener Rohstoffe berücksichtigt werden. Mögliche Szenarien zur zukünftigen Kohlenstoffbereitstellung aus Biomasse werden in Kapitel 5.1.2 näher erläutert.

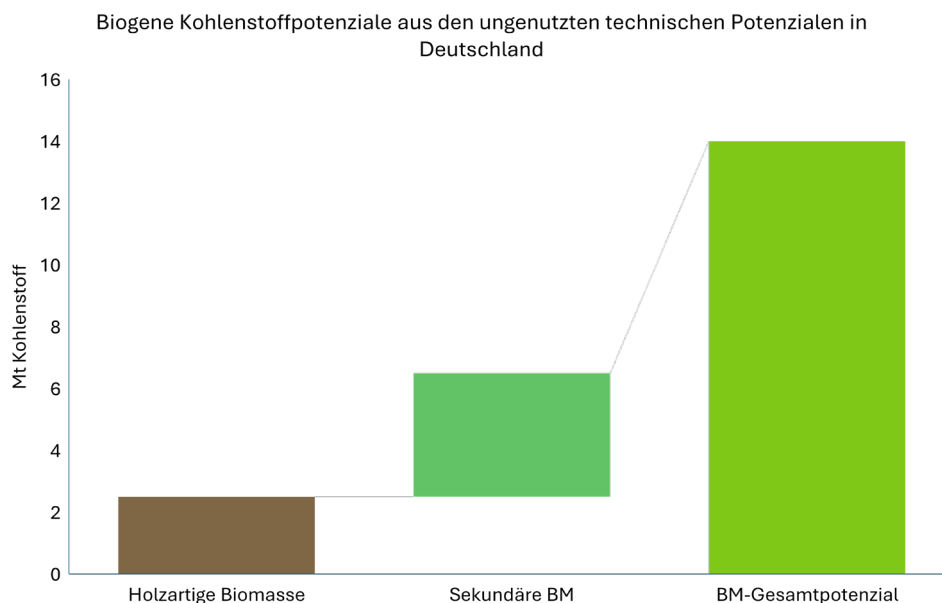


Abbildung 8: Vergleich der ungenutzten biogenen Kohlenstoffpotenziale, der für die chemischen Industrie ermittelten, relevanten Biomassearten für Deutschland. BM: Biomasse.

3.1.2. Perspektivische Entwicklung von Biomasseverfügbarkeiten

Eine zunehmende stoffliche Nutzung von Biomasse kann das verfügbare Angebot verknappen und infolgedessen zu steigenden Marktpreisen führen. Daher besteht die Notwendigkeit, bislang ungenutzte Biomasseströme stärker miteinzubeziehen. Um Nutzungskonflikte mit der Nahrungsmittelproduktion zu vermeiden, sollten perspektivisch vor allem Rest- und Abfallstoffe, also

¹⁰ Aufgrund der nicht erschließbaren Zusammensetzung der sekundären Biomasse, wird für den Kohlenstoffgehalt eine Spanne angegeben, da pflanzliche Abfälle und Abwässer einen niedrigeren Kohlenstoffgehalt aufweisen als holzartige Biomasseabfälle.



sekundäre Biomassen, zur stofflichen Nutzung herangezogen werden (Landesgesellschaft für Energie und Klimaschutz. NRW. ENERGY4CLIMATE 2023). Insbesondere die Art und Weise der Rohstoffbereitstellung hat einen erheblichen Einfluss auf die ökologische Bilanz biogener Rohstoffe (Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Strategien für eine nachhaltige Bioenergienutzung 2019). Zum Beispiel gelten landwirtschaftliche Reststoffe wie Getreidestroh grundsätzlich als potenzielle Rohstoffquelle für die stoffliche Nutzung. Ihre tatsächliche Verfügbarkeit ist jedoch von mehreren Faktoren abhängig. So führt ein steigender Kornertrag nicht zwangsläufig zu einer höheren Strohmenge, da Sortenwahl und Anbaubedingungen eine Rolle spielen. Auch kann eine verstärkte ökologische Bewirtschaftung zu geringeren Stroherträgen führen (Brödner et al. 2023). Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass Stroh und andere landwirtschaftlichen Reststoffe oft aus Gründen des Bodenschutzes zumindest teilweise auf den Feldern verbleiben sollten, was die verfügbare Menge weiter einschränkt.

Holzartige Abfälle aus der Forstwirtschaft könnten zukünftig vermehrt für andere Nutzungen zur Verfügung stehen, da nach RED III strengere Vorgaben für die energetische Nutzung forstlicher Biomasse einführt, insbesondere durch die Verpflichtung zur Kaskadennutzung und den Ausschluss bestimmter Holzarten von Subventionen. (Nationale Wasserstoffstrategie 2024). Nachhaltige nutzbare Potenziale von Holzbiomasse sind relativ unsicher zu bestimmen, da aufgrund von Importen komplexe Rückwirkungen auf globale Landnutzungssysteme berücksichtigt werden müssten, welche schwierig zu erfassen sind (Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Strategien für eine nachhaltige Bioenergienutzung 2019). In Zukunft könnte der Beitrag von primärer Biomasse aus der Forstwirtschaft sinken (Ausfelder et al. 2023). Um zukünftig einen höheren Anteil an biogenen Kohlenstoff in Deutschland bereitstellen zu können, müsste unter anderem die aktuelle Flächennutzung evaluiert werden, sowie Importe von Biomasse in Betracht gezogen werden. Der Anbau von Industriepflanzen¹¹ erfolgte im Jahr 2020 in Deutschland auf etwa 2 % der landwirtschaftlichen Flächen (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2025). Dieser Anteil müsste somit ebenfalls erhöht werden, wobei davon ausgegangen werden kann, dass dort Kurzumtriebsplantagen (KUP) bzw. Agroforst¹² bewirtschaftet wird (Ausfelder et al. 2023), welche bereits Verwendung zur stofflichen und/oder energetischen Nutzung finden. Einige Prognosen deuten darauf hin, dass sich die Kluft zwischen Nachfrage und Angebot an Biomasse für die energetische und stoffliche Anwendung bis 2050 aufgrund von Naturschutz, Lebensmittel- und Energiesicherheit vergrößern wird. Besonders politische Anreize könnten dem entgegenwirken (European Environment Agency 2023).

3.1.3. Ausgewählte Prozesse zur Gewinnung von Synthesegas, Pyrolysegas und -öl aus Biomasse

Die genannten Biomassearten eignen sich aus rohstofflicher Sicht besonders gut, um über verschiedene Produktionswege in chemische Produkte wie Pyrolyseöl und Synthesegase umgewandelt zu werden, welche als regenerative Kohlenstoffquelle für die Herstellung von Grundchemikalien dienen. In Abbildung 9 sind mögliche Produktionsrouten zur rohstofflichen Nutzung für primäre Biomassen (hier Anbaupflanzen), biogene Nebenprodukte und Rest- und Abfallstoffe beispielhaft dargestellt.

Thermochemische Vergasung und Pyrolyse sind vor allem aus der fossilen Synthesegasherstellung und der Verölung¹³ von Kunststoffabfällen bekannt. Beide Verfahren eignen sich jedoch ebenso für die rohstoffliche Nutzung biogener Kohlenstoffquellen. Im Folgenden werden die Verfahren kurz beschrieben und geeignete Biomassearten mit ihren Eigenschaften und theoretischen Potenzialen den jeweiligen Prozessen zugeordnet. Des Weiteren werden in Technologiesteckbriefen, welche aus dem Anhang 9.1 zu entnehmen sind, die Verfahren der thermochemischen Vergasung und der Pyrolyse unter der Nutzung von Biomasse als Ausgangssubstrat weiter beschrieben.

11 Industriepflanzen werden vorrangig für die stoffliche und energetische Nutzung angebaut (z.B.: Raps, Zuckerrüben, Mais).

12 KUP bzw. Agroforst beschreibt Anbauflächen mit schnellwachsenden Baumarten wie Pappel und Weide, welche in kurzen Zyklen von 2 bis 10 Jahren geerntet werden und vorrangig für die Energie- und Rohstoffgewinnung angebaut werden.

13 Verölung bezeichnet das thermochemische Recyclingverfahren, bei dem Kunststoffabfälle durch bspw. Pyrolyse in ein ölarziges Produkt zerlegt werden.

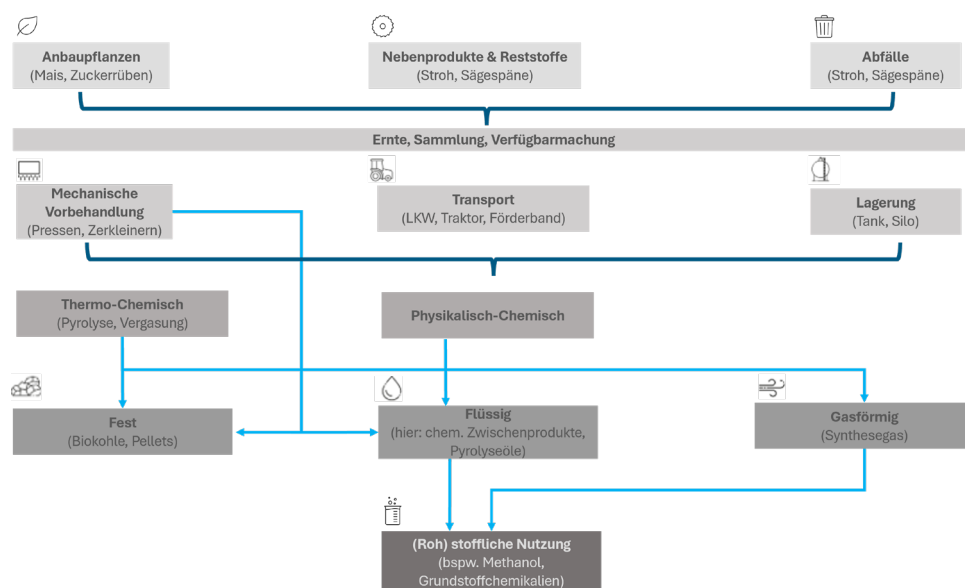


Abbildung 9: Relevante Biomassequellen und Umwandlungsverfahren zur Herstellung von kohlenstoffhaltigen biogenen Produkten für die Herstellung von Grundchemikalien, erstellt nach (Kaltschmitt, Hartmann, and Hofbauer (Hrsg.) 2016; Landesgesellschaft für Energie und Klimaschutz. NRW.ENERGY4CLIMATE 2023).

Biomassevergasung

Bei dem Prozess der Biomassevergasung wird zumeist feste Biomasse unter kontrollierter Sauerstoff-, Luft- oder Wasserdampfzufuhr in ein energiereiches Synthesegas umgewandelt. Dieses kann, meist nach einem Reinigungsschritt, zur Erzeugung von chemischen Grundchemikalien weitergenutzt werden. Mit einer nachgeschalteten Methanolsynthese könnte beispielsweise aus 1 t TM Holz in etwa 0,8 t biogenes Methanol entstehen (Ausfelder et al. 2023). Die Biomassevergasung steht derzeit im Konflikt mit dem Ziel, das stoffliche Potenzial und die chemische Zusammensetzung der Biomasse möglichst effizient zu nutzen. Denn durch den thermochemischen Prozess werden biomassespezifische Strukturen wie Lignin oder Cellulose vollständig in Gas umgewandelt, was andere Nutzungspfade ausschließt (Ausfelder et al. 2023). Gleichzeitig ist der Technologiereifegrad noch begrenzt. Dennoch kann die Vergasung in Industrieparks vorteilhaft sein, durch beispielsweise Abwärmenutzung, Prozessflexibilität und die Integration regionaler Stoffströme.

Pyrolyseverfahren

Die Pyrolyse ist ein thermochemisches Verfahren, bei welchem Biomasse unter Sauerstoffausschluss bei hohen Temperaturen in Pyrolyseöle, Pyrolysegase und Pyrolysekoks¹⁴ zersetzt wird. Hierbei wird besonders das entstehende Pyrolyseöl für die Erzeugung von alternativen kohlenstoffhaltigen Grundchemikalien weitergenutzt.

Über das Pyrolyseverfahren von holzartiger Biomasse könnten zum Beispiel Ethylen und Propylen hergestellt werden. Zur Herstellung von 1 t Ethylen würden so etwa 5 bis 7 t TM Holz benötigt werden, wobei zur Herstellung von 1 t Propylen etwa 6 bis 9 t TM Holz notwendig wären (Kaspar et al. 2024). Zudem kann das hergestellte Pyrolyseöl als reichhaltige Kohlenstoffquelle, mit einem Kohlenstoffgehalt von 45 bis 60 Gew.-%, zur Herstellung diverser Grundchemikalien eingesetzt werden. Neben Pyrolyseöl- und -Gas fällt bei diesem Verfahren auch ein fester Kohlenstoffbestandteil an, welcher Biochar oder Biokohle genannt wird. Der Kohlenstoffgehalt der Biokohle liegt, je nach Kohlenstoffgehalt der Ausgangsbiochemie, zwischen 70 und 90 Gew.-%. Die Biokohle kann in der Landwirtschaft durch ihre wasser- und nährstoffspeichernde Eigenschaft als Bodenverbesserer, in der Industrie als Reduktionsmittel, oder als Rohstoff zur Aktivkohleherstellung eingesetzt werden. Die rohstoffliche Weiterverwendung von Biokohle als biogene Kohlenstoffquelle ist jedoch nicht Gegenstand dieser Studie.

¹⁴ Auch Biokohle genannt



3.1.4. Transport- und Standortfragen

Die Effizienz und Wirtschaftlichkeit von Biomassekonversionsanlagen hängt stark von der Biomasseverfügbarkeit und dem Transport sowie der Standortwahl ab. Ein zentrales Problem beim Transport von Biomasse ist ihre geringe Schütt- und volumetrische Energiedichte im unbehandelten Zustand, die stark von der jeweiligen Biomasseart abhängt. Mögliche Lösungsansätze sind zu einem die dezentrale Vorbehandlung der genutzten Biomasse. Dazu zählen mechanische Verfahren wie Zerkleinerung und Trocknung, thermische Verfahren wie die Torrefizierung¹⁵ oder Schnellpyrolyse, sowie chemische und biologische Aufschlussverfahren. Ein Praxisbeispiel, das mehrere dieser Schritte integriert, ist das bioliq®-Verfahren des Karlsruher Instituts für Technologie zur Herstellung hochwertiger synthetischer Kraftstoffe aus trockenen biogenen Reststoffen wie Stroh sowie land- und forstwirtschaftlichen Abfällen (Karlsruher Institut für Technologie 2025). Die Biomasse wird zunächst dezentral in kleineren Anlagen mittels Schnellpyrolyse in ein energiedichtes, leicht transportierbares Zwischenprodukt, das sogenannte bioliqSyncrude®, umgewandelt. Diese Vorbehandlung direkt in der Anbauregion ermöglicht nicht nur eine effiziente Logistik, sondern stärkt auch die regionale Wertschöpfung und ländliche Struktur. Anschließend wird das Syncrude in einer zentralen Großanlage durch einen Hochdruck-Flugstromvergaser in ein Synthesegas umgewandelt. Dieses Gas kann als Grundlage für die Fischer-Tropsch-Synthese von flüssigen Kraftstoffen wie Benzin, Diesel oder e-Fuels¹⁶ oder für die Methanolsynthese dienen (Karlsruher Institut für Technologie 2025). Zudem wird die entstehende Prozesswärme teilweise zur Deckung des Eigenenergiebedarfs der Anlage verwendet. Im Kontext von Transport- und Standortfragen bieten Bioraffinerien einen vielversprechenden Ansatz zur effizienten Nutzung von Biomasse (Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Strategien für eine nachhaltige Bioenergienutzung 2019). Durch die Kopplung mehrerer Wertschöpfungsketten können unterschiedliche Produkte parallel erzeugt werden. Dies verbessert nicht nur die Wirtschaftlichkeit, sondern wirkt auch dem Rohstoffverlust entgegen. Eine Kaskadennutzung, bei der zunächst hochwertige stoffliche Produkte hergestellt werden und am Ende des Produktlebensweges dieses energetisch verwertet wird, kann das Biomassepotenzial langfristig erhöhen und zu einer nachhaltigeren Standort- und Infrastrukturplanung beitragen.

3.1.5. Kontroversen

Biogener Kohlenstoff ist zwar eine erneuerbare Rohstoffquelle, die verfügbare Biomasse gilt jedoch als eine kritisch-begrenzte Ressource. Eine Nutzung sollte daher dort erfolgen, wo sie fossile Rohstoffe am effektivsten ersetzen und den größten Klimabeitrag leisten kann. So konkurriert die stoffliche Nutzung von Biomasse mit der Nahrungsmittelproduktion und der energetischen Verwendung, die in der politischen Darstellung teils priorisiert wird (Joint statement on sustainable bioenergy for climate and development goals 2024). Weiterhin ist auch das Interesse aus anderen Industriezweigen, insbesondere der Chemie-, Papier- oder Baustoffindustrie, an holzartiger Biomasse zur stofflichen Nutzung groß. Darüber hinaus wird sie vor allem als eine kostengünstigere und nachhaltigere Option für die Bereitstellung von Dampf und Wärme betrachtet. Für Hochtemperaturanwendungen sind wirtschaftlich tragbare und klimaneutrale Energieträger noch nicht abschließend erschlossen. Zudem sind ökologische Bedenken wie der Schutz von Biodiversität relevant, da diese erhebliche Umweltrisiken bergen können. Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden, sind strenge Nachhaltigkeitszertifizierungen und eine integrierte Betrachtung von Energie-, Agrar- und Umweltpolitik notwendig, um eine sozial und ökologisch verträgliche Biomassenutzung sicherzustellen (Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Strategien für eine nachhaltige Bioenergienutzung 2019).

Biomasse gilt außerdem als chemisch komplexer Rohstoff und technisch anspruchsvoll, was die wirtschaftliche Nutzung erschwert. Die Beachtung der Kaskaden- und Mehrfachnutzung von Biomasse ist hier relevant, wobei die Verwendung von Abfallbiomassen und Reststoffen nicht in direkter Nutzungskonkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen und keinen zusätzlichen Ressourcenverbrauch verursachen sollte. Das Vorziehen von Rest- und Abfallbiomasse gegenüber landwirtschaftlicher Biomasse wird als „No-Regret-Option“¹⁷ betrachtet und stimmt mit der Einhaltung von Nachhaltigkeitsstandards überein. Die oft geforderte stärkere Nutzung der nicht mobilisierbaren Biomasse ist umstritten, da ein Teil der Biomasse auf den Feldern verbleiben muss, um die Nährstoffrückfuhr und Biodiversität zu erhalten (Akhmetova et al. 2025). Biomasse kann einen Beitrag zur Defossilierung der chemischen Grundstoffindustrie leisten, ihr tatsächliches Potenzial ist jedoch durch das zurzeit ungenutzte Potenzial begrenzt und hängt von Flächennutzungskonflikten und ökologischer Tragfähigkeit ab. Eine industrielle Nutzung erfordert deshalb eine klare Priorisierung, nachhaltige Nutzungskonzepte sowie kritische und ganzheitliche Bewertungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

15 Torrefizierung ist eine Pyrolyse auf niedrigem Temperaturniveau. Ziel ist eine Reduzierung des Produktvolumens bei gleichzeitiger Erhöhung des Heizwertes.

16 Synthetische, strombasierte Kraftstoffe (engl.: electrofuels)

17 Maßnahmen, die nicht bereut werden, da in jedem Fall ein positiver Beitrag erwartet wird.



3.2. Kunststoffabfälle

Neben Biomasse können auch Kunststoffabfälle als alternative Kohlenstoffquelle in Frage kommen. Hierbei wird die bisher weitestgehend lineare Wertschöpfungskette der Kunststoffe geschlossen, so dass eine zirkuläre Kohlenstoffwirtschaft entsteht (Lee, Tschoepe, and Voss 2021; Meys et al. 2021; Plastics Europe and European Association of Plastics Recycling 2022). Statt am Ende der Lebensdauer ein kunststoffhaltiges Produkt zu verbrennen oder zu deponieren, wird es erneut als Rohstoff genutzt. Diese recycelten Materialien können fossile Rohstoffe ersetzen und somit Emissionen einsparen, da vorhandene Produkte beziehungsweise deren Komponenten und Materialien länger im Kreislauf verbleiben und somit weniger Grundchemikalien für neue Produkte benötigt werden. In Deutschland erfahren Kunststoffe am Ende ihrer Lebenszeit eine der folgenden Abfallvermeidungsmaßnahmen oder Abfallbehandlungen:

- **Produktwiederverwendung:** Wiederverwendung eines Produkts oder seiner Komponenten, ggf. auch nach Reparatur oder Wiederaufbereitung.
- **Stoffliche Verwertung**
 - mechanische Recyclingverfahren: Materialrückgewinnung und Wiederverwertung, beispielsweise beim Recycling von PET-Flaschen.
 - chemische Recyclingverfahren: Rückgewinnung von Grundchemikalien wie zum Beispiel Monomere oder Pyrolyseöl.
 - rohstoffliche Verwertung: Einsatz von Kunststoffabfällen in anderen Wertschöpfungsketten, beispielsweise der Ersatz von Koks Kohle in der Stahlerzeugung durch Kunststoffabfälle.
- **Energetische Verwertung:** Verbrennung der Kunststoffabfälle beispielsweise in einer Müllverbrennungsanlage unter Nutzung der freiwerdenden Energie.
- **Deponie:** Auf Deponien werden nicht anderweitig verwertbare Kunststoffabfälle meist dauerhaft gelagert.

Im Jahr 2023 wurden ca. 5,6 Mt Kunststoffabfälle aus privaten Haushalten und gewerblichen Endverbraucher:innen in Deutschland erfasst. Die Verwertungsrate lag bei ca. 99 %, lediglich 1 % der Kunststoffabfälle wurden deponiert. Die Verwertung erfolgte mit ca. 64 % überwiegend energetisch. Die stoffliche Verwertung wurde fast ausschließlich durch mechanische Recyclingverfahren abgedeckt (ca. 35 %). Weniger als 1 % der Kunststoffe wurden dem chemischen Recycling zugeführt (Conversio Market & Strategy GmbH 2024).

Die Wiederverwendung von Produkten und das mechanische Recycling gelten als besonders energieeffiziente Strategien, da sie Produktströme und Komponenten am Ende der Wertschöpfungskette im Kreis führen. Hierbei bleibt der Materialcharakter weitgehend erhalten, was Energie spart und Emissionen reduziert. Wird z. B. ein Gebrauchsgegenstand wie ein Paar Turnschuhe mithilfe von mechanisch recyceltem Kunststoff hergestellt, sinkt der Bedarf an neu hergestelltem Kunststoff, sogenanntem „virgin material“ aus fossilen Rohstoffen. Allerdings funktionieren diese Verfahren nur bei sortenreinen, gut trennbaren und wenig verunreinigten Kunststoffen – eine Bedingung, die viele Abfallströme nicht erfüllen. Daher können nur begrenzte Mengen wirtschaftlich wiederverwendet oder mechanisch recycelt werden.

Chemische Recyclingverfahren führen die Kunststoffabfälle an einen früheren Punkt in die Wertschöpfungskette zurück: Sie zerlegen Kunststoffe in ihre chemischen Grundbausteine wie Monomere¹⁸, Öle oder Gase, die sich flexibel in verschiedenen Produktionsprozessen wiederverwenden lassen. Damit bieten sie vor allem bei gemischten oder verunreinigten Abfällen Vorteile, bei denen mechanisches Recycling an seine Grenzen stößt. Allerdings ist das chemische Recycling energieintensiver und technisch anspruchsvoller, so dass es noch nicht in einem relevanten Maßstab angewendet wird. Dies spiegelt sich auch in der geringen Verwertungsrate wider - 2023 wurden in Deutschland ca. 7.000 t Kunststoffabfälle chemisch recycelt (Conversio Market & Strategy GmbH 2024).

In welchem Umfang solche Verfahren tatsächlich dazu beitragen können, den Bedarf an Grundchemikalien zu verringern, lässt sich allerdings aufgrund des komplexen, globalen Marktes nur schwer beziffern.

3.2.1. Verfügbarkeit von Kunststoffabfällen

Kunststoffhaltige Produkte haben je nach Einsatzbereich sehr unterschiedliche Nutzungsdauern: Sie reichen von wenigen Tagen bei Verpackungen bis hin zu mehreren Jahrzehnten bei Anwendungen in der Baubranche, wie zum Beispiel Fensterrahmen. Dadurch – sowie dem internationalen Handel von Kunststoffprodukten und -abfällen – entsteht eine komplexe und schwer messbare Beziehung zwischen dem tatsächlichen Materialeinsatz und dem Zeitpunkt, an dem Kunststoffe als Abfall anfallen. 2023 lag

¹⁸ Monomere sind chemische Grundbausteine, die zu Polymeren zusammengeschlossen werden können.



der Kunststoffverbrauch privater und gewerblicher Endverbraucher:innen bei ca. 11,3 Mt während nur ca. 5,6 Mt Kunststoffabfälle erfasst wurden (Conversio Market & Strategy GmbH 2024).

Betrachtet man die Rohstoffversorgung für die kunststoffverarbeitende Industrie, wird deutlich, dass Kunststoffabfälle bereits heute als alternative Kohlenstoffquelle Anwendung finden. Von den ca. 13 Mt/a Rohstoffen für die Verarbeitung zu Kunststoffprodukten sind circa 81 % fossil. Zu 15 % wurden Rezyklate, das Produkt des mechanischen Recyclings, verarbeitet, die restlichen 4 % gehen auf die Wiederverwendung von Nebenprodukten zurück (Conversio Market & Strategy GmbH 2024). Ziel einer klimaneutralen Zukunft ist es, den Einsatz von Rezyklaten so weit wie möglich zu erhöhen.

Die Chemistry4Climate-Studie (Ausfelder et al. 2023) geht davon aus, dass zukünftig das Kunststoffabfallaufkommen steigen wird und im Jahr 2045 6,3 Mt erreichen wird. Gleichzeitig sollen jedoch auch die Recyclingquoten für mechanisches und chemisches Recycling steigen. Durch verbesserte Aufbereitungstechnologien und die Einführung von Rezyklateinsatzquoten könnten bis 2045 nahezu 50 % der Abfallmenge mechanisch recycelt werden (Ausfelder et al. 2023). Da das mechanische Recycling auf Grund von Energieeffizienz nach Möglichkeit dem chemischen Recycling vorzuziehen ist, beschränkt das eine Potenzial das andere. Während 2023 die Menge an Kunststoffabfällen die chemisch recycelt wurden bei ca. 7 kt lag (Conversio Market & Strategy GmbH 2024), prognostizieren (Ausfelder et al. 2023) für 2045 ca. 2,3 Mt Kunststoffabfälle die chemisch recycelt werden können. Dies entspricht etwa 1,6 Mt Kohlenstoff. Verschiedene Kunststoffe weisen unterschiedliche Gehalte an Kohlenstoff auf. Für diese Abschätzung wurden Polypropylen (PP), Polyethylen (PE), PET, Polyvinylchlorid (PVC), Polystyrol (PS), Polyamid (PA), Polycarbonat (PC), Polyurethan (PU), Styrol-Acrylnitril (SAN) und Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) berücksichtigt.

In der Europäischen Union werden nach einer umfassenden Studie bis zum Jahr 2030 etwa 3,1 Mt/a Plastikabfälle chemisch recycelt werden (SYSTEMIQ 2022). Bis 2050 könnte dies auf 7,3 Mt/a steigen (SYSTEMIQ 2022) und damit ein Potenzial von etwa 5,0 Mt Kohlenstoff pro Jahr aus chemischem Recycling zur Verfügung stehen.

3.2.2. Einbindung von chemischem Recycling in die Wertschöpfungskette

Mechanisches Recycling ist stark auf spezifische Abfallströme beschränkt, wobei Rezyklat entsteht, das für die Herstellung neuer Projekte genutzt werden kann. Es dient aber nicht als Ausgangsstoff für die Herstellung von Grundchemikalien. Im Folgenden wird das chemische Recycling detaillierter dargestellt, da dadurch verschiedenen Möglichkeiten bestehen, Kohlenstoff am Anfang der bestehenden (petro-)chemischen Wertschöpfungsketten einzubringen.

Beim chemischen Recycling werden die langen Polymerketten der Kunststoffabfälle durch chemische Reaktionen in ihre Grundbausteine zerlegt. Einige dieser Verfahren sind in der Lage, auch gemischte oder verschmutzte Kunststoffabfälle zu verwerten. Dabei entstehen wiederverwendbare chemische Ausgangsstoffe – Monomere, Synthesegas oder Pyrolyseöle –, die als Grundstoffe in der chemischen Industrie eingesetzt werden können. So lässt sich der in den Kunststoffen enthaltene Kohlenstoff in den Kreislauf zurückführen. Zu den wichtigsten chemischen Recyclingverfahren zählen die Pyrolyse, bei welcher eine thermische Zersetzung ohne Sauerstoff stattfindet, die Vergasung, die eine thermische Umwandlung in Synthesegas darstellt, und die Solvolyse, bei der Kunststoffe mithilfe von Lösungsmitteln chemisch in ihre Bausteine zurückgeführt werden.

Pyrolyse ist ein thermochemisches Recyclingverfahren, bei dem Polymere aus Kunststoffabfällen unter Sauerstoffausschluss und hohen Temperaturen, sowie teilweise unterstützt durch Katalysatoren, in kürzere Kohlenwasserstoffketten aufgespalten werden. Durch diesen Prozess entstehen Pyrolysegase, -öle und Feststoffe, meist Koks. Die Pyrolyseprodukte können, nach weiterer Aufreinigung, zur Herstellung von Grundchemikalien dienen. Pyrolyseöle können je nach Zusammensetzung als Naphtha-Ersatz in den Raffinerien genutzt, Pyrolysegase in einer anschließenden Vergasung mit Sauerstoff zu Synthesegas umgesetzt werden. Die Pyrolyse gilt als vielversprechendes Verfahren im chemischen Recycling, vor allem für Kunststoffabfälle wie Polyolefine, die große Teile des Abfallaufkommens ausmachen. Zudem ist sie toleranter gegenüber verunreinigten oder gemischten Kunststoffströmen im Vergleich zum mechanischen Recycling, wodurch eine aufwändige Vorsortierung vermieden werden kann. Nachteilig ist jedoch die teils komplexe Produktaufbereitung insbesondere im Hinblick auf gleichbleibende Produktqualität. Außerdem ist die Rückgewinnung spezifischer Monomere nicht möglich, was die direkte Wiederverwendung zur Kunststoffherstellung einschränkt. Die Vergasung von Kunststoffen ist ebenfalls ein thermochemisches Verfahren. Dabei werden Kunststoffe unter hohen Temperaturen und hohem Druck, sowie unter geringfügiger Sauerstoffzufuhr in kleinere Moleküle zersetzt. Bei diesem Verfahren entsteht hauptsächlich Synthesegas, aus dem wiederum die Grundstoffe der Chemie aufgebaut werden können. Ein großer Vorteil der Vergasung liegt in der breiten Verwertbarkeit nahezu aller kohlenstoffhaltiger Materialien – auch stark verunreinigte oder nicht sortenreine Abfälle lassen sich einsetzen. Das erzeugte Synthesegas kann flexibel eingesetzt werden zum Beispiel bei der Pro-



duktion von Grundchemikalien über die Fischer-Tropsch-Synthese. Gleichzeitig ist das Verfahren technisch aufwendig und energieintensiv. Die hohen Temperaturen führen zu einem hohen Energiebedarf, was die Umweltbilanz stark von der eingesetzten Energiequelle abhängig macht. Zudem sind Vergasungsanlagen kostenintensiv in Aufbau und Betrieb, was ihre wirtschaftliche Umsetzung derzeit einschränkt.

Bei der Solvolyse werden Polymere mithilfe eines Lösungsmittels je nach Ausgangskunststoff in Monomere und andere Grundbausteine zerlegt. Der große Vorteil dieses Verfahrens liegt in der gezielten Rückgewinnung hochwertiger Ausgangsstoffe, die direkt zur Herstellung neuer Kunststoffe verwendet werden können. Besonders geeignet ist die Solvolyse für Kunststoffe wie PET, Polyamide oder Polycarbonate. Gleichzeitig ist sie jedoch stark abhängig von sortenreinem Inputmaterial und reagiert empfindlich auf Verunreinigungen. Daher ist ihre Anwendung auf bestimmte Kunststoffarten beschränkt, was die Breite des Einsatzspektrums limitiert. Außerdem befinden sich viele Solvolyseverfahren noch in der Pilotphase. Es fehlen bislang großtechnische Anwendungen.

3.2.3. Transport- und Standortfragen

Das Recycling von Kunststoffabfällen hängt stark von gut ausgebauten Strukturen zur Abfallaufbereitung ab. Besonders geeignet für das Recycling sind Abfallströme mit einem hohen Kunststoffanteil – zum Beispiel Verpackungsabfälle. Nach der Sammlung folgen mehrere Aufbereitungsschritte, um die Kunststoffe für das mechanische oder chemische Recycling nutzbar zu machen. Dazu gehören unter anderem das Demontieren, Zerkleinern, Schreddern, Klassieren, (Fein-)Sortieren, Reinigen und Trennen nach Materialarten. Je sortenreiner die Kunststoffe bereits bei der Sammlung vorliegen, desto einfacher und effizienter ist ihre Aufbereitung – und desto hochwertiger ist der daraus gewonnene Sekundärrohstoff, vor allem im mechanischen Recycling. Diese Anforderungen stellen das Kunststoffrecycling jedoch vor logistische Herausforderungen: Abfälle fallen meist dezentral an und variieren in ihrer Zusammensetzung. Um Recycling wirtschaftlich und effizient zu gestalten, müssen Sammelsysteme, großtechnische Aufbereitungsanlagen und die weiterverarbeitende Kunststoffindustrie optimal miteinander vernetzt werden (DECHEMA e.V. 2024).

3.2.4. Kontroversen

Mechanisches Recycling ist technologisch ausgereift und bereits weit verbreitet, jedoch sind nicht alle Kunststoffarten für das mechanische Recycling geeignet. Chemische Recyclingverfahren können diese Lücke schließen, da sie es teilweise ermöglichen sogar stark verschmutzte oder gemischte Kunststoffabfälle aufzubereiten. Die Technologien bewegen sich jedoch meist noch im Entwicklungsstadium und sind damit in ihrer industriellen Anwendung noch begrenzt (DECHEMA e.V. 2024).

Das Kunststoffrecycling ist ein wichtiger Bestandteil der Kreislaufwirtschaft, ist jedoch zunehmend Kritik ausgesetzt. Aufgrund der technologischen und stofflichen Grenzen kann auch eine verlängerte Nutzung fossiler Ressourcen erfolgen. Zusätzlich sind die Verfahren meist sehr energieintensiv, etwa durch die Vorsortierung oder der genutzten Technologie, wie der Pyrolyse. Zu bedenken ist außerdem, dass der Wirkungsgrad von Recyclingverfahren nicht 100 % erreichen kann; so dass immer ein Anteil des Materials verloren geht. Um die Menge und Qualität der recycelten Produkte zu sichern, muss regelmäßig „virgin material“ – das heißt neues, meist erdölbasiertes Kunststoffgranulat – zugeführt werden. Nach dem aktuellen Stand der Technik kann durch Kunststoffrecycling allein nicht der Bedarf an Kohlenstoff gedeckt werden.

Weiterhin stellen Kunststoffabfälle wie auch Erdöl und Erdgas eine fossile Kohlenstoffquelle dar. Durch die Kreislaufführung können jedoch andere fossile Ressourcen, etwa Erdöl für Neumaterial, eingespart werden. Trotz seiner Einschränkungen ist das Kunststoffrecycling damit ein relevantes Instrument im Klimaschutz, dessen Chancen und Grenzen jedoch differenziert bewertet werden sollten.

3.3. CO₂ als Kohlenstoffquelle

3.3.1. Mögliche CO₂-Nutzung in der chemischen Industrie

Im folgenden Abschnitt geht es um die Bereitstellung und Nutzung von CO₂ in der chemischen Industrie. Dieser Pfad wird auch als CO₂-Abscheidung und -Nutzung bezeichnet. Das Anwendungsfeld zur stofflichen Nutzung von CO₂ ist sehr breit, Abbildung 10 dargestellt. CO₂ kann beispielsweise direkt als Kühl- oder Lösungsmittel genutzt werden oder als Ausgangsstoff für die Herstellung verschiedener chemischer (Zwischen-)Produkte, wie beispielsweise Methanol oder Harnstoff, dienen. In vielen CCU-Fällen wird zunächst aus CO₂ und H₂ Synthesegas gewonnen, welches in verschiedenen Prozessen zum Einsatz kommen kann. So kann eine breite Palette an Produkten defossilisiert werden.



Um diese alternativen, CO₂-basierten Verfahren und Produkte in Zukunft zu etablieren, müsste nicht-fossiles CO₂ in großem Maßstab zur Verfügung stehen. Dafür kommen verschiedene technologische und natürliche Quellen in Frage, die im Folgenden genauer beleuchtet werden.

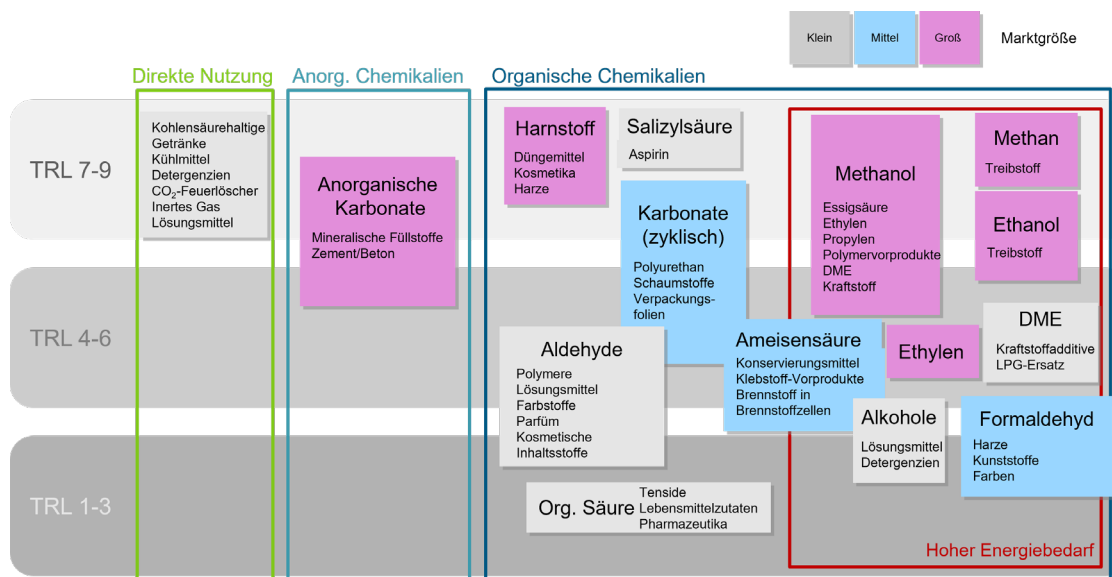


Abbildung 10: Überblick über mögliche CO₂-basierte Produkte und deren Technologiereifegrade. Produkte, die bei dem Herstellungsprozess am meisten Energie benötigen, sind rot eingrahmt.

3.2.2 Ausgewählte Quellen und Verfügbarkeit

Generell kann CO₂ entweder direkt aus der Atmosphäre oder aus anthropogenen Punktquellen abgetrennt werden. Bei Emissionen aus der Technosphäre kann grundsätzlich in unvermeidbar und langfristig vermeidbar unterschieden werden.

CO₂-Punktquellen

Industrielle Rauch- und Abgase können als Punktquellen für die Rückgewinnung von CO₂ dienen. Diese Option bleibt auch in einer klimaneutralen Zukunft bestehen, da rohstoffbedingte Emissionen nur reduziert, jedoch nicht vermieden werden können, solange diese Produkte und Prozesse weiterhin benötigt werden.

Durch die Umstellung des Energiesystems und der damit einhergehenden Lock-In-Gefahr würden manche Quellen, wie etwa Abgasströme von Kohle- und Erdgaskraftwerken, nur für einen begrenzten Zeitraum in Frage kommen (s. Abbildung 11). Im Jahr 2024 wurden nach der KSG-Statistik durch die deutsche Industrie etwa 153 Mt CO₂-Äquivalente emittiert (Umweltbundesamt 2025). Der Großteil dieser Emissionen entfällt auf die Nutzung von Kraft- und Brennstoffen (Umweltbundesamt 2024c), auch in Industriekraftwerken.

Prozessbedingte Emissionen werden für die Chemie-, Metall- und Mineralienindustrie berichtet (Umweltbundesamt 2024c, 2024b). Auf die Chemieindustrie entfielen 2024 etwa 5,7 Mt (Umweltbundesamt 2025); hauptsächlich auf die Ammoniakproduktion (Umweltbundesamt 2024b). Bei einer Umstellung auf eine grüne Ammoniakherstellung mithilfe von grünem Wasserstoff würden diese Emissionen wegfallen und entstehendes CO₂ nicht für die weitere Nutzung in Folgeprozessen zur Verfügung stehen.

Die Emissionen der Metallherstellung werden von der Produktion von Roheisen und Stahl aufgrund der Koks-kohlenutzung dominiert (Umweltbundesamt 2024b). Insgesamt wurden bei der Metallproduktion im Jahr 2024 etwa 15,6 Mt CO₂-Äquivalente¹⁹

¹⁹ Überwiegend CO₂



emittiert (Umweltbundesamt 2025). Bei einer Umstellung auf Eisendirektreduktion mithilfe von Erdgas (übergangsweise) und grünem Wasserstoff würden diese Emissionen größtenteils wegfallen und nicht für eine CO₂-Abscheidung in Frage kommen.

Durch die Verarbeitung mineralischer Rohstoffe entstanden etwa 14,8 Mt Emissionen an CO₂-Äquivalenten im Jahr 2024 (Umweltbundesamt 2025). Davon entfällt das Gros auf die Zementproduktion, gefolgt von der Kategorie Kalk und der Glasproduktion²⁰ (Umweltbundesamt 2024b). Weitere Prozesse tragen im Bereich der Mineralien in geringerem Maßstab bei, wie beispielsweise die Keramikproduktion oder die Sodanutzung²¹ (Umweltbundesamt 2024b). Diese Prozessemissionen sind rohstofflich bedingt und werden daher auch in einer klimaneutralen Zukunft entstehen.

In der EU wurden dazu im Vergleich im Jahr 2023 etwa 390 Mt CO₂ durch die mineralische Industrie, überwiegend Kalk- und Zementindustrie, (179 Mt), die chemische Industrie (88 Mt) und die Metallerzeugung (123 Mt) emittiert (Europäische Umweltagentur 2025). Öffentliche und industrielle Kraftwerke verursachten 1.140 Mt beziehungsweise 723 Mt an CO₂-Emissionen.

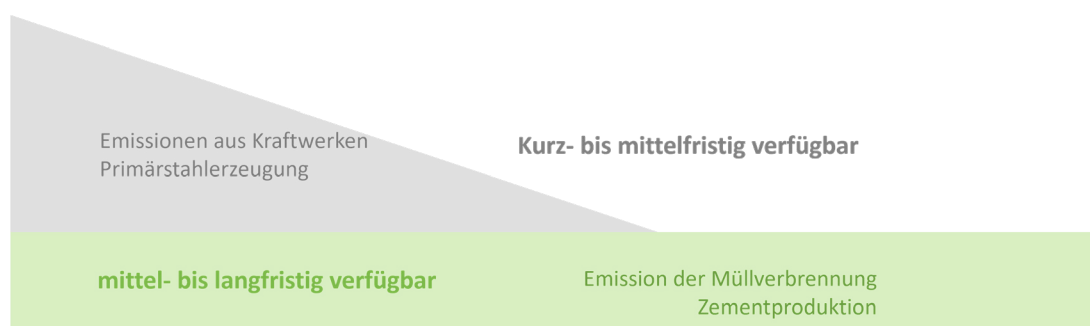


Abbildung 11: Schematische Darstellung der zeitlichen Verfügbarkeit beispielhafter industrieller CO₂-Quellen, die temporär oder langfristig zur Verfügung stehen könnten.

Grundsätzlich eignen sich solche Punktquellen für die Abscheidung von CO₂, welche große Mengen in hoher Reinheit emittieren und auch in Zukunft noch zur Verfügung stehen werden. Meist liegt die Konzentration von CO₂ industrieller Prozesse jedoch ohne weitere Reinigungsverfahren bei weniger als 50 % (vgl. Abbildung 12). Nur Abgase bestimmter Punktquellen und Prozesse weisen besonders hohe Reinheit auf, wie beispielsweise die Ethylenoxidherstellung in der chemischen Industrie. Der Anteil von CO₂ kann durch technische Verfahren, etwa durch eine nachfolgende Reinigung, erhöht werden.

Bei gemeinsamer Betrachtung der CO₂-Konzentrationen und potenzieller Lock-In-Gefahren sind nur wenige Prozesse für die langfristige CO₂-Abscheidung geeignet. Generell handelt es sich hierbei um kohlenstoffhaltige Rohstoffe, die nicht ersetzt werden können. Darunter fällt zum Beispiel die Klinkerherstellung für die Zementproduktion. Hierbei wird Calciumkarbonat (CaCO₃) aus Karbonatgesteinen zu Branntkalk (CaO) verarbeitet, wodurch CO₂ freigesetzt wird. Solange nicht auf Zement verzichtet werden kann, sollten diese Emissionen durch Abscheidung verhindert werden. Gleiches gilt für die Strom- und Wärmeproduktion für die öffentliche Versorgung. Zur Bereitstellung der Grundlast könnte die thermische Reststoffverwertung herangezogen werden. 2023 wurden etwa 2,3 Mt Kunststoffabfälle in Deutschland verbrannt (Conversio Market & Strategy GmbH 2024). Zusätzlich könnten weitere kohlenstoffhaltige Brennstoffe auf Biomassebasis in Zeiten von fluktuierender erneuerbarer Erzeugung oder von Dunkelflauten eingesetzt werden.

CO₂ aus der Atmosphäre

CO₂ kann direkt aus der Atmosphäre entzogen werden. Jedoch ist CO₂ in der Atmosphäre nur in geringen Konzentrationen von etwa 0,04 %²² vorhanden. Ferner werden auch andere potenzielle Kohlenstoffquellen, wie zum Beispiel Ozeane, untersucht. Diese stehen im Bezug zu Kohlenstoff im Gleichgewicht mit der der Atmosphäre. So kann theoretisch die CO₂-Konzentration der Atmosphäre durch eine Kohlenstoffentnahme aus den Ozeanen indirekt beeinflusst werden. Solche Technologien befinden sich

20 Im Jahr 2022 waren es 12,5 Mt (Zement), 4,1 Mt (Kalk) und 0,9 Mt (Glas) bei etwa 18 Mt gesamten CO₂-Emissionen im Bereich der mineralischen Industrie (Umweltbundesamt 2024b).

21 Exklusive der Nutzung in der Glasindustrie.

22 Der CO₂-Gehalt der Atmosphäre betrug etwa 428 ppm (0,043 %) im Juli 2025. Siehe (Global Monitoring Laboratory 2025), zuletzt aufgerufen am 21. August 2025.

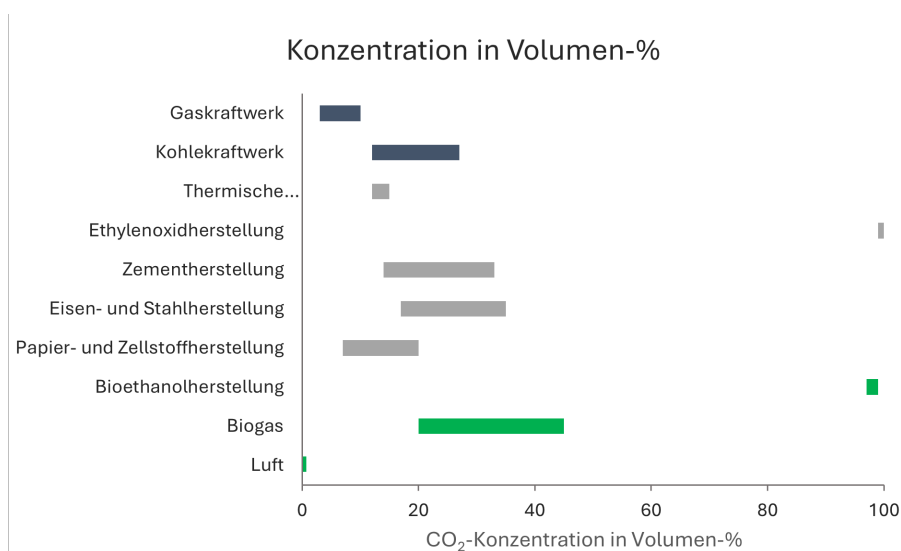


Abbildung 12: Übersicht über CO₂-Konzentrationen unterschiedlicher vermeidbarer und unvermeidbarer Quellen in Volumen-% (Fröhlich et al. 2019; Global Monitoring Laboratory 2025; Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen 2021; Umweltbundesamt 2024a). Blau: DAC; Grün: biomassebasiert; Hellgrau: Industrieprozesse; Dunkelgrau: Energetische Nutzung.

in einem niedrigen technologischen Reifegrad, des Weiteren sind die Wechselwirkungen zur Atmosphäre nicht linear. Daraus lässt schließen, dass es verhältnismäßig große Anstrengungen bedarf, um über die Ozeane Einfluss auf die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre zu bewirken.

CO₂-Abscheidungspotenziale

Rohstofflich bedingte Emissionen, wie die der mineralischen Industrie, werden auch nach 2045 noch zur Verfügung stehen. Auch natürliche Quellen wie DAC oder Abgase von biomassebasierten Verfahren könnten genutzt werden. Für diese Studie wurde das technische Gesamtpotenzial von Fleiter u. a. 2024 herangezogen, welches bei 49 Mt CO₂/a etwa 13 Mt Kohlenstoff pro Jahr entspricht. Literaturwerte für dieses Gesamtpotenzial industrieller und natürlicher Quellen liegen etwa bei 45 Mt CO₂/a (Agora Think Tanks 2024), 49 Mt CO₂/a (Fleiter et al. 2024) und 65 Mt CO₂/a (Prognos, Öko-Institut, and Wuppertal-Institut 2021). Jedoch ist das in den Studien abgeschiedene CO₂ meist für die dauerhafte Speicherung vorgesehen. Für die Nutzung in CCU-Produkten finden sich Werte von etwa 7 Mt CO₂/a (Prognos, Öko-Institut, and Wuppertal-Institut 2021) beziehungsweise 16 Mt CO₂/a (Agora Think Tanks 2024) und 30 Mt CO₂/a (Fleiter et al. 2023).

In der Europäischen Union ist die potenziell verfügbare Menge an CO₂ aus industriellen Prozessen deutlich größer. Hier werden im Szenario 3 der Europäischen Union bis zu 136 Mt CO₂/a aus industriellen Punktquellen, 111 Mt CO₂/a aus Abgasen der Stromerzeugung, davon 56 Mt CO₂/a biomassebasiert, 30 Mt CO₂/a aus biogenen Quellen und 175 Mt CO₂/a aus der Atmosphäre abgeschieden (European Commission on behalf of the European Union 2024a, 3). Von diesen 452 Mt CO₂/a werden in diesem Szenario 247 Mt CO₂/a geologisch gespeichert, 147 Mt CO₂/a für synthetische Kraftstoffe verwendet und 59 Mt CO₂/a in langlebige Produkte verarbeitet (European Commission on behalf of the European Union 2024a). Im Rahmen dieser Studie wird das Gesamtpotenzial von 452 Mt CO₂/a aus natürlichen und anthropogenen Quellen zugrunde gelegt, welches etwa 123 Mt Kohlenstoff pro Jahr entspricht.

3.3.3. Ausgewählte Prozesse der CO₂-Abscheidung

In folgenden Abschnitten werden mögliche CO₂-Abscheidungstechnologien aus industriellen und natürlichen Quellen vorgestellt.

Abscheidung aus Industrieanlagen

Um CO₂ aus Abgasen abzuscheiden, bestehen drei grundsätzliche Ansätze: die Auftrennung nach chemische Reaktionen, physikalischen Eigenschaften oder adsorptive Verfahren (Chao et al. 2021; Karayil, Elseragy, and Aliyu 2024; Olabi et al. 2022). Zusätzlich zu den hier diskutierten sogenannten post-combustion-Verfahren, gibt es auch weitere Ansätze. So wird im Oxyfuel-Verfahren beispielsweise die CO₂-Konzentration der Abgase erhöht, was eine darauffolgende Abscheidung wirtschaftlicher macht.



Kosten für die Abscheidung von CO₂ weisen, je nach CO₂-Konzentration und Aufreinigungsaufwand, eine Spannweite von etwa 15 bis 215 €/tCO₂ auf (vgl. Abbildung 13). Viele Prozesse der chemischen Industrie, wie beispielsweise die Ethylenoxidproduktion, weisen hohe Konzentration von CO₂ im Abgas (>90 %) auf (Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen 2021). Dadurch gestaltet sich die Aufreinigung weniger aufwändig und damit weniger kostenintensiv.

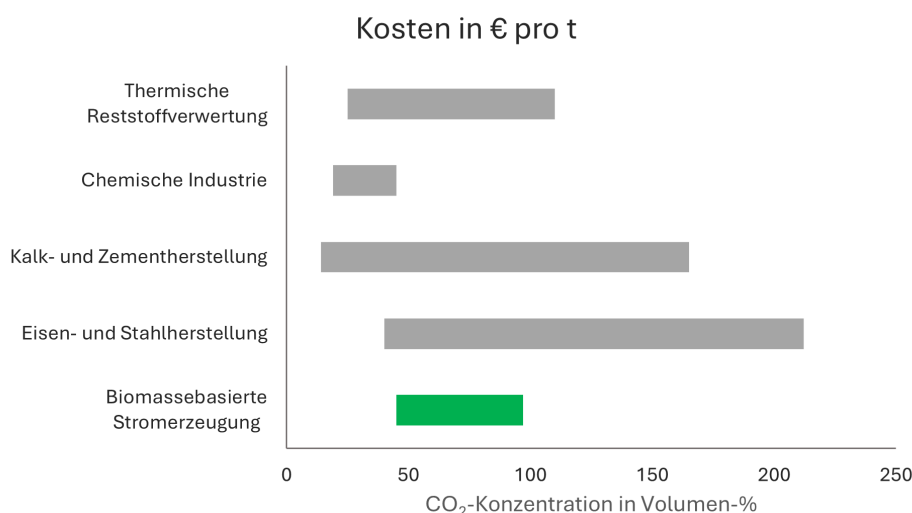


Abbildung 13: Beispielhafte Kosten für die Abscheidung von CO₂ aus industriellen Prozessen (grau) und im Anschluss an biomassebasierte Stromerzeugung (grün) nach (Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V (FFE) and Guidehouse 2025; Lozano et al. 2021; Lyons, Durrant, and Kochhar 2021; Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen 2021) in € pro Tonne.

Chemische Reaktionen

Aminwäsche: Hierbei wird CO₂ intermediär in einer wasserbasierten Lösung von Aminen²³ bei etwa 40 °C gelöst. Diese Absorption ist ein reversibler Gleichgewichtsprozess. Um den Prozess umzukehren und das CO₂ wieder in Gasphase zu überführen (Desorption), wird Wärme benötigt. Technisch gesehen ist die chemische Absorption die am häufigsten angewandte CO₂-Abscheidungstechnologie und weist einen Technologiereifegrad von 9 auf.

Karbonatfällung: Mit Hilfe von Metalloxiden²⁴ kann CO₂ in Gas-Feststoff-Reaktionen abgeschieden werden. Während der Reaktion werden diese Oxide wie etwa Calciumoxid (CaO) mit CO₂ zu Karbonaten, hier beispielhaft zu CaCO₃, umgewandelt. Nach Entfernung des verbleibenden Gasmischs kann das gebildete Karbonat bei Temperaturen um etwa 900 °C in reines CO₂ und das ursprüngliche Erdalkalimetalloxid CaO zersetzt werden. Dieses kann in der nächsten Reaktion wiederverwendet werden. Der Technologiereifegrad liegt zwischen 6 und 8.

Auftrennung nach physikalischen Eigenschaften

Lösungsmittelbasierte Verfahren (Vega et al. 2018): Industrielle Abgase werden hierbei in flüssigen, organischen Lösungsmitteln gelöst und später durch veränderte Druck- oder Temperaturbedingungen wieder freigesetzt (Dow Chemical 2023). Durch die Anpassung der Reaktionsbedingungen können einzelne Gasbestandteile zu einem bestimmten Zeitpunkt freigesetzt und so CO₂ auch abgeschieden werden. Der Technologiereifegrad liegt zwischen 7 und 9.

Kryogene Trennverfahren: In kryogenen Verfahren werden die unterschiedlichen Kondensations- und Sublimationstemperaturen verschiedener Moleküle ausgenutzt. Dabei werden Moleküle nach und nach bei veränderten Temperaturen aus dem Gasmisch entfernt. Von Vorteil ist, dass so sehr reines CO₂ abgeschieden werden kann. Nachteilig sind allerdings der hohe Energieverbrauch

²³ Amine sind organische Stoffe und funktionale Gruppen, sie sich von Ammoniak ableiten. Ein Stickstoffatom weist hierbei drei einfach gebundene Substituenten auf.

²⁴ Häufig Alkali- oder Erdalkalimetalloxide



und die komplexe Technik, besonders bei großen Anlagen. Der Technologiereifegrad liegt je nach gewähltem technologischem Ansatz zwischen 5 und 9.

Membranbasierte Verfahren: Hier erfolgt die Trennung der Moleküle physikalisch aufgrund ihrer Größe, Löslichkeit, Wechselwirkungen mit der Membran oder unterschiedlicher Diffusionsgeschwindigkeiten. Da keine Wärme benötigt wird, wird im Vergleich zur üblichen Aminwäsche meist etwas weniger Energie benötigt (Hou et al. 2022). Der Technologiereifegrad liegt je nach gewählter Membran zwischen 6 und 9.

Adsorptive Verfahren

Druckwechseladsorption:²⁵ CO₂ kann an der Oberfläche von Sorptionsmitteln, wie zum Beispiel Zeolithen, aufgrund von Van-der-Waals-Wechselwirkungen haften. Adsorption und Desorption von CO₂ entsprechen einem Gleichgewicht und können durch angewendeten Drücke und herrschenden CO₂-Konzentrationen gesteuert werden. Der Technologiereifegrad liegt bei 9.

Temperaturwechseladsorption:²⁶ Analog zur Druckwechseladsorption kann das Gleichgewicht auch mittels Temperaturerhöhung verschoben werden. Der Technologiereifegrad liegt zwischen 7 und 9.

Kombinationen von Temperatur- und Druckwechseladsorption werden auch verfolgt, wie beispielsweise die Temperatur-Vakuum-Wechseladsorption.²⁷

CO₂ aus der Atmosphäre

Für die Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre sind vor allem zwei Ansätze von Interesse: das direkte Abscheiden von CO₂ aus der Luft oder das Abscheiden von CO₂ aus Meerwasser. Das Abscheiden von CO₂ aus der Luft wird auch als direct air capture (DAC) bezeichnet. Hierbei wird der CO₂-Gehalt der Atmosphäre direkt verringert. Indirekter ist der Einfluss des Abscheidens von CO₂ aus Meerwasser beziehungsweise den Ozeanen. Bei dem sogenannten direct ocean capture (DOC) erfolgt eine Reduktion des CO₂-Gehalts im Meerwasser. Da der gelöste Kohlenstoff im Ozean in einem chemischen Gleichgewicht mit der Atmosphäre steht, verschiebt der DOC-Prozess dieses Gleichgewicht so, dass weiteres CO₂ aus der Atmosphäre ins Oberflächenwasser übertritt.

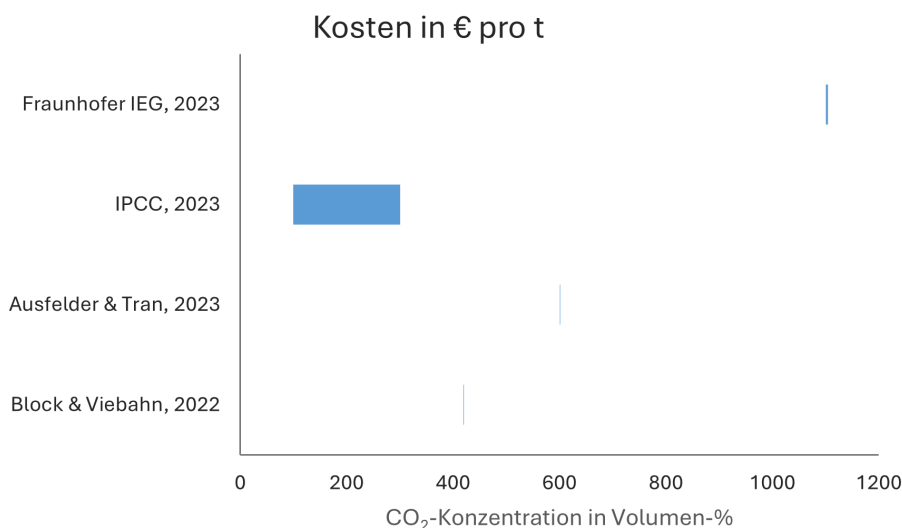


Abbildung 14: Exemplarische Literaturwerte für DAC-Kostenabschätzungen (Ausfelder and Tran 2023; Block and Viebahn 2022; Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC) 2023; Saadat et al. 2023).

DAC-Technologie

Direct Air Capture ist ein Sammelbegriff für verschiedene Technologien, mithilfe derer CO₂ direkt aus der Umgebungsluft entfernt werden kann. Sie nutzen ähnliche Prinzipien (z. B. chemische Sorption oder Feststoff-Adsorption), wie die CO₂-Abscheidung aus industriellen Punktquellen. Sie müssen aber an die deutlich niedrigeren CO₂-Konzentrationen der Luft angepasst werden, was den Prozess energieintensiv macht. Der Technologiereifegrad liegt zwischen 5 und 8. Fortschritte zielen darauf ab, den Energie-

²⁵ Wird in der (englischsprachigen) Literatur PSA (pressure-swing adsorption) genannt.

²⁶ Auch als TSA (temperature swing adsorption) bekannt.

²⁷ Wird auch TVSA (temperature vacuum swing adsorption) genannt.



verbrauch zu senken, beispielsweise durch Verbesserung der Sorptionsmittel oder der Systemeffizienz durch Nutzung von Synergien mit anderen Anlagen am Standort.

Kostenabschätzungen für CO₂-Abscheidung aus der Luft weisen eine recht weite Spanne auf (siehe Abbildung 14). Es ist aufgrund der niedrigeren technologischen Reife und niedrigeren CO₂-Konzentration im Vergleich zu anthropogenen Punktquellen noch mit längerfristig höheren Kosten zu rechnen. Zusätzlich ist anzunehmen, dass Preise für Endkund:innen von publizierten Kostenabschätzungen abweichen dürften. Mit zunehmender Skalierung und technologischer Reife werden Kosten in Zukunft sinken.

DOC-Technologie

Diese Verfahren nutzen das natürliche Gleichgewicht zwischen atmosphärischen und ozeanischen CO₂-Konzentrationen, das durch die Gesetze von Henry und Dalton beschrieben werden. Direct Ocean Capture ist eine relativ neue Idee zur Kohlenstoffabscheidung, die Karbonate direkt aus dem Meerwasser extrahiert. Auf diese Weise entsteht Karbonat-ärmeres Wasser, das nun zur Erreichung des neuen Gleichgewichts wiederum CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen und so die Treibhausgaskonzentration der Atmosphäre reduzieren kann.

Die Technologien zur direkten Abscheidung aus dem Ozean befinden sich in einem frühen Entwicklungsstadium mit einem Technologiereifegrad von etwa 4 bis 6. Das bedeutet, dass diese sich in einem Bereich von kleinen Labor- und Pilotversuchen hin zu größeren Feldversuchen bewegt.

3.3.4. Relevante Prozesse zur Einbindung von CO₂ in chemische Wertschöpfungsketten

Synthesegasproduktion

Grundlage für viele weiterführende chemische Prozesse stellt die Produktion von Synthesegas dar. Hierfür wird das stabile CO₂-Molekül zunächst durch eine Reduktionsreaktion in Kohlenstoffmonoxid (CO) überführt. Dabei dient H₂ als Reaktionspartner. Das entstehende Gasgemisch aus CO und H₂ wird als Synthesegas bezeichnet und stellt eine zentrale Zwischenstufe für die Herstellung verschiedenster Kohlenwasserstoffe, wie Olefine, Aromaten oder Kraft- und Brennstoffe, dar.

In der Industrie wird dafür die sogenannte reverse Wassergas-Shift-Reaktion (rWGS) eingesetzt. Die rWGS-Reaktion ist eine heterogen katalysierte Reaktion, bei der CO₂ mit H₂ zu CO und Wasserdampf (H₂O) umgesetzt wird. Sie stellt die Umkehrung der klassischen Wassergas-Shift-Reaktion²⁸ dar.

Die rWGS-Reaktion läuft endotherm²⁹ ab und wird üblicherweise bei Temperaturen von 400 bis 700 °C durchgeführt. Durch die Wahl des Temperaturfensters kann die Zusammensetzung der resultierenden (Zwischen-) Produkte an den Folgeprozess angepasst werden. Die Reaktion erfordert passende Katalysatoren, zum Beispiel auf Basis von Übergangsmetallen wie Nickel oder Kupfer.

Im Gegensatz zur Wassergas-Shift-Reaktion befindet sich die rWGS-Reaktion noch im Sinne einer industriellen Umsetzung in einem früheren Entwicklungsstadium und wird aktuell demonstriert, etwa von INERATEC und TOPSOE. Hier stellt INERATEC auf der Grundlage von erneuerbarem Strom, (grünem) Wasserstoff und biogenem CO₂ synthetische Chemikalien und Kraftstoffe hauptsächlich auf der Grundlage der rWGS und Fischer-Tropsch-Synthese her. Im Falle einer am 13. Mai 2025 in Betrieb genommenen Anlage am Standort Höchst nutzt INERATEC CO₂ aus einer Biogasanlage (INERATEC 2025). Die rWGS-Reaktion ist somit ein Schlüsselprozess in vielen Power-to-X-Konzepten, die erneuerbaren H₂ mit CO₂ koppeln und daraus kohlenstoffbasierte Produkte herstellen.

Ein weiterer alternativer Pfad zur Synthesegasherstellung über CO₂ ist die elektrochemische Reduktion, bei der CO aus CO₂ unter der Abspaltung von Sauerstoff entsteht. Das Verfahren ist mit der Wasserelektrolyse verwandt. Der technologische Reifegrad dieses Ansatzes ist allerdings noch im mittleren Bereich zu verorten, daher wird in naher Zukunft nicht erwartet, dass großen Mengen an Synthesegas über diesen Prozess hergestellt werden. Diese Einordnung gilt auch für plasmakatalytische Verfahren zur Umwandlung von CO₂ in CO und anschließende Weiterverarbeitung.

²⁸ Die Wassergas-Shift-Reaktion wird beispielsweise im SMR-Prozess genutzt, um die Wasserstoffausbeute zu erhöhen: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$

²⁹ Unter externer Energiezufuhr



Direkte Methanolproduktion aus CO₂

Im Gegensatz zur klassischen Methanolsynthese über Synthesegas nutzt die Firma Carbon Recycling International CO₂ direkt, um Methanol herzustellen. Es ist somit kein Zwischenschritt über die rWGS-Reaktion nötig. Es wird allerdings ein Teil des CO₂ als Nebenprodukt zu CO reduziert. Diese CO-Komponente kann ebenfalls in den Prozess einfließen und zu Methanol reagieren. Laut Carbon Recycling International ist das Verfahren energetisch effizienter als der Umweg über CO und H₂, da es nur einen Reaktor und einen Reaktionsschritt nutzt.

Carbon Recycling International hat die zurzeit größte CO₂-zu-Methanol-Anlage der Welt mit einer Kapazität von 110 kt/a in Betrieb genommen (Carbon Recycling International n.d.). Die Anlage wurde auf dem Gelände des Projektpartners Henan Shuncheng Group in Anyang, Provinz Henan, China, errichtet. Die Anlage wurde von dem Joint-Venture-Unternehmen Shunli finanziert und befindet sich in dessen Besitz. Laut Carbon Recycling International werden mit der Anlage über 160 kt CO₂/a recycelt. Das produzierte CO₂-basierte Methanol wird an den wachsenden lokalen Markt für Chemikalien und Kraftstoffe verkauft. Der Technologiereifegrad für die Anlage kann mit 9 bewertet werden. (Carbon Recycling International n.d.)

Weitere Anwendungen

Bereits heute wird CO₂ in der chemischen Industrie abgeschieden und in anderen Prozessen verwendet (vgl. Harnstoffproduktion). Dies ist jedoch nicht nur auf die Chemieindustrie beschränkt. CO₂ kann auch in weiteren Prozessen oder anderen Industriezweigen direkt genutzt werden, wie etwa für Feuerlöscher oder in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie. Hier werden beispielsweise Kaffeebohnen entkoffeiniert oder Mineralwasser, Limonaden oder Bier mit CO₂ versetzt. Etwa 6 % des global gehandelten CO₂ wurde im Jahr 2015 in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie verwendet (International Energy Agency 2019). Diese direkten CO₂-Nutzungspfade werden allerdings nicht aus Nachhaltigkeitsgründen durchgeführt, sondern von dem Hintergrund der Eigenschaften des Moleküls. Des Weiteren kann CO₂ mineralisiert werden und dann beispielsweise als Baustoff zur Verfügung stehen. Dieser könnte so als langfristiger Produktspeicher dienen und könnte somit einen wichtigen Beitrag zur Reduktion von CO₂-Emissionen in der Baubranche leisten.

3.3.5. Transport- und Standortfragen

Derzeit weisen Prozesse der (petro-)chemischen Industrie einen hohen Integrationsgrad auf. Ausgangsstoffe und Produkte werden in Industrieparks kaskadenartig in verschiedene Prozesse eingebracht. Durch Prozessanpassungen wie Nutzung anderer Rohstoffbasis könnten Zwischenprodukte wegfallen, die für Folgeprozesse benötigt werden. Gleichzeitig könnten so weitere Industrien und Prozesse über geschickte Technologie- oder Rohstoffwahl defossilisiert werden.

Durch ein bundes- oder europaweites CO₂-Netz könnten neu erschlossene CO₂-Quellen, wie Müllverbrennungsanlagen oder Zementwerke, mit entfernteren Nutzungsstandorten verbunden werden. Zusätzlich sollte ein CO₂-Netz auch die dauerhafte Speicherung in geologischen Formationen ermöglichen.

3.3.6. Kontroversen

Es besteht grundsätzlich Konsens, dass der CO₂-Gehalt der Atmosphäre sinken sollte. Auch sollte der Eintrag von Treibhausgasen in die Atmosphäre bereits heute vermieden werden. Jedoch wird die CO₂-Abscheidung an industriellen Punktquellen auch kritisch gesehen, da sie als Rechtfertigung für die langfristige Nutzung fossiler Rohstoffe dienen könnte.

Zur Nutzung von CO₂ herrscht auch Uneinigkeit auf der Weltbühne (Battersby et al. 2024; Canada Invests in Cutting-Edge Carbon Capture and Storage to Drive Clean Energy Innovation 2025; Carbon Capture, Utilization and Sequestration 2025; Carbon Gap 2024a, 2024b; Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique 2024; Musick and Kile 2023). Die Abwägung zwischen dauerhafter Speicherung von CO₂ in geologischen Schichten und der wirtschaftlichen Relevanz CO₂-basierter Produkte stellt dabei die grundlegende Kontroverse dar (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2025; International Energy Agency 2019).

Auch langlebigere CO₂-basierte Produkte weisen eine begrenzte Lebensdauer auf. Dies bedeutet, dass das darin gebundene CO₂ am Ende des Lebensweges wieder freigesetzt wird. Daher müssen Aspekte der Klimawirkung genauer betrachtet werden. Dies gilt neben der sorgfältigen Auswahl der Kohlenstoffquellen auch für die Bewertung, ob und in welchem Maße in der Entwicklung befindliche Technologien zur Erreichung der Klimaschutzziele in Deutschland und der EU beitragen können.

Bei der Betrachtung des Ursprungs und Verbleibs des genutzten CO₂ gibt es verschiedene Pfade, durch die entweder Emissionen eingespart werden, der Prozess im Sinne der rohstoffbedingten Nutzung von CO₂ klimaneutral ist, oder sogar Emissionen der Atmosphäre langfristig entzogen werden können (vgl. Abbildung 15). Wird das CO₂ der Atmosphäre entzogen, so stellt es bei



der Wiederfreisetzung einen klimaneutralen Kreislauf dar. Alternativ kann das CO₂ aus fossilen Quellen im möglichst langlebigen Produkt gebunden und so initial nicht emittiert werden. Negative Emissionen können erzielt werden, wenn CO₂ aus der Luft abgetrennt wird und das CO₂ im Produkt verbleibt.

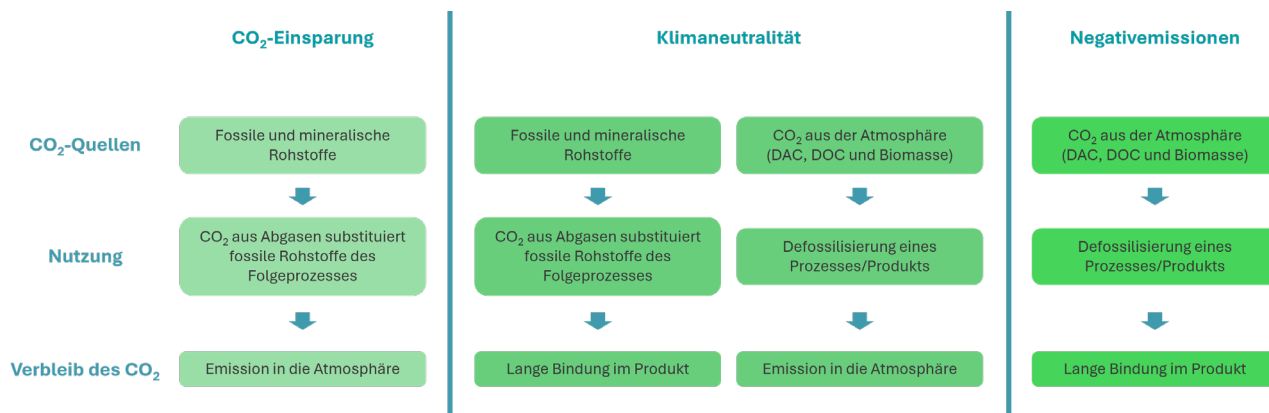


Abbildung 15: Schematische Übersicht über verschiedene CCU-Wertschöpfungsketten und deren Klimabewertung.

3.4. Gegenüberstellung und Bewertung alternativer Kohlenstoffquellen

Die Erschließung alternativer Kohlenstoffquellen, wie Biomasse, Kunststoffabfälle und CO₂, als Ersatz für fossile Rohstoffe in der chemischen Industrie bietet vielversprechende Perspektiven, bringt jedoch auch eine Reihe differenzierter Vor- und Nachteile mit sich. Tabelle 4 stellt die ausgewählten alternativen Kohlenstoffquellen gegenüber und bewertet Biomasse, Kunststoffabfällen und CO₂ anhand ausgewählter Kriterien, um deren zukünftige Relevanz für die chemische Industrie einzuordnen. Die einzelnen Kriterien sind mit einem Ampelfarbsystem gekennzeichnet worden.

In der Kategorie Verfügbarkeit wird dargestellt, wie der verfügbare Kohlenstoff im Verhältnis zum Bedarf der chemischen Industrie zu bewerten ist. Hier ist bei der Biomassennutzung zwischen theoretischem Potenzial und tatsächlich mobilisierbarer Biomasse aus dem bisher ungenutzten technischen Potenzial zu unterscheiden. Auch bei der CO₂-Abscheidung ist die Verfügbarkeit je nach Quelle unterschiedlich.

Die Kategorie Marktreife zeigt auf, wie relevant ein Pfad im Sinne der bisherigen Umsetzung ist. Der technologische Reifegrad zur Nutzung der Kohlenstoffquellen ist prinzipiell bei allen Pfaden recht hoch, mengenmäßig spielen die Technologien derzeit jedoch keine große Rolle.

Die Bewertung des Prozessaufwands schließt die Gewinnung des Kohlenstoffmediums mit ein. Sofern Biomasse und Kunststoffe mit entsprechender Qualität und Sortenreinheit für den eigentlichen Umwandlungsprozess zur Verfügung stehen, kann der Aufwand geringer ausfallen. Bei der CO₂-Abscheidung ist die Konzentration der genutzten Quellen entscheidend. Zusätzlich ist die jeweilige Einschätzung stark von den jeweiligen Folgeprozesse und Produkten abhängig.

Die Kategorie Klimaneutralität behält die CO₂-Emissionen der gesamten Wertschöpfungskette im Blick. So ist unter anderem im Sinne einer klimaneutralen Gesamtbilanz relevant, welche CO₂-Quelle genutzt wird und wo das CO₂ verbleibt. Teils können negative Emissionen, etwa bei Nutzung von Biomasse, entstehen.

Beim Punkt Infrastruktur wird bewertet, welche Infrastrukturen aktuell und in Zukunft genutzt werden. Zumeist geschieht der Transport über die Straße. Bei steigender Nutzung dieser alternativen Kohlenstoffquellen könnte ein Ausweichen auf Alternativen nötig werden, etwa die Schiene oder ein dediziertes CO₂-Pipelinetz.



Tabelle 4: Gegenüberstellung von alternativen Kohlenstoffquellen. Die Kategorien sind nach dem Ampelprinzip von orange nach grün eingefärbt.

| Kategorie | Biomasse | Kunststoffabfälle (chem. Recycling) | CO ₂ |
|--|--|--|---|
| Verfügbarkeit | Hoch (Gesamtpotenzial) → Theoretisches Potenzial hoch | Niedrig (Gesamtpotenzial) → geringe Verfügbarkeit sortenreiner Kunststoffabfälle, auch bei voraussichtlich anwachsendem Abfallaufkommen | Hoch (Atmosphäre) → Theoretisch unbegrenzt vorhanden |
| | Mittel (Ungenutzte Biomasse) → Regional abhängig, saisonale Schwankungen | | Niedrig bis mittel (Punktquellen) → Durch Energiewende können leicht erschließbare Quellen entfallen |
| Marktreife Technologischer Entwicklungsstand | Mittel → Viele Verfahren bekannt, inhomogenes Ausgangsmaterial macht die Nutzung komplex | Niedrig → Chemische Recyclingverfahren nur in sehr kleinen Maßstab umgesetzt | Mittel bis hoch → Erste Demonstrationsanlagen umgesetzt |
| Prozessaufwand | Hoch → Heterogene Rohstoffe, meist Vorbehandlung nötig | Hoch → Sammlung, Sortierung und Reinigung erforderlich | Hoch → Energieintensive Abscheidung und Folgeschritte |
| Klimaneutralität Gesamtbilanz | Hoch → bei nachhaltigem Anbau, negative Emissionen möglich | Mittel bis hoch → Zweitnutzung fossilen Kohlenstoffs möglich | Mittel (Punktquellen) → Abh. v. CO ₂ -Quelle und -Verbleib |
| | | | Hoch (Atmosphäre) → Negative Emissionen möglich |
| Infrastruktur Rohstofftransport | Vorhanden → Nutzung bestehender Verkehrsinfrastruktur | Vorhanden → Nutzung bestehender Verkehrsinfrastruktur | Vorhanden → Pipelines an Industriestandorten, Straße |
| | | | Nicht vorhanden → Pipelinennetz für CO ₂ -Transport |
| Nutzungskonkurrenz | Hoch → Nahrungsmittel, Energiepflanzen für Kraft- und Brennstoffe | Mittel bis hoch → mechanisches Recycling, thermische Verwertung (Strom, Wärme) | Mittel bis hoch → dauerhafte Speicherung, direkte Nutzung (Getränke, Feuerlöscher) |
| Ökonomische Aspekte Aktueller Stand | Mittel → Teils günstig, hoher logistischer Aufwand | Mittel → günstiger Rohstoff, teure Folgeprozesse | Niedrig → teure CO ₂ -Abscheidung, Infrastrukturinvestment |



Teilweise besteht hohe Nutzungskonkurrenz bei diesen alternativen Kohlenstoffquellen. Besonders die Nutzung von Biomasse kann sehr vielseitig sein und steht in Konkurrenz mit der Produktion von Nahrungsmitteln, biobasierten Kraft- und Brennstoffen, sowie Brach- und Naturschutzflächen für die Biodiversität.

In der letzten Kategorie Ökonomische Aspekte wird der aktuelle Marktwert aufgezeigt. Besonders Abfälle als Kohlenstoffquellen stellen meist eine günstige Option dar. Aufgrund der Vielfältigkeit können Folgeprozesse jedoch energie- und damit kostenintensiver ausfallen.



4. Vom Synthesegas zu Grundchemikalien - der Einstieg in die chemische Wertschöpfung

Synthesegas ist ein flexibler Ausgangsstoff, der in einer Vielzahl von Reaktionen verwendet werden kann, um verschiedene Produkte zu erzeugen. Somit bietet Synthesegas die Möglichkeit, CO₂ als Rohstoff kurz- bis mittelfristig im großen Maßstab in die verzweigten Wertschöpfungsketten der organischen Chemie einzubringen.

4.1. Methanolsynthese

Methanol wird bereits im industriellen Maßstab aus Synthesegas gewonnen, welches als Basis für weitere Produkte dient. Den sogenannten Methanolrouten wird in einem künftig klimaneutralen System ein großer Wert beigemessen, da hierdurch (Zwischen-)Produkte der bisher erdölbasierten petrochemischen Wertschöpfungsketten erzeugt werden können. So könnten die Olefine Ethylen, Propylen und Buten oder die Aromaten Benzol, Toluol oder Xylol produziert werden (vgl. Abbildung 16). Die Prozesse zu Umwandlung von Methanol zu Aromaten sind hingegen in einen niedrigeren Entwicklungsstand und sind daher noch nicht marktreif.

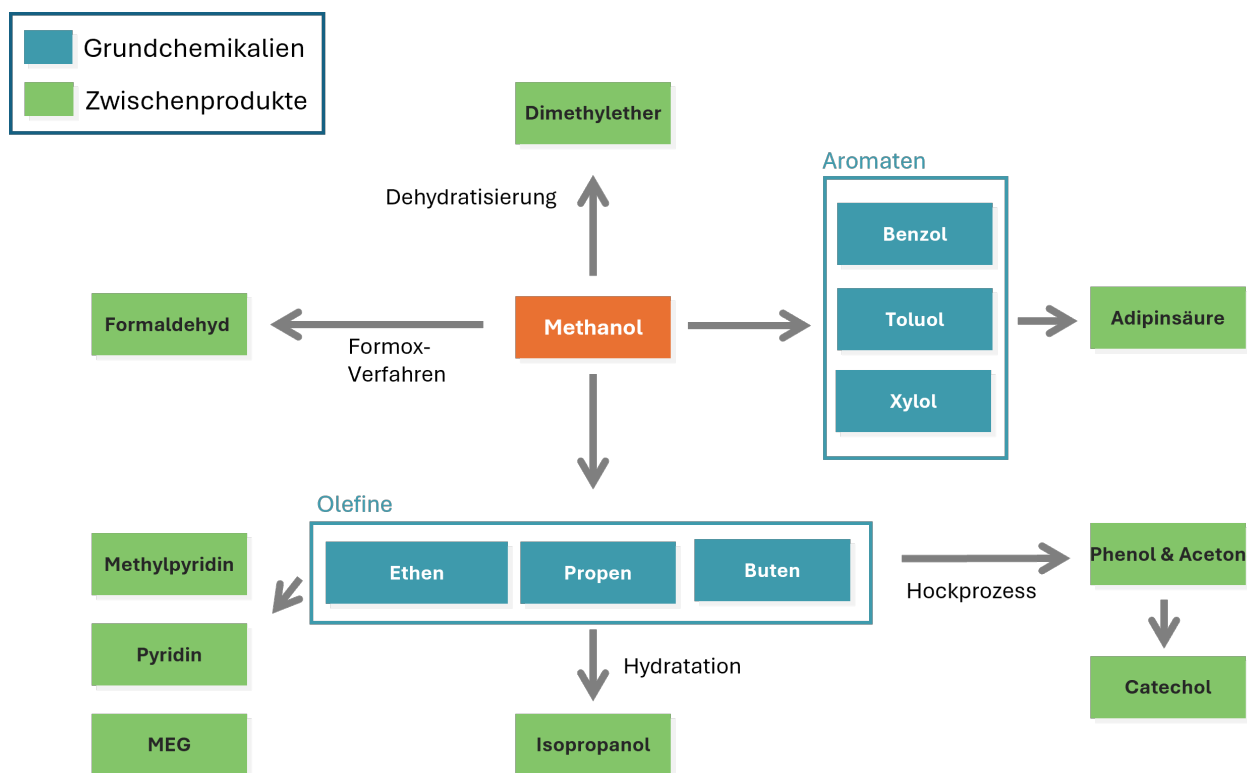


Abbildung 16: Darstellung möglicher Produkte auf Basis von Methanol und den dafür notwendigen Prozessen.
MEG: Monoethylenglycol



4.2. Fischer-Tropsch-Synthese

Die Fischer-Tropsch-Synthese (FT-Synthese) nutzt Synthesegas zur Erzeugung eines flüssigen Zwischenprodukts, dem sogenannten Syncrude. Dabei handelt es sich um ein synthetisches Rohöl, das eine Mischung aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen enthält. Syncrude ist ein vorgelagerter Rohstoff, der erst durch weitere Verarbeitungsschritte – etwa durch Destillation oder Cracken – in nutzbare Endprodukte wie synthetisches Kerosin, Olefine, Paraffine, Öle oder Wachse überführt wird. (siehe Abbildung 17).

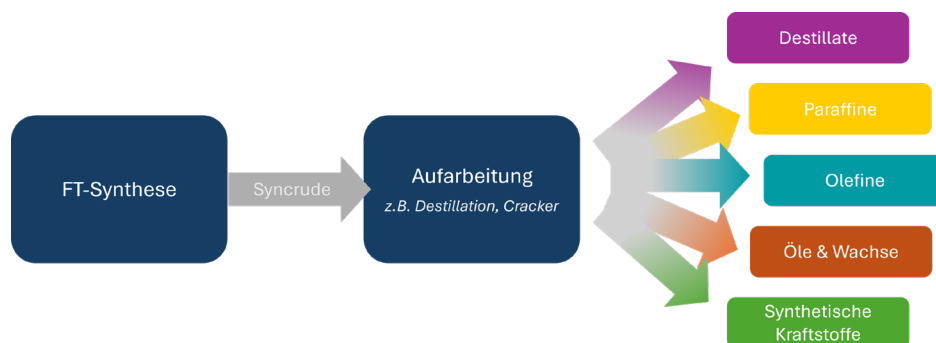


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Prozesskette von Synthesegas zu Produkten der Petrochemie.

4.3. Harnstoffproduktion

Harnstoff wird hauptsächlich als Stickstoffdüngemittel genutzt. Daneben kommt Harnstoff in der Abgasnachbehandlung zu Einsatz. Harnstoff stellt jedoch auch ein wichtiger Grundstoff für die chemische Industrie dar, etwa für die Produktion von Kunstharzen und Kosmetika.

Für die Harnstoffsynthese wird momentan über die Wassergas-Shift-Reaktion zunächst der Wasserstoffgehalt von Synthesegas erhöht. Das resultierende CO_2 stellt ein Katalysatorengift für die Ammoniaksynthese dar und wird abgeschieden. Dieses CO_2 kann nun für weitere Anwendungen, etwa für die darauffolgende Harnstoffsynthese genutzt werden (vgl. Abbildung 18).

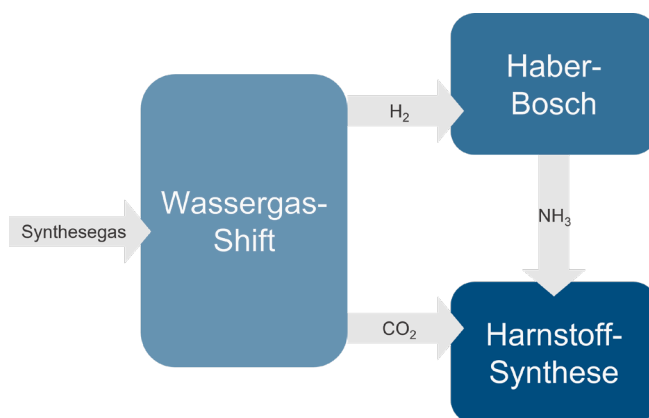


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Produkt- und Eduktflüsse in der integrierten Ammoniak- und Harnstoffsynthese.

In der Theorie können die fossilen Rohstoffe, die derzeit zur Produktion von Ammoniak und Harnstoff verwendet werden, direkt durch alternativ hergestellten Wasserstoff und CO_2 ersetzt werden. Sollte so in Zukunft grünes Ammoniak mithilfe von Elektrowasserstoff hergestellt werden, so stünde der oben beschriebene Weg nicht mehr zur Verfügung und alternative CO_2 -Quellen müssten integriert werden. Da die Ammoniak- und Harnstoffsynthese einen hohen Integrationsgrad aufweist, ist die Integration grünen Wasserstoffs oder Ammoniaks in bestehende Anlagen mit erheblichen Anpassungen verbunden.



5. Künftige Entwicklungen - Szenarien zur Kohlenstoffnutzung

5.1. Rahmenbedingungen und allgemeine Annahmen

Um abzuschätzen, in welchem Umfang der Kohlenstoffbedarf der chemischen Industrie künftig durch chemisches Recycling von Kunststoffabfällen, Biomasse und CO₂ gedeckt werden kann, wurden verschiedene Annahmen für drei unterschiedliche Szenarien für Deutschland und die EU getroffen. Diese Szenarien zeigen auf, welche Beiträge die Pfade zur alternativen Kohlenstoffversorgung im Hinblick auf eine vollständige Substitution fossiler Rohstoffe beitragen können.

Für die Genese der Szenarien wurde zunächst der aktuelle Kohlenstoffbedarf für Deutschland und die EU ermittelt, sowie die derzeitigen Bezugsquellen analysiert. Um die Betrachtung der Kohlenstoffströme in einem vereinfachten Rahmen zu ermöglichen, wurden die in Kapitel 2.2 und 2.3 beleuchteten Grundchemikalien stellvertretend für die gesamte organische Chemie betrachtet. Diese Chemikalien machen bis zu 42 % der chemischen Produkte in Deutschland aus (Verband der Chemischen Industrie (VCI) 2024) und stehen am Anfang einer Vielzahl von Wertschöpfungsketten. Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, lassen sich diese Grundchemikalien mithilfe von Synthesegas und Methanol herstellen.

Basierend auf den heutigen Produktionsmengen (siehe Kapitel 2.3) wurde der Kohlenstoffgehalt der betrachteten Chemikalien stöchiometrisch berechnet, um den Gesamtbedarf für chemische Wertschöpfungsketten zu ermitteln. Alle Betrachtungen im Folgenden zielen darauf ab, alternative Kohlenstoffquellen frühzeitig in chemische Wertschöpfungsketten zu integrieren. Wie in den vorhergehenden Kapiteln beleuchtet, liegt der Fokus auf abgeschiedenem CO₂ und Synthesegas aus chemischem Recycling und Biomasse, da diese gut in Folgeprozesse integrierbar sind und ein ähnliches Produktspektrum erreicht werden kann. So werden jedoch nicht alle theoretisch möglichen Nutzungspfade alternativer Kohlenstoffquellen in diese Analyse einbezogen, wie z. B. mechanisches Recycling, da das Rezyklat nicht als Ausgangsstoff für die Herstellung von Grundchemikalien geeignet ist. Als zentrale Rahmenbedingung für die Szenarien wurde das Erreichen der politisch gesetzten Klimaschutzziele wie die Treibhausgasneutralität im Jahr 2050 in der EU und 2045 in Deutschland, vorausgesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass die regulatorischen Entwicklungen für eine CO₂-Infrastruktur konsequent weiterverfolgt werden. Weiterhin wird angenommen, dass die Ausschöpfungsmöglichkeiten der Potenziale für Biomasse und (chemisches) Recycling durch technologische Hürden und andere Faktoren, beispielsweise Rentabilität oder Nutzungskonkurrenzen, begrenzt sind. Diese sind jedoch oftmals aus energetischen Gründen der CO₂-Abscheidung und -Nutzung vorzuziehen. Durch diese angenommene Anwendungshierarchie wird in den Szenarien zuerst das unter Berücksichtigung der Restriktionen verfügbare Potenzial des chemischen Recyclings und der Biomasse ausgeschöpft. Der verbleibende Kohlenstoffbedarf muss durch die Nutzung von CO₂ gedeckt werden.

Im Rahmen dieser Studie wurde der heutige Stand der Technik betrachtet und eine plausible Entwicklung für den technischen Fortschritt bis 2035 und 2045/2050 angenommen. Zusätzlich wurden Annahmen beispielsweise für die Dauer von Genehmigungsverfahren sowie der voraussichtliche Zeitraum für die Errichtung der Anlage mit in die Überlegungen einbezogen. Auf der Basis von Erfahrungen wird eingeschätzt, dass ein Ausbau von heute noch nicht in der Breite eingesetzten Technologien bis 2035 nur in einem überschaubaren Rahmen erfolgen kann. Folglich muss bis dahin der Kohlenstoffbedarf der chemischen Grundstoffindustrie noch größtenteils über fossile Rohstoffe gedeckt werden. Werden die Technologien im Jahr 2035 erfolgreich betrieben und liegen robuste Geschäftsmodelle vor, so kann der Ausbau zwischen 2035 und 2045/2050 voraussichtlich deutlich voranschreiten.

Grundsätzlich wurde unterschiedliche mögliche Entwicklungen der chemischen Grundstoffindustrie in verschiedenen Szenarien dargelegt. Hierbei steht die Wachstumsrate stellvertretend für die konjunkturelle Lage. Adoptionsraten für die Nutzung biogener Kohlenstoffquellen, sowie von chemischem Recycling, spiegeln den Technologiehochlauf und damit auch getroffene Investitionsentscheidungen für oder gegen grüne Technologien wider.

5.1.1. Chemisches Recycling

Das chemische Recycling von Kunststoffabfällen stellt aktuell noch einen Nischenmarkt dar. Anlagen existieren heute noch nicht in einem großtechnischen Maßstab. Werden übliche Genehmigungsverfahren und Bauzeiten für neue Anlagen berücksichtigt, kann davon ausgegangen werden, dass ein Hochlauf erst in der nächsten Dekade Fahrt aufnehmen könnte. Grundsätzlich wer-



den für die EU Potenziale von bis zu 7,3 Mt/a bis zum Jahr 2050 gesehen, je nach Szenario und Modell (Plastics Europe n.d.; Rizos et al. 2023; SYSTEMIQ 2022).

Mechanisches Recycling wird bei der Verwertung von Kunststoffabfällen daher weiterhin zunächst die dominante Technologie-richtung bleiben (Rizos et al. 2023). Mit voranschreitender technologischer und ökonomischer Entwicklung werden chemische Recyclingverfahren einen wichtigen Part in der Zukunft einnehmen können – besonders für Abfälle, bei denen ein weiteres mechanisches Recycling aus ökonomischen oder technischen Gründen nicht mehr möglich ist.

Für diese Studie wurde ein Potenzial von 2,3 Mt/a Kunststoffabfälle für das chemische Recycling in Deutschland (Ausfelder et al. 2023) und 7,3 Mt/a in der Europäischen Union (SYSTEMIQ 2022) ermittelt (vgl. Kapitel 3.2.1). Der Kohlenstoffgehalt schwankt je nach Ausgangskunststoff; so stünden etwa 1,6 Mt Kohlenstoff pro Jahr beziehungsweise 5,0 Mt Kohlenstoff pro Jahr zur Verfügung.

5.1.2. Biomassenutzung

Die Nutzung von Biomasse ist sehr facettenreich. Vor diesem Hintergrund gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten Biomasse für die Herstellung unterschiedlichster Produkte zu nutzen. Dabei können Grundchemikalien, Zwischenprodukte oder direkt Produkte für den Endkonsument:innen erzeugt werden. Die Überlegungen konzentrieren sich auf Verfahren, die ein möglichst hohen Technologiereifegrad aufweisen und sich besonders gut für die Verarbeitung stark heterogener Biomasseströme eignen. Hierbei stehen die thermochemischen Verfahren Pyrolyse und Vergasung im Fokus. Dennoch könnten neue Technologien und Entwicklungen in Zukunft zur Erhöhung der Biomassenutzung beitragen und würden die Rolle von Biomasse zur Deckung des Kohlenstoffbedarfs steigern.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde für die Biomasse vereinfachend angenommen, dass das generell verfügbare Potenzial an biogenem Kohlenstoff in Deutschland voraussichtlich nicht signifikant zunehmen wird. Die landwirtschaftlich nutzbare Fläche dürfte sogar tendenziell abnehmen, da weiterhin Flächen für Siedlungs- und Verkehrszwecke beansprucht werden. Zwar könnte ein Rückgang des Fleischkonsums dazu führen, dass Teile der aktuell für Futtermittelproduktion genutzten landwirtschaftlichen Fläche (ca. 60 %) für die chemische Industrie verfügbar werden. Allerdings importiert Deutschland derzeit erhebliche Mengen pflanzlicher Proteine für die Tierernährung und exportiert weiterhin Fleisch in Regionen mit steigendem Fleischkonsum infolge höherer Lebensstandards.

Grundsätzlich wird unterstellt, dass biomassebasierte Anlagen zukünftig verstärkt für Hochtemperaturanwendungen und zum Ausgleich der volatilen Einspeisung von Wind- und Solarenergieanlagen eingesetzt werden, wie in vielfältigen Energiesystemanalysen modelliert (Agora Think Tanks 2024; Boston Consulting Group and Prognos 2018; Deutsche Energie-Agentur 2021; European Commission on behalf of the European Union 2024a; Fleiter et al. 2024). Dadurch ist die stoffliche Verfügbarkeit von Biomasse eingeschränkt. Für Biomasseströme, die derzeit fest in Wertschöpfungsketten eingebunden sind, wird angenommen, dass dies voraussichtlich auch in der Zukunft so bleiben wird. Deutschland verfügt heute zum Beispiel über die meisten Biogasanlagen innerhalb der EU. In der vorliegenden Studie gehen wir davon aus, dass die Ausgangsstoffe dieser Anlagen weiterhin primär für die Energieversorgung genutzt werden und somit nicht für stoffliche Verwendung zur Verfügung stehen.

In Deutschland besteht so ein Potential von ungenutzter, mobilisierbarer Biomasse von etwa 28 Mt TM/a und damit etwa 14 Mt Kohlenstoff pro Jahr (s. Kapitel 3.1.1). In der Europäischen Union entsprechend 143 Mt TM/a bzw. 71 Mt Kohlenstoff pro Jahr entspricht.

5.1.3. CO₂-Abscheidung und -Nutzung

Nicht alle industriellen CO₂-Ströme eignen sich aus techno-ökonomischen, sowie regulatorischen Gründen für eine langfristige Nutzung, da beispielsweise Abgasströme von Kohlekraftwerken über den beschlossenen Kohleausstieg zeitlich begrenzt verfügbar sein werden. Daher schrumpft das insgesamt zur Verfügung stehende Potenzial an verfügbarem CO₂. Gleichzeitig kann über den Wegfall fossiler Rohstoffe und Prozesse eine Konkurrenz neuer CO₂-Nutzungsvarianten, wie beispielsweise der Fischer-Tropsch-Synthese synthetischer Kraftstoffe, mit bereits Bestehenden, wie etwa der CO₂-Nutzung bei der Harnstoffsynthese, entstehen.

Für die Berechnung der Szenarien wurden CO₂-Abscheidungspotenziale aus natürlichen und industriellen Quellen der Literatur herangezogen. Dabei wurden biomassebasierte, sowie unvermeidbare Emissionen und DAC berücksichtigt, um eine klimaneutrale Zukunft zu modellieren. So könnten in Deutschland im Jahr 2045 etwa 13 Mt C und in der Europäischen Union im Jahr 2050



etwa 123 Mt C zur Verfügung stehen, basierend auf den O45-Langfristszenarien (Fleiter et al. 2024), sowie des Szenario 3 des Impact Assessment Reports der Europäischen Union (European Commission on behalf of the European Union 2024a). Zusätzliche Informationen finden sich in Kapitel 3.2.1.

5.1.4. Weitere Randbedingungen

Petrochemische Wertschöpfungsketten stellen grundlegende Produkte des täglichen Lebens her. Grundchemikalien stehen am Anfang der chemisch-pharmazeutischen Wertschöpfung und weisen meist eine geringe Marge auf. Dies bedingt im Umkehrschluss einen großflächigen Absatz, um Produktionslinien mit dem notwendigen Gewinn zu betreiben. Eine mit der Transformation verbundene Verteuerung, sowie sinkende Absätze, könnten dieses Wirtschaftsmodell ins Wanken bringen. Bei höherpreisigen Produkten und Spezialchemikalien würde sich eine Umstellung auf grüne Varianten voraussichtlich leichter umsetzen lassen, da ein Aufpreis für grüne Produkte im Hochpreis- oder Consumersegment eher akzeptiert wird. So könnten höherpreisige grüne Produkte den Weg für günstigere grüne Produkte ebnen, was besonders bis 2035 relevant sein könnte. Diese Überlegungen sind für die Einordnung der Ergebnisse relevant, sie sind jedoch nicht quantifizierbar und sind somit nicht direkt in die Szenarien eingeflossen.

Gesellschaftliche Entwicklungen, die eine sinkende Nachfrage nach den Produkten der chemischen Industrie bedingen wurden, wurden nicht allgemein abgebildet, flossen aber indirekt in zwei der drei im Folgenden dargestellten Szenarien ein. Der genaue Impact einer zero-waste-Bewegung, einer Substitution von Produkten oder zunehmenden Re- und Upcyclings ist nicht genau abschätzbar, kann jedoch auch Auswirkungen auf die Verfügbarkeit alternativer Kohlenstoffquellen haben, etwa bei Reststoffen für chemisches Recycling oder der thermischen Verwertung.

Die Berechnungen für Deutschland und die Europäische Union wurden unabhängig voneinander durchgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen Betrachtungsrahmen kann es dabei zu abweichenden Ergebnissen, etwa bei der nötigen Menge von abgedecktem CO_2 , kommen. Zusätzlich wurde hier kein Im- oder Export von alternativen Kohlenstoffquellen oder Folgeprodukten für die Nutzung in der chemischen Industrie angenommen. Zusätzlich wurden keine Verluste in den verschiedenen Produktionsprozessen hinterlegt. Weiterhin wurde vereinfachend angenommen, dass keine grüne Konkurrenzprodukte aus anderen Ländern importiert werden, beziehungsweise nur heimische Produktionskapazitäten berücksichtigt. Die Bedarfe müssen daher in dieser Studie über inländisch beziehungsweise innereuropäisch verfügbare Quellen gedeckt werden. Ob dies im Jahr 2045 bzw. 2050 noch zutreffend ist, hängt von vielen Faktoren ab, unter anderem von der politischen Neuausrichtung wirtschaftsstarker Länder wie China oder der Vereinigten Staaten von Amerika und deren Einfluss auf die Klimaziele weltweit.

5.2. Szenarien zur Bereitstellung alternativer Kohlenstoffquellen für die chemische Industrie

Um das Spektrum der möglichen Entwicklungen aufzuzeigen, wurden drei Szenarien für diese Studie entwickelt. In diesen dienen die verschiedenen alternativen Kohlenstoffquellen für die anschließende Produktion von Grundchemikalien. Da die vorgestellten Verfahren (vgl. Alternative Kohlenstoffquellen) zur Integration und Nutzung alternativer Kohlenstoffquellen zum heutigen Stand noch nicht vollständig marktreif entwickelt und in der Breite einsatzbereit sind, wurde der technologische Hochlauf über drei Szenarien abgebildet. So bilden diese einen Optionenraum, in dem eine Entwicklung stattfinden könnte.

5.2.1. Szenarien zur Bereitstellung alternativer Kohlenstoffquellen für die chemische Industrie

Um das Spektrum der möglichen Entwicklungen aufzuzeigen, wurden drei Szenarien für diese Studie entwickelt. In diesen dienen die verschiedenen alternativen Kohlenstoffquellen für die anschließende Produktion von Grundchemikalien. Da die vorgestellten Verfahren (vgl. Alternative Kohlenstoffquellen) zur Integration und Nutzung alternativer Kohlenstoffquellen zum heutigen Stand noch nicht vollständig marktreif entwickelt und in der Breite einsatzbereit sind, wurde der technologische Hochlauf über drei Szenarien abgebildet. So bilden diese einen Optionenraum, in dem eine Entwicklung stattfinden könnte.

5.2.2. Optimistischer Trend

Bei einer positiven Trendauslegung erfolgt eine erhöhte Produktion chemischer Produkte mit Wachstumsraten von bis zu 1-1,5 % pro Jahr. Hierbei wird impliziert, dass eine, über die Zeit ansteigende, Nachfrage nach grünen Produkten besteht. Dieses Szenario setzt auf eine Vorreiterrolle der EU bei klimaneutralen, grünen Technologien. So können auch größere Mengen Biomasse nutzbar gemacht werden, sowie chemische Recyclingverfahren in der Fläche vorangetrieben werden.



5.2.3. Pessimistischer Trend

Bei einer deutlich pessimistischeren Auslegung der Gedanken des Trend-Szenarios kann das Negativwachstum bis zu 2,5-3 % pro Jahr betragen. Dieses Szenario weist auch die geringsten Adoptionsraten für biomassebasierte Kohlenstoffquellen, sowie chemisches Recycling auf, da die technologische Entwicklung bis zur Marktreife in einer schlechten wirtschaftlichen Lage langsamer verlaufen kann. Etwa, weil Investitionen in unreife Technologien häufig aufgeschoben werden und Kredite schwieriger zu bekommen sein können.

5.2.4. Übersicht über die Szenarien

In Kombination zeigen die drei Szenarien die erwartete Bandbreite der Nutzung alternativer Kohlenstoffquellen für die Produktion von Grundchemikalien auf. Der hierbei eröffnete Optionenraum beinhaltet auch Sensitivitäten in Bezug auf den technologischen Hochlauf bei der Integration der vorgestellten alternativen Kohlenstoffquellen.

Wie vorab beschrieben entstehen hierbei Unterschiede im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen und den damit verbundenen Wachstumsraten der chemischen Industrie. Das Basis-Szenario weist hier eine Bandbreite von 4 Prozentpunkten auf (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5: Wachstumsraten der chemischen Industrie in Prozent pro Jahr für die drei betrachteten Szenarien.

| Jährliche Wachstumsrate in % | optimistisch | Basis-Szenario | pessimistisch |
|------------------------------|--------------|----------------|---------------|
| 2023-2035 | +1,0 | -1,0 | -3,0 |
| 2036-2050 | +1,5 | -0,5 | -2,5 |

Durch diese Annahmen zur wirtschaftlichen Entwicklung ergeben sich auch Auswirkungen auf die technologischen Umsetzungsmöglichkeiten. Bei negativen Wachstumsraten erfolgen meist weniger Investitionen in Forschung und Entwicklung. Dadurch können weniger ausgereifte Technologien mit geringerer Kapazität zur Verfügung stehen. Der Einsatz des chemischen Recyclings kann so eine Durchdringung von 50% (pessimistischer Trend) bis zu 80 % (optimistischer Trend) in 2045/2050 in dieser Studie erreichen (siehe Tabelle 6). Jedoch ist die Menge des zur Verfügung stehenden Kohlenstoffs aus diesem Prozess aufgrund von Nutzungskonkurrenzen und des möglicherweise limitierten Technologiehochlaufs stark beschränkt.

Tabelle 6: Durchdringung des chemischen Recyclings in Prozent für die drei betrachteten Szenarien.

| Durchdringung chem. Recycling in % | optimistisch | Basis-Szenario | pessimistisch |
|------------------------------------|--------------|----------------|---------------|
| 2035 | 7 | 5 | 3 |
| 2045/2050 | 80 | 65 | 50 |

Das ungenutzte technische Potenzial der Biomasse steht für die chemische Industrie nicht in vollem Umfang zur Verfügung, da die chemische Industrie mit anderen, eventuell lukrativeren Biomasseanwendungen konkurriert. Auch technologische Beschränkungen haben Einfluss auf die Durchdringung (siehe Tabelle 7).

Für die Nutzung von CO₂ als alternative Kohlenstoffquelle besteht Potenzial in Deutschland und der EU. Allerdings ist dringend Fortschritt im Bereich der CCU-Technologien nötig. Daher wurde die Durchdringung in 2035 auf (2,0 ± 1,5) % begrenzt, um dieser Entwicklung, ökonomischen Bedenken, sowie der restriktiven Regulatorik, Rechnung zu tragen. Im Jahr 2045/2050 wird dagegen CCU in größerem Maßstab eingesetzt, um zur Erreichung der Klimaneutralität den verbleibenden Kohlenstoffbedarf, der nicht durch Biomasse und Recycling gedeckt werden kann, aufzubringen.

Über diese hier beschriebenen Wachstumsraten und Durchdringungen ergeben sich verschiedene Entwicklungspfade, welche gemeinsam einen Entwicklungskorridor aufzeigen (siehe auch Abbildung 21). Dabei liegt das ungenutzte Potenzial an nicht-



Tabelle 7: Durchdringung der Biomassenutzung in Prozent für die drei betrachteten Szenarien.

| Durchdringung Biomassenutzung in % | optimistisch | Basis- Szenario | pessimistisch |
|---------------------------------------|--------------|--------------------|---------------|
| 2035 | 7 | 5 | 3 |
| 2045/2050 | 40 | 25 | 10 |

fossilen Kohlenstoffquellen in Deutschland bei bis zu 1,6 Mt Kohlenstoff pro Jahr aus Prozessen des chemischen Recyclings, bis zu 14 Mt Kohlenstoff pro Jahr aus Biomasse und etwa 13 Mt Kohlenstoff pro Jahr aus CO₂-Abscheidung (siehe Kapitel 3 und Abbildung 19). Dieses Potenzial wird in den Szenarien jedoch nur zum Teil ausgeschöpft. So werden in Deutschland maximal 5,6 Mt Kohlenstoff pro Jahr aus Biomasse für die Chemieindustrie, 1,3 Mt Kohlenstoff pro Jahr aus chemischem Recycling und 6,3 Mt Kohlenstoff pro Jahr aus abgeschiedenem CO₂ in den Szenarien eingesetzt.

In der Europäischen Union könnten bis zu 4 Mt Kohlenstoff pro Jahr aus chemischem Recycling, bis zu 72 Mt Kohlenstoff pro Jahr aus Biomasse und bis 123 Mt Kohlenstoff pro Jahr aus CO₂ für die Produktion von Grundchemikalien bereitgestellt werden (siehe

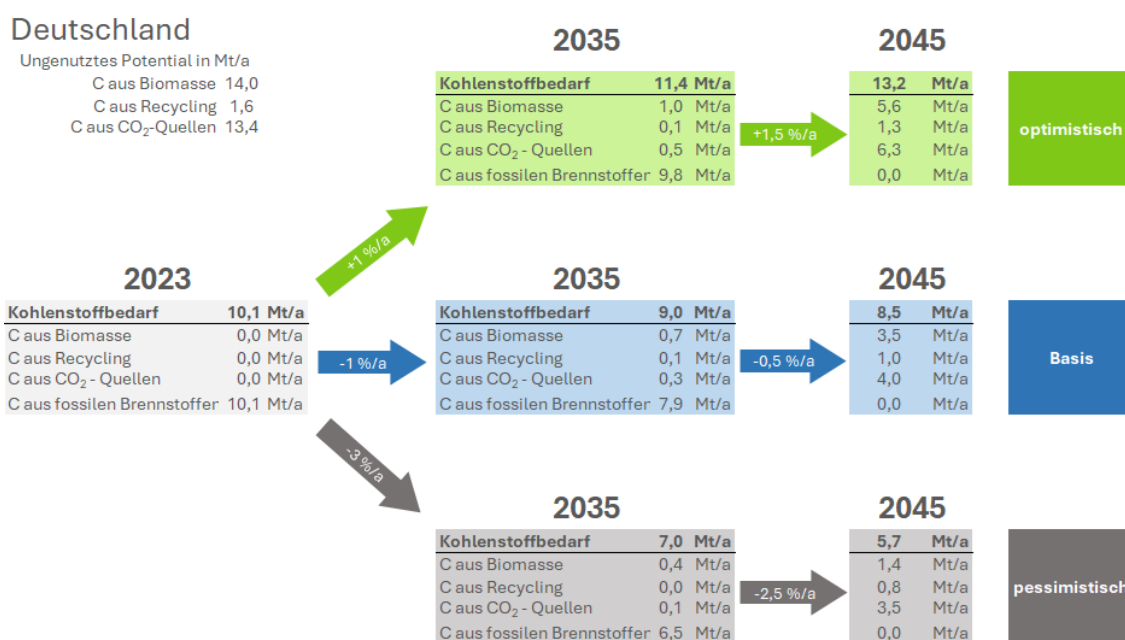


Abbildung 19: Anteile alternativer Kohlenstoffquellen in den jeweiligen Szenarien für die Jahre 2035 und 2045 in Deutschland. Die Pfeile symbolisieren die jährlichen Wachstumsraten.

Abbildung 20). Der europäische Bedarf an Kohlenstoff aus abgeschiedenem CO₂ für chemische Produkte liegt in den Szenarien zwischen 6,0 und 13,1 Mt C im Jahr 2050, für Biomasse zwischen 7,2 und 28,8 Mt C und zwischen 1,3 und 2,0 Mt C aus chemischen Recyclingverfahren.

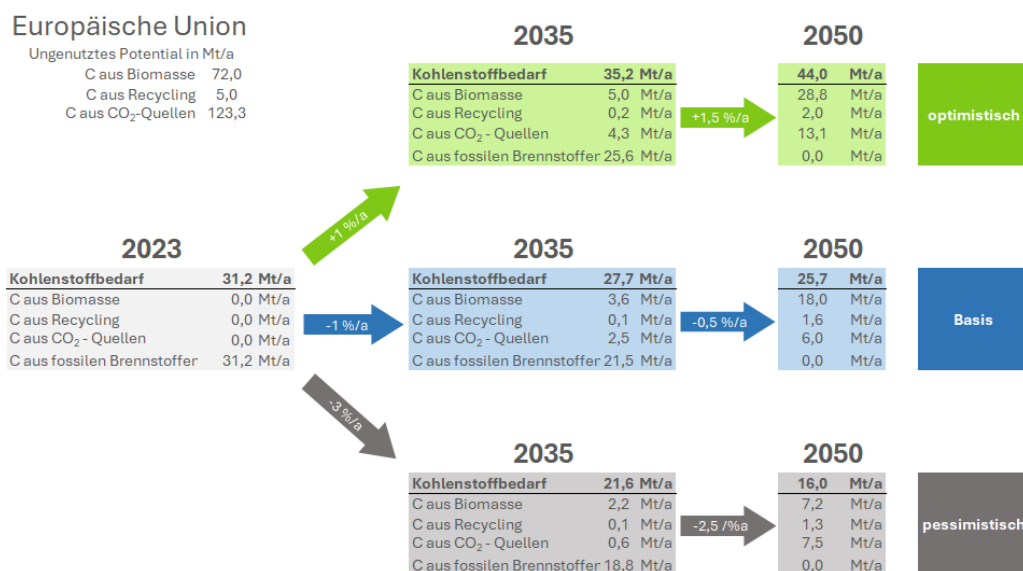


Abbildung 20: Anteile alternativer Kohlenstoffquellen in den jeweiligen Szenarien für die Jahre 2035 und 2050 in der EU. Die Pfeile symbolisieren die jährlichen Wachstumsraten.

Generell zeigt sich in allen Szenarien, dass bei einer begrenzten Verfügbarkeit von Biomasse und Kunststoffen für chemisches Recycling sehr viel Kohlenstoff aus CO₂ benötigt wird, um den Kohlenstoffbedarf der Chemieindustrie zu decken.

Die Wahl der Systemgrenzen hat deutliche Auswirkungen auf die Ergebnisse. Wenn die deutschen Bedarfe an Kohlenstoff für chemische Produkte nur aus deutschen Quellen gedeckt werden dürfen, so müssen zusätzliche industrielle und natürliche CO₂-Quellen erschlossen werden. Aus diesem Grund wird in der Einzelbetrachtung von Deutschland im Vergleich zur Berechnung der gesamten Europäischen Union recht viel CO₂ eingesetzt. Kann jedoch auf andere europäische Kohlenstoffquellen zurückgegriffen werden, so werden zunächst günstigere, ausgereifere Technologien eingesetzt. In der Realität bestünde auch die Möglichkeit für Importe. Die Logistik rund um alternative Kohlenstoffquellen kann jedoch auch nicht trivial ausfallen, beispielsweise aufgrund der Heterogenität und Saisonalität von Biomasse (vgl. Abschnitt 3.1.4).

5.3. Einordnung der Szenarien und weiterführende Überlegungen

Die chemische Industrie steht vor großen Herausforderungen, um die Rohstoffbasis gänzlich zu verändern. Die vollständige Substitution von fossilen Rohstoffen durch alternative Kohlenstoffquellen wie Kunststoff-Recycling, Biomassennutzung und CO₂ ist eine ambitionierte Aufgabe. Wie viel davon tatsächlich in der Grundstoffchemie genutzt werden kann, hängt von vielen Faktoren ab. Für das Einbringen der Kohlenstoffströme wurde einfachheitshalber oftmals Synthesegas gewählt, da es durch alle hier vorgestellten alternativen Kohlenstoffquellen in die Wertschöpfungskette eingebracht werden kann. Benötigtes Methanol kann über CO₂-Abscheidung mit anschließender Methanolsynthese in die Wertschöpfungskette eingebracht werden. Naphtha-ähnliche Stoffe können über das chemische Recycling erzeugt werden. Die chemische Industrie ist allerdings sehr komplex und manche Produktionspfade könnten über andere Wege, also nicht über die hier betrachteten Grundchemikalien, leichter zu erreichen sein. Das stellt einen zusätzlichen Unsicherheitsfaktor bei dieser Analyse dar. Insgesamt erscheint es eine große Herausforderung, die hier betrachteten alternativen Kohlenstoffquellen ausgehend von dem aktuellen Entwicklungs- und Anwendungsstatus zu erschließen.

Der von den Szenarien eröffnete Optionenraum spiegelt verschiedene wirtschaftliche und technologische Entwicklungen wider. So kann sich der künftige Bedarf an nachhaltigem Kohlenstoff im Jahr 2045 in Deutschland auf etwa 6 bis 13 Mt Kohlenstoff pro Jahr belaufen (vgl. Abbildung 19 und Abbildung 21).

Die Europäische Union plant bis zum Jahr 2050 klimaneutral zu werden. Der dafür benötigte Kohlenstoff liegt zwischen etwa 16 und 44 Mt Kohlenstoff pro Jahr (vgl. Abbildung 20 und Abbildung 21). Diese große Spanne spiegelt generelle Unsicherheiten der Branche im Angesicht einer Industrietransformation wider. Dies könnte auch durch politische Maßnahmen beeinflusst werden,

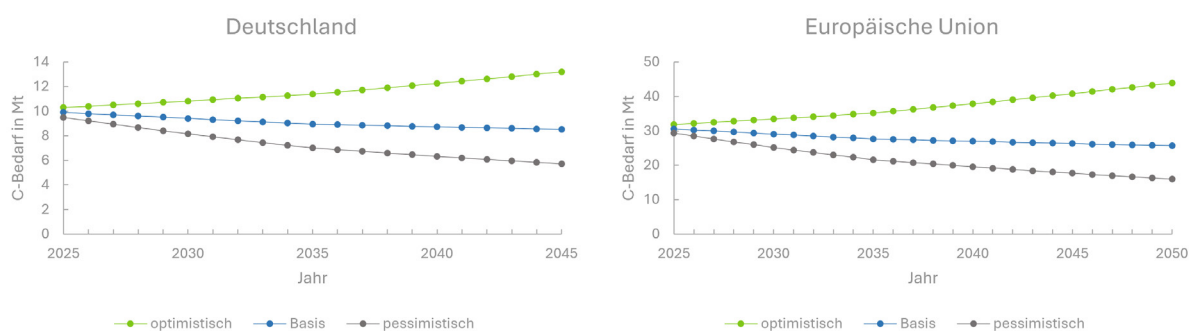


Abbildung 21: Zeitliche Entwicklung des jährlichen Kohlenstoffbedarfs (C-Bedarf) der chemischen Grundstoffindustrie in Deutschland (links) und der EU (rechts) für die drei betrachteten Szenarien in Mt/a.

wie zum Beispiel durch Klimaschutzverträge³⁰, Auktionen des EU Innovation Fund, Rezyklatquoten, gesetzliche Anforderungen, wie MRV-Maßnahmen³¹ oder eine nachhaltige öffentliche Beschaffung, sowie Förderprogramme.

Der künftige Kohlenstoffbedarf basiert auf den vorgestellten Grundchemikalien (vgl. Petro-chemische Wertschöpfungsketten). Dabei werden angestrebte Entwicklungen, wie beispielsweise der Umstieg auf grünes Ammoniak aus erneuerbar gewonnenem Wasserstoff, berücksichtigt. Bei diesem Beispiel entfällt eine CO₂-Quelle mit hohem Reinheitsgrad und ein neuer alternativer Kohlenstoffbedarf für die grüne Harnstoffproduktion entsteht. Dieses Beispiel beleuchtet auch eine große Herausforderung der industriellen Transformation. Wenn kein passender Ersatz für den fossilen Ausgangsstoff gefunden wird, so können sich die Folgen auf den gesamten Standort und alle Akteur:innen auswirken. Würde grünes Ammoniak aus Biomethan produziert, so könnte der Verbundstandort weiter bestehen. Bei einer Umstellung auf grünen Wasserstoff als Feedstock³² werden Teile der Anlage nicht mehr genutzt und neue Anlagen für Wasserstoff und grünes Ammoniak, wie die Luftzerlegungsanlage³³, müssen gebaut werden. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht kann das ein Hindernis darstellen, da grünes Ammoniak nur ein Zwischenprodukt darstellt, aus dem zum Beispiel verschiedene Düngemittel hergestellt werden. Die Bereitschaft, einen Aufpreis für ein grünes Produkt zu zahlen, müsste in diesem Beispiel also so groß sein, dass es in der gesamten Wertschöpfungskette bis zu den Käufer:innen des Düngemittels durchgereicht werden kann. Das stellt ein wirtschaftliches Risiko dar; vor allem im Kontext der europäischen Produktion, die derzeit aufgrund hoher Betriebskosten meist nur auf abgeschriebenen Anlagen global konkurrenzfähig ist. Die nächsten Dekaden könnten daher herausfordernd für die chemische Industrie in der EU werden. Die Ergebnisse der Szenarien stellen keine tiefgreifende wirtschaftliche Analyse dar und werfen daher vor diesem Hintergrund Fragen zur Umsetzbarkeit auf. Im Folgenden wird deswegen ein Vergleich mit der Literatur, unter anderem einer neuen Studie des Verbandes der chemischen Industrie in Europa, gezogen.

5.3.1. Vergleich mit der Literatur

Aufgrund von Nutzungskonkurrenzen und erwarteter Technologiehochläufe, stellen sich Biomassenutzung, Recyclingquoten und CO₂-Abscheidungstechnologien in der Literatur sehr verschieden dar. In der vorliegenden Analyse wurde wegen der oben genannten Gründe von einem limitierten Einsatz von chemischem Recycling und Biomasse ausgegangen (vgl. Kapitel 3.1 und 3.2.1). CO₂-Abscheidung aus industriellen Punktquellen stellt eine begrenzte, mit der Zeit weiter abnehmende, Ressource dar, welche auch bereits bestehende Nutzungen, etwa als Kühlmittel, aufweist. Insbesondere der regulatorische Rahmen steht einer Nutzung vieler industrieller Punktquellen im Wege (vgl. Kapitel 1.3). Die geringe Reinheit der zur Verfügung stehenden Abgasströme kann eine CO₂-Abscheidung ökonomisch unattraktiv machen. Um die Klimaneutralitätsziele zu erreichen, könnte CO₂ auch aus der Atmosphäre entnommen werden. Dieser CO₂-Strom ist zeitlich unbegrenzt verfügbar und unterliegt keiner Nutzungskonkurrenz, weist jedoch nur eine sehr geringe Konzentration auf. Daher ist mit einem erheblichen Energie- und Kapitalaufwand bei großflächiger Umsetzung zu rechnen.

Die Annahmen dieser Studie weichen von der aktuellen Studie des Verbandes der Europäischen chemischen Industrie (Cefic) ab, da der Verband unter anderem von einer fortgeführten Nutzung fossiler Rohstoffe, insbesondere als Feedstock aus (Gonsolin

³⁰ Auch CCfD (engl.: carbon contracts for differences) genannt

³¹ MRV: Erfassung (engl.: monitoring), Berichterstattung (engl.: reporting) und Zertifizierung (engl.: verification)

³² Ausgangsmaterial, Rohstoff

³³ Auch häufig als ASU nach dem Englischen air separation unit bezeichnet.



and Yassin 2025), ausgeht. Dadurch würden auch weiterhin Abgasströme mit hohem CO₂-Gehalte für die Abscheidung und spätere Speicherung, Nutzung und dauerhafte in geologischen Formationen zur Verfügung stehen. Für den direkten Einsatz von CO₂ in der chemischen Industrie in der Europäischen Union werden im Jahr 2050 etwa 5 Mt CO₂ gesehen (Gonsolin and Yassin 2025). Dies entspricht in etwa 1,4 Mt Kohlenstoff pro Jahr aus vorher abgediebstem CO₂, welches nun als Feedstock verwendet wird. Dafür werden hohe Investitionen in CO₂-Abscheidetechnologien von bis zu 160 Milliarden Euro₂₀₁₉ bis zum Jahr 2050 erwartet (Gonsolin and Yassin 2025).

Auch im Vergleich zu den Ergebnissen des Szenario 3 des Impact Assessment Reports der Europäischen Union wird weniger CO₂ in Produkte überführt (European Commission on behalf of the European Union 2024a). Verglichen mit 59 Mt CO₂/a für langlebige Produkte und 147 Mt CO₂/a als Feedstock für synthetische Kraft- und Brennstoffe in diesem Szenario (European Commission on behalf of the European Union 2024a), was etwa 56 Mt Kohlenstoff pro Jahr entspricht, ist der Einsatz von 13 Mt Kohlenstoff pro Jahr im optimistischen Trendszenario der vorliegenden Analyse als moderat anzusehen.

Häufig wird atmosphärisches CO₂ in Modellierungen und Szenarien eingesetzt (Agora Think Tanks 2024; Boston Consulting Group 2021; Deutsche Energie-Agentur 2021; Fleiter et al. 2023, 2024; Gonsolin and Yassin 2025; Prognos, Öko-Institut, and Wuppertal-Institut 2021). So entstehen hohe theoretische CCUS-Potenziale. Es gibt jedoch auch Berichte, die Kontroversen bei aktuellen Preisen und dem nötigen Fortschritt der DAC-Technologie aufzeigen (Alexandersson and Grettisson 2025; Niranjana 2025). Ob DAC-Technologien zeitnah und in ausreichender Größe implementiert werden können, könnte damit wieder infrage stehen. Zusätzlich wurden jedoch in der Studie des Verbandes der chemischen Industrie in der Europäischen Union auch ein schnellerer Hochlauf des chemischen Recyclings, zugrunde gelegt. So wird ab 2025 eine rapide technologische Entwicklung angenommen und in den weiterführenden Analysen werden zwischen 6 und 30 % der Polymere dem chemischen Recycling zugeführt. Dadurch könnten im Jahr 2050 von 45 Mt Polymeren circa 20 Mt am Lebensende chemisch recycelt werden (Gonsolin and Yassin 2025). So finden sich etwa 4,5 Mt Kohlenstoff pro Jahr aus chemischem Recycling in neuen Produkten in der Europäischen Union in dieser Studie des Verbandes wieder (Gonsolin and Yassin 2025). Im Vergleich dazu für mechanisches Recycling weniger Energie benötigt und daher fließen große Mengen der Kunststoffabfälle außerhalb der chemischen Industrie bevorzugt in diese Richtung. Doch für die Nutzung von Kunststoffabfällen, die aus technischen, ökologischen oder ökonomischen Gründen nicht über das mechanische Recycling im Kreis geführt werden können, stellt chemisches Recycling eine sinnvolle Ergänzung dar. Politische Maßnahmen könnten hier einen deutlichen Einfluss haben, beispielsweise über Rezyklatquoten, welche den Anteil des mechanischen Recyclings erhöhen können.

Weitere Nutzungskonkurrenz von Kunststoffabfällen ist durch das thermische Verwerten gegeben. In vielen Städten und Gemeinden stellt diese Art der Abfallverwertung eine Möglichkeit zur Bereitstellung von Strom, sowie Nah- und Fernwärme dar. Durch eine Umstellung auf ein klimaneutrales Energiesystem sind grundlastfähige Kraftwerke von besonderem Interesse vor dem Hintergrund schwankender Erzeugung durch erneuerbare Energien. Zukünftig könnten Abfälle daher eine wichtige Rolle als Energie-, Wärme- und Kohlenstofflieferant spielen und nur eingeschränkt für die chemische Industrie zur Verfügung stehen. In Bezug auf den künftigen Biomasseeinsatz in der Industrie gehen Literaturwerte deutlich auseinander. In manchen Arbeiten wird das verfügbare Potenzial, besonders für Deutschland, als begrenzt angesehen (Boston Consulting Group 2021; Burchard et al. 2024). Andere Studien gehen von einem deutlich höheren Biomasseeinsatz aus (Agora Think Tanks 2024; Mellwig et al. 2021; Panoutsou and Maniatis 2021). Die kann unter anderem auch über die gewählten Rahmenbedingungen, wie beispielsweise Importe, erklärt werden. Auch in dieser Arbeit zeigte sich, dass eine Betrachtung von Deutschland alleine zu einer anderen technologischen Entwicklung führen kann, da hier die begrenzte Fläche bei einer hohen Industriedichte nicht durch europäische Biomasse aufgefangen werden kann.

Die Nutzung von Biomasse für die Produktion von Grundchemikalien ist grundsätzlich bereits heute an verschiedenen Stellen der Wertschöpfungskette möglich; derzeit ist es jedoch meist kostengünstiger, fossile Rohstoffe zu nutzen. Die Marktdurchdringung von biogenen Optionen folgt daher vornehmlich ökonomischen Anreizen, etwa durch steigende CO₂-Preise für fossile Ressourcen. Theoretisch wäre bisher nicht mobilisierte Biomasse in größerem Umfang verfügbar. Allerdings ist aufgrund von vielfältigen Nutzungskonkurrenzen (vgl. Kapitel 3.1.5) ungewiss, in welchem Maße sie künftig in der Chemieindustrie eingesetzt werden kann.

Dabei stellt auch der logistische Aufwand eine nicht geringe Herausforderung für den Einsatz in industriellen Prozessen dar. Die verschiedenen Stoffe sind über die Fläche verteilt, weisen eine saisonale Abhängigkeit in der Verfügbarkeit auf und müssen meist über das Straßennetz transportiert werden. Feuchte Biomasse ist auch nur begrenzt lagerfähig. Dies kann die Nutzung in



der Industrie erschweren. Zusätzlich zeichnen sich insbesondere aktuell nicht oder nur in geringerem Umfang genutzte Biomasseströme oftmals durch eine große Heterogenität aus. Eine Integration in industrielle Prozesse erfordert ein gewisses Maß an Standardisierung und steht daher vor Herausforderungen.

Deutschland und die Europäische Union haben sich ambitionierte Ziele zum Klimaschutz und zur CO₂-Emissionsreduktion bis 2045 beziehungsweise 2050 gesetzt und ebnen nun den Weg für die Abscheidung, Nutzung und dauerhafte Speicherung von CO₂. So können nicht vermeidbare Emissionen reduziert, sowie alternative, nicht fossile Kohlenstoffquellen für die Herstellung alltäglicher Produkte der Chemieindustrie erschlossen werden. Insgesamt stellt die anstehende Umstellung der chemischen Industrie auf eine nachhaltige Kohlenstoffbasis auch eine Chance dar, Technologieführerschaft zu zeigen und einen grünen Markt zu etablieren. Der Wandel erfordert technologische Innovationen, Investitionen in erneuerbare Energien und neue Rohstoffquellen sowie eine enge Abstimmung zwischen Industrie, Wissenschaft und Politik, um wirtschaftliche und ökologische Ziele in Einklang zu bringen.



6. Fazit

Die Studie zeigt, dass eine vollständige Abkehr von fossilen Rohstoffen in der chemischen Industrie technisch möglich ist, wenn alternative Kohlenstoffquellen wie Biomasse, Kunststoffabfälle und CO₂ systematisch erschlossen und in die bestehende Wertschöpfungskette, insbesondere zur Herstellung von Grundchemikalien, integriert werden. Technologien für die Nutzung alternativer Quellen sind bereits vorhanden, jedoch befinden sich viele Verfahren noch nicht im großtechnischen Maßstab. Die Szenarien verdeutlichen, dass unter den hier getroffenen Annahmen der gesamte Kohlenstoffbedarf bis zur angestrebten Klimaneutralität in Deutschland in 2045, und der EU in 2050, durch alternative Quellen gedeckt werden kann. Entscheidend für das Gelingen sind neben technologischem Fortschritt auch die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Weitere positive Effekte zur Erreichung der Klimaneutralität entstehen durch effizientere Nutzung, Kreislaufwirtschaft und verändertes Konsumverhalten, sowie Steuerungs- und Förderinstrumente, wie zum Beispiel durch Klimaschutzverträge, EU Innovation Fund-Auktionen, Quotenregelungen, gesetzliche Standards und MRV-Maßnahmen, sowie Förderprogramme.

Für die Erschließung der alternativen Kohlenstoffquellen bestehen allerdings Hürden und Kontroversen. Das Recycling von Kunststoffabfällen ermöglicht es, Rohstoffe im Kreislauf zu führen. Allerdings sind Recyclingquoten von 100 % nicht zu erreichen, da es immer gewisse Verluste geben wird. Chemische Recyclingverfahren können zwar stark verschmutzte oder gemischte Kunststoffabfälle aufbereiten, die Technologien bewegen sich jedoch noch im Entwicklungsstadium und werden daher in den nächsten Jahren in ihrer industriellen Anwendung begrenzt sein. Ferner sind die Mengen an für diesen Zweck nutzbaren Kunststoffabfällen insgesamt im Vergleich zum Biomassevorkommen und der generellen Verfügbarkeit von CO₂ geringer.

Bei der Biomasse kann jedoch voraussichtlich nur ein Teil des Gesamtpotenzials für die Bereitstellung von Kohlenstoff für die chemische Industrie genutzt werden. So konkurriert die stoffliche Nutzung von Biomasse zum Beispiel mit der Nahrungsmittelproduktion und der energetischen Verwendung. Die Beachtung der Kaskaden- und Mehrfachnutzung von Biomasse ist hier relevant, wobei die Verwendung von Abfallbiomassen und Reststoffen nicht in direkter Nutzungskonkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen und keinen zusätzlichen Ressourcenverbrauch verursachen sollte. Ferner sind ökologische Bedenken zum Schutz der Biodiversität und die Vermeidung von indirekten Landnutzungsänderungen zentral, da diese erhebliche Umwelt Risiken bergen können. Des Weiteren gilt Biomasse als chemisch komplexer Rohstoff und deren Nutzung ist daher technisch anspruchsvoll. Dies beeinflusst die Wirtschaftlichkeit.

Die Nutzung von CO₂ als Rohstoff für die chemische Industrie steht derzeit im Spannungsfeld zwischen technologischem Potenzial und politischen, sowie ökologischen Fragestellungen. Insbesondere der hohe Wasserstoffbedarf von CCU-Prozessen ist kritisch zu betrachten, da für eine klimafreundliche CO₂-Nutzung ausschließlich grüner Wasserstoff verwendet werden sollte. Dieser setzt wiederum eine erhebliche Menge an erneuerbarer Energie voraus – eine Ressource, die in Deutschland und Europa voraussichtlich mittelfristig nur begrenzt verfügbar ist. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, entsprechende Vorprodukte oder Energieträger voraussichtlich in großem Umfang aus dem Ausland zu importieren. Zudem ist die künftige Verfügbarkeit der zulässigen und wirtschaftlich erschließbaren CO₂-Quellen weiterhin umstritten, beispielsweise bei Kraftstoffen. Die Vorgaben der RED III zeigen auf, welche Quellen in Zukunft als nachhaltig anerkannt werden können – etwa biogene Emissionen, direkte CO₂-Abscheidung aus der Luft oder bestimmte industrielle Punktquellen. Doch wie sich die regulatorische Einstufung zukünftig entwickeln wird, bleibt derzeit offen (siehe auch Abschnitt zu RED III in Kapitel 1.3.2). Das betrifft insbesondere CO₂ aus fossilen industriellen Prozessen, das nach derzeitigem Stand nur zeitlich begrenzt als Ausgangsstoff für Kraftstoffe oder chemische Produkte genutzt werden darf.

Ein weiterer Kritikpunkt betrifft die Klimawirkung von CCU-Produkten. Da viele CO₂-basierte Produkte eine beschränkte Lebensdauer aufweisen, wird das gebundene CO₂ in der Regel am Ende des Produktlebens wieder freigesetzt. Damit bleibt die Notwendigkeit bestehen, die Emissionen auszugleichen oder zu kompensieren, besonders wenn fossiles CO₂ verwendet wurde. Kritiker:innen sehen hierin ein mögliches Einfallstor für die Verlängerung fossiler Wertschöpfungsketten unter dem Deckmantel von CO₂-Kreisläufen. Vor diesem Hintergrund ist eine differenzierte Bewertung der Klimawirkung von CCU-Technologien erforderlich – insbesondere in Hinblick darauf, welchen tatsächlichen Beitrag sie zur Erreichung der Klimaziele in Deutschland und der EU leisten können.

Gesellschaftliche Veränderungen können als Hebel zur Reduktion des Kohlenstoffbedarfs dienen. Insbesondere eine verstärkte Akzeptanz für die Kreislaufwirtschaft und ein nachhaltigerer Konsum können dazu beitragen, dass insgesamt weniger neue Produkte benötigt werden und somit der Kohlenstoffbedarf sinkt. Dies kann durch politische und regulatorische Anreize sowie



Bewusstseinsbildung erreicht werden. Gerade ein Wandel in der Ernährung, insbesondere durch die Reduzierung des Fleischkonsums, kann den Bedarf an Futtermitteln und somit agrarischen Chemikalien wie Düngemitteln und Pestiziden senken, Hierbei freiwerdende landwirtschaftliche Flächen könnten dann zur Erzeugung von Biomasse für verschiedene industrielle Anwendungen, genutzt werden.

Insgesamt spielen Innovationen eine entscheidende Rolle dabei, alternative Kohlenstoffquellen in der Produktion von Grundchemikalien nutzbar zu machen und fossile Rohstoffe langfristig zu ersetzen. Dies geschieht auf mehreren Ebenen. So kann zum Beispiel die Entwicklung gänzlich neuer Produktionsverfahren neue Wege eröffnen. Auch Effizienzsteigerungen durch beispielsweise intelligente Kopplung von Prozessen können dazu beitragen, den Energie- und Ressourcenverbrauch zu reduzieren. Ferner könnten Fortschritte, wie die Digitalisierung und Nutzung künstlicher Intelligenz, Möglichkeiten eröffnen, neue Materialien oder Produkte herzustellen, die dazu beitragen, den Kohlenstoffbedarf zu senken.



7. Literaturverzeichnis

Agora Think Tanks, ed. 2024. 'Klimaneutrales Deutschland. Von Der Zielsetzung Zur Umsetzung.'

Akhmetova, Irina, Nils Fuchs, Lukas Horndasch, Johannes Israel, Sven Kühnel, Sarah Bernhardt, Anita Demuth, and Harry Lehmann. 2025. Fossilfreie Chemie von morgen. Acht Leitprinzipien für eine grüne Chemikalienproduktion und die Bedeutung von Power-to-X-Technologien. PtX Lab Lausitz.

Alexandersson, Bjartmar Oddur Peyr, and Valur Grettisson. 2025. 'Climeworks' Capture Fails to Cover Its Own Emissions'. Heimildin. <https://heimildin.is/grein/24581/climeworks-capture-fails-to-cover-its-own-emissions/> (May 20, 2025).

Ausfelder, Florian, Alexis Bazzanella, Roland Geres, Andreas Wehr, and Katja Wendler. 2023. 'Chemistry4Climate - Wie die Transformation der Chemie gelingen kann' eds Verband der Chemischen Industrie (VCI) and Verein Deutscher Ingenieure (VDI). https://dechema.de/-p-20325184-EGOTEC-8ffd2006a97f924b4d1ea3decdbc7325/_/c4c-Wie%20die%20Transformation%20der%20Chemie%20gelingen%20kann-Abschlussbericht%202023.pdf (February 1, 2024).

Ausfelder, Florian, Eghe Oze Herrmann, and Luisa Fernanda López González. 2022. Perspective Europe 2030: Technology Options for CO₂- Emission Reduction of Hydrogen Feedstock in Ammonia Production. ed. DECHEMA, Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie. Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

Ausfelder, Florian, and Dinh Du Tran. 2023. '4. Roadmap Des Kopernikus-Projektes „P2X“ Phase II TECHNISCHER ANHANG: Transformation – Anwendungen – Potenziale'.

Battersby, Francesca, Alexis Dunand, Katie Lebling, Danielle Riedl, and Valter Selén. 2024. 'EU – US Carbon Removal Policy Comparison - Final Report'. <https://tracker.carbongap.org/regional-analyses/eu-us-final-report/> (April 2, 2025).

Biomasse Im Spannungsfeld Zwischen Energie- Und Klimapolitik. Strategien Für Eine Nachhaltige Bioenergienutzung. 2019. https://www.ufz.de/export/data/2/226715_2019_ESYS_Stellungnahme_Biomasse.pdf.

Block, Simon, and Peter Viebahn. 2022. 'Direct Air Capture in Deutschland: Kosten und Ressourcenbedarf eines möglichen Roll-outs im Jahr 2045'. 4(72. Jg. 2022).

Boston Consulting Group. 2021. 'Klimapfade 2.0 Ein Wirtschaftsprogramm Für Klima Und Zukunft' ed. Bundesverband der Deutschen Industrie e. V.

Boston Consulting Group and Prognos. 2018. 'Klimapfade Für Deutschland' ed. Bundesverband der Deutschen Industrie e. V.

Brödner, Romy, Karl-Friedrich Cyffka, Andrea Fais, Susann Günther, Jasmin Kalcher, Stanislav Kazmin, Friederike Naegeli de Torres, et al. 2023. 'Biomassepotenziale aus Abfällen und Reststoffen. Hintergrundpapier Stand und Perspektiven der DBFZ Ressourcendatenbank und der aktuellen Datenlage (12/2023)' ed. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum.

Bruhwiller, L., A. M. Michalak, R. Birdsey, D. N. Huntzinger, J. B. Fisher, J. Miller, R. A. Houghton, et al. 2018. Chapter 1: Overview of the Global Carbon Cycle. Second State of the Carbon Cycle Report. U.S. Global Change Research Program. doi:10.7930/SOCCR2.2018.Ch1.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 2025. 'FAQ Zu CCS Und CCU'. https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/F/FAQ/faq-ccs-ccu.pdf?__blob=publicationFile (August 20, 2025).

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. 2024a. 'CCU/CCS: Baustein Für Eine Klimaneutrale Und Wettbewerbsfähige Industrie'. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/weitere-entwicklung-ccs-technologien.html> (June 18, 2025).



Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. 2024b. 'Eckpunkte Der Bundesregierung Für Eine Carbon Management-Strategie'. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/240226-eckpunkte-cms.pdf?__blob=publicationFile&v=12 (June 18, 2025).

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. 2024c. 'Langfriststrategie Negativemissionen Zum Umgang Mit Unvermeidbaren Restemissionen - Eckpunkte'. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/240226-eckpunkte-negativemissionen.pdf?__blob=publicationFile&v=8 (June 18, 2025).

Bundesregierung. Entwurf Eines Gesetzes Zur Änderung Des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes. <https://dserver.bundestag.de/btd/20/119/2011900.pdf> (June 18, 2025).

Bundesrepublik Deutschland. 2012. Gesetz Zur Demonstration Der Dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid. <https://www.gesetze-im-internet.de/kspg/KSpG.pdf> (June 18, 2025).

Bundesrepublik Deutschland. 2019a. Bundes-Klimaschutzgesetz. <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf> (June 18, 2025).

Bundesrepublik Deutschland. 2019b. Gesetz Über Einen Nationalen Zertifikatehandel Für Brennstoffemissionen. <https://www.gesetze-im-internet.de/behg/BEHG.pdf> (June 18, 2025).

Burchardt, Jens, Patrick Herhold, Elisabeth Richenhagen, Thilo Schaefer, and Goecke. 2024. 'Transformationspfade Für Das Industrieland Deutschland. Eckpunkte Für Eine Neue Industriepolitische Agenda' eds Boston Consulting Group, Institut der Deutschen Wirtschaft, and Bundesverband der deutschen Industrie.

'Canada Invests in Cutting-Edge Carbon Capture and Storage to Drive Clean Energy Innovation'. 2025. <https://www.canada.ca/en/natural-resources-canada/news/2025/02/canada-invests-in-cutting-edge-carbon-capture-and-storage-to-drive-clean-energy-innovation.html> (April 2, 2025).

'Carbon Capture, Utilization and Sequestration. Updated Version.' 2025. <https://www.ncsl.org/energy/carbon-capture-utilization-and-sequestration>.

Carbon Gap, ed. 2024a. 'Carbon Removal in Italy – National Policy Overview'. <https://tracker.carbongap.org/regional-analysis/national/italy/> (April 2, 2025).

Carbon Gap, ed. 2024b. 'Denmark'. <https://tracker.carbongap.org/regional-analysis/national/denmark/> (April 2, 2025).

Carbon Recycling International. 'CO₂-TO-METHANOL PLANT: COMMERCIAL SCALE PRODUCTION IN CHINA'. <https://carbonrecycling.com/projects/shunli> (June 18, 2025). Chemiewirtschaft in Zahlen – 2024. 2024. Verband der Chemischen Industrie (VCI). <https://www.vci.de/services/publikationen/broschueren-faltblaetter/chemiewirtschaft-in-zahlen.jsp> (September 19, 2025).

Chao, Cong, Yimin Deng, Raf Dewil, Jan Baeyens, and Xianfeng Fan. 2021. 'Post-Combustion Carbon Capture'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 138: 110490. doi:10.1016/j.rser.2020.110490.

Chemiewirtschaft in Zahlen – 2024. 2024. Verband der Chemischen Industrie (VCI). <https://www.vci.de/services/publikationen/broschueren-faltblaetter/chemiewirtschaft-in-zahlen.jsp> (September 19, 2025).

Convention on Biological Diversity. 2022. 'Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework'. <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-15/cop-15-dec-04-en.pdf> (June 4, 2025).

Conversio Market & Strategy GmbH. 2024. Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2023.

DECHEMA e.V., ed. 2024. 'Statuspapier Circular Economy'. https://dechema.de/Statuspapier_Circular_Economy/_/SP_Circular%20Economy__FINAL.pdf (April 17, 2025).



destatis. 2025. 'Bedeutung der energieintensiven Industriezweige in Deutschland'. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/produktionsindex-energieintensive-branchen.html>.

Deutsche Energie-Agentur, ed. 2021. 'Dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität'.

DIN. 'DIN EN ISO 14067'. <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nagus/veroeffentlichungen/wdc-beuth:din21:289443505>.

Dow Chemical, ed. 2023. 'Acid Gas Removal Brochure'.

Europäische Kommission. 2012. L 181/30 Verordnung (EU) Nr. 601/2012 der Kommission vom 21. Juni 2012 über die Überwachung von und die Berichterstattung über Treibhausgasemissionen gemäß der Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012R0601> (June 18, 2025).

Europäische Kommission. 2018. L 59/8 Delegierte Verordnung (EU) 2019/331 der Kommission vom 19. Dezember 2018 zur Festlegung EU-weiter Übergangsvorschriften zur Harmonisierung der kostenlosen Zuteilung von Emissionszertifikaten gemäß Artikel 10a der Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0331> (June 18, 2025).

Europäische Kommission. 2019. COM(2019) 640 final Der Europäische Grüne Deal. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0021.02/DOC_1&format=PDF (June 18, 2025).

Europäische Kommission. 2023. L 157/20 Delegierte Verordnung (EU) 2023/1185 Der Kommission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1185> (June 18, 2025).

Europäische Kommission. 2024. Delegierte Verordnung (EU) 2024/873 der Kommission vom 30. Januar 2024 zur Änderung der Delegierten Verordnung (EU) 2019/331 im Hinblick auf EU-weite Übergangsvorschriften zur Harmonisierung der kostenlosen Zuteilung von Emissionszertifikaten. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202400873 (June 18, 2024).

Europäische Kommission. COM(2024) 62 final Auf Dem Weg Zu Einem Ehrgeizigen Industriellen CO₂-Management in Der EU. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52024DC0062> (June 18, 2025a).

Europäische Kommission. 'ETS2: Buildings, Road Transport and Additional Sectors'. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/ets2-buildings-road-transport-and-additional-sectors_en (June 18, 2025b).

Europäische Kommission. 'EU ETS'. EU ETS. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en (June 18, 2025c).

Europäische Kommission. '„Fit Für 55“: Unsere Bilanz'. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal/fit-55-delivering-proposals_de (June 18, 2025d).

Europäische Kommission. 'Industrial Carbon Management'. https://energy.ec.europa.eu/topics/carbon-management-and-fossil-fuels/industrial-carbon-management_en (June 18, 2025e).

Europäische Kommission. 'Renewable Energy Directive'. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en (June 18, 2025f).

Europäische Umweltagentur. 2025. 'Total GHG Emissions and Removals in the EU 1985-2023'. <https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/3b7fe76c-524a-439a-bfd2-a6e4046302a2> (June 16, 2025).

Europäischer Rat and Rat der Europäischen Union. 2025a. '„Fit Für 55“'. <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/fit-for-55/>.



Europäischer Rat, and Rat der Europäischen Union. 2025b. 'Pariser Klimaschutzübereinkommen'. <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/paris-agreement-climate/> (June 4, 2025).

Europäisches Parlament. 2024. Verordnung Des Europäischen Parlaments Und Des Rates Zur Schaffung Eines Unionsrahmens Für Die Zertifizierung von Dauerhaften CO₂-Entnahmen, Kohlenstoffspeichernder Landbewirtschaftung Und Der CO₂-Speicherung in Produkten. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-g2-2024-REV-1/de/pdf> (June 4, 2025).

Europäisches Parlament, and Rat der Europäischen Union. 2003a. 02003L0087 Richtlinie 2003/87/EG Des Europäischen Parlaments Und Des Rates. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02003L0087-20240301> (June 18, 2025).

Europäisches Parlament, and Rat der Europäischen Union. 2003b. L 275/32 Richtlinie 2003/87/EG Des Europäischen Parlaments Und Rates. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003L0087> (June 18, 225 AD).

Europäisches Parlament, and Rat der Europäischen Union. 2009. 2009/1/EG Richtlinie 2009/31/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 über die geologische Speicherung von Kohlendioxid und zur Änderung der Richtlinie 85/337/EWG des Rates sowie der Richtlinien 2000/60/EG, 2001/80/EG, 2004/35/EG, 2006/12/EG und 2008/1/EG des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0031> (June 18, 2025).

Europäisches Parlament, and Rat der Europäischen Union. 2018. Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen.

Europäisches Parlament, and Rat der Europäischen Union. 2021. Verordnung (EU) 2021/1119 Des Europäischen Parlaments Und Des Rates. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1119> (June 18, 2025).

Europäisches Parlament, and Rat der Europäischen Union. 2022. L 152/45 Verordnung (E) 2022/869 Des Europäischen Parlaments Und Des Rates. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022R0869> (June 18, 2025).

Europäisches Parlament, and Rat der Europäischen Union. 2023. L 130/134 Richtlinie (EU) 2023/959 Des Europäischen Parlaments Und Rates. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023L0959> (June 18, 2025).

Europäisches Parlament, and Rat der Europäischen Union. 2024. Verordnung (EU) 2024/1735 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 zur Schaffung eines Rahmens für Maßnahmen zur Stärkung des europäischen Ökosystems der Fertigung von Netto-Null-Technologien und zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/1724. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401735 (June 18, 2025).

European Commission on behalf of the European Union. 2024a. Impact Assessment Report, Part 3: Securing Our Future Europe's 2040 Climate Target and Path to Climate Neutrality by 2050 Building a Sustainable, Just and Prosperous Society. Strasbourg: European Commission. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:6c154426-c5a6-11ee-95d9-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_3&format=PDF (August 26, 2025).

European Commission on behalf of the European Union. 2024b. Impact Assessment Report, Part 4: Securing Our Future Europe's 2040 Climate Target and Path to Climate Neutrality by 2050 Building a Sustainable, Just and Prosperous Society. Strasbourg: European Commission. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:6c154426-c5a6-11ee-95d9-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_4&format=PDF (June 18, 2025).

European Environment Agency. 2023. The European Biomass Puzzle: Challenges, Opportunities and Trade Offs around Biomass Production and Use in the EU. LU: Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/834565> (June 17, 2025).

eurostat. 2025. 'PRODCOM'. <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ds-056121/default/table?lang=en&category=prom> (June 18, 2025).



Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. 2025. Anbau Und Verwendung Nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. https://www.fnr.de/fileadmin/Statistik/Statistikbericht_der_FNR_2025_web.pdf.

Fleiter, Tobias, Matthias Rehfeldt, Andrea Herbst, Marius Neuwirth, Christoph Maurer, and Pia Manz. 2023. 'Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 - T45-Szenarien - Modul Industriesektor' ed. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_T45-Bericht_Szenarien_Industrie_final.pdf (August 25, 2025).

Fleiter, Tobias, Matthias Rehfeldt, Pia Manz, Simon Bussmann, Marius Neuwirth, Andrea Herbst, Meta Thurid Lotz, and Christoph Maurer. 2024. 'Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 - O45-Szenarien - Modul Industriesektor' ed. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_O45_Industriebericht_v11.pdf (August 25, 2025).

Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V (FFE), and Guidehouse. 2025. 'Wege Zur Skalierung von Negativemissionstechnologien – Empfehlungen Für Marktdesign, Infrastruktur Und Finanzierung' ed. MVV Energie. https://www.mvv.de/fileadmin/user_upload/Ueber_uns/de/innovationen/beccus/MVV_Studie_BECCUS_Print.pdf (August 21, 2025).

Friedlingstein, P., M. O'Sullivan, M. W. Jones, R. M. Andrew, D. C. E. Bakker, J. Hauck, P. Landschützer, et al. 2023. 'Global Carbon Budget 2023'. *Earth System Science Data* 15(12): 5301–69. doi:10.5194/essd-15-5301-2023.

Fröhlich, Thomas, Sebastian Blömer, Daniel Münter, and Lars-Arvid Brischke. 2019. 'CO₂-Quellen für die PtX-Herstellung in Deutschland - Technologien, Umweltwirkung, Verfügbarkeit' ed. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg.

Gerichtshof der Europäischen Union. 2017. 'Urteil Des Gerichtshofs: Schaefer Kalk GmbH & Co. KG Gegen Bundesrepublik Deutschland'. <https://curia.europa.eu/juris/document/document.jsf?jsessionid=2DCDAE5A2E10697DD31E-AFC956F53472?text=&docid=186967&pageIndex=0&doclang=de&mode=lst&dir=&occ=first&part=1&cid=7549369> (June 18, 2025).

Global Monitoring Laboratory. 2025. 'Trends in CO₂, CH₄, N₂O, SF₆'. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/> (August 21, 2025).

Gonsolin, Florie, and Hadi Yassin. 2025. 'The Carbon Managers. Modelling Possible Pathways for the EU Chemical Sector's Transition towards Climate-Neutrality and Circularity with iC2050' ed. Cefic.

Hidiroglu, Kaan, Franco Ruzzenenti, Stefano Merciai, Dan Wang, and Klaus Hubacek. 2024. 'The Extent and Fate of Fossil Carbon Accumulation in Our Technosphere'. *Cell Reports Sustainability* 1(12): 100265. doi:10.1016/j.crsus.2024.100265.

Hou, Rujing, Celesta Fong, Benny D. Freeman, Matthew R. Hill, and Zongli Xie. 2022. 'Current Status and Advances in Membrane Technology for Carbon Capture'. *Separation and Purification Technology* 300: 121863. doi:10.1016/j.seppur.2022.121863.

INERATEC. 2025. 'INERATEC Produziert Erstes E-Fuel an Pionieranlage in Frankfurt'. <https://www.ineratec.de/de/news/ineratec-produziert-erstes-e-fuel-pionieranlage-frankfurt> (May 21, 2025).

Intergovernmental Negotiating Committee on Plastic Pollution. 'Notification: Second Part of the Fifth Session (INC-5.2)'. <https://www.unep.org/inc-plastic-pollution/session-5.2> (June 4, 2025).

Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC), ed. 2023. 'Cross-Sectoral Perspectives'. In *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*, Cambridge University Press, 295–408. doi:10.1017/9781009157926.005.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), ed. 2023. 'Global Carbon and Other Biogeochemical Cycles and Feedbacks'. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge: Cambridge University Press, 673–816. doi:10.1017/9781009157896.007.



International Energy Agency, ed. 2019. 'Putting CO₂ to Use: Creating Value from Emissions'.

International Energy Agency, ed. 2025. 'Global Energy Review 2025'. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/co2-emissions> (March 25, 2025).

International Fertilizer Association (IFA). 2024. 'Urea Statistics by Country 2023'.

Janowiak, M., W.J. Connelly, K. Dante-Wood, G.M. Domke, C. Giardina, Z. Kayler, K. Marcinkowski, et al. 2017. Considering Forest and Grassland Carbon in Land Management. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. doi:10.2737/WO-GTR-95.

'Joint Statement on Sustainable Bioenergy for Climate and Development Goals'. 2024. <https://www.unep.org/news-and-stories/statements/joint-statement-sustainable-bioenergy-climate-and-development-goals> (June 4, 2025).

Kähler, Ferdinand, Michael Carus, Olaf Porc, and Christopher vom Berg. 2021. 'Turning off the Tap for Fossil Carbon: Future Prospects for a Global Chemical and Derived Material Sector Based on Renewable Carbon'. *Industrial Biotechnology* 17(5): 245–58.

Kaltschmitt, Martin, Hans Hartmann, and Herрман Hofbauer (Hrsg.). 2016. *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 3. Auflage. Springer Vieweg. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-47438-9>.

Karayil, Amith, Ahmed Elseragy, and Aliyu M Aliyu. 2024. 'An Assessment of CO₂ Capture Technologies towards Global Carbon Net Neutrality'. *Energies* 17(6): 1460.

Karlsruher Institut für Technologie. 2025. 'Bioliq'. <https://www.bioliq.de/index.php> (June 15, 2025).

Kaspar, Martin, Florian Aufelder, Alexis Bazzanella, Frauke Bierau-Delpont, Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hrsg.), and Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (Hrsg.). 2024. 'Chemistry4Climate: Wie Die Transformation Der Chemie Gelingen Kann - Ein Update'. <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/broschueren-und-faltblaetter/2024-11-07-c4c-update-publikation-kurzfassung.pdf>.

Landesgesellschaft für Energie und Klimaschutz. NRW.ENERGY4CLIMATE. 2023. 'Nachhaltiger Einsatz von Biomasse: Die Rolle von Biomasse in Der Energiewende Und in Einer Klimaneutralen Industrie'.

Lee, Roh Pin, Manja Tschoepe, and Raoul Voss. 2021. 'Perception of Chemical Recycling and Its Role in the Transition towards a Circular Carbon Economy: A Case Study in Germany'. *Waste Management* 125: 280–92. doi:10.1016/j.wasman.2021.02.041.

Lozano, E.M., S.B. Petersen, M.M. Paulsen, L.A. Rosendahl, and T.H. Pedersen. 2021. 'Techno-Economic Evaluation of Carbon Capture via Physical Absorption from HTL Gas Phase Derived from Woody Biomass and Sewage Sludge'. *Energy Conversion and Management: X* 11: 100089. doi:10.1016/j.ecmx.2021.100089.

Lyons, Martina, Paul Durrant, and Karan Kochhar. 2021. 'Reaching Zero with Renewables: Capturing Carbon' ed. International Renewable Energy Agency.

Mellwig, Peter, Julia Lempik, Sebastian Blömer, and Martin Pehnt. 2021. 'Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. Treibhausgasneutrale Hauptszenarien Modul Gebäude'.

Meys, Raoul, Arne Kätelhön, Marvin Bachmann, Benedikt Winter, Christian Zibunas, Sangwon Suh, and André Bardow. 2021. 'Achieving Net-Zero Greenhouse Gas Emission Plastics by a Circular Carbon Economy'. *Science* 374(6563): 71–76. doi:10.1126/science.abg9853.

Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique, ed. 2024. 'État Des Lieux et Perspectives de Déploiement Du CCUS En France'. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/%C3%89tat%20des%20lieux%20et%20perspectives%20CCUS_o.pdf (April 2, 2025).



Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, ed. 2021. 'Kohlenstoff kann Klimaschutz: Carbon Management Strategie Nordrhein-Westfalen'.

Musick, Nathan, and Joseph Kile. 2023. 'Carbon Capture and Storage in the United States' ed. Congressional Budget Office. <http://www.cbo.gov/publication/59345> (April 2, 2025).

Naegeli de Torres, Friederike, Romy Brödner, Karl-Friedrich Cyffka, Andrea Fais, Jasmin Kalcher, Stanislav Kazmin, Richard Meyer, et al. 2024. 'DBFZ Resource Database: DE-Biomass Monitor. Biomass Potentials and Utilization of Biogenic Wastes and Residues in Germany 2010-2020'. doi:<https://doi.org/10.5281/zenodo.10370136>.

'Neue EU-Vorschriften: Weniger Verpackungen, Mehr Wiederverwendung Und Recycling'. 2024. <https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20240419IPR20589/neue-eu-vorschriften-weniger-verpackungen-mehr-wiederverwendung-und-recycling>.

Niranjan, Ajit. 2025. 'Swiss Firm That Captures Carbon from Air to Cut Workforce by More than 10%'. The Guardian. <https://www.theguardian.com/environment/2025/may/17/swiss-firm-that-captures-carbon-from-air-to-cut-workforce-by-more-than-10> (May 20, 2025).

Olabi, A. G., Tabbi Wilberforce, Enas Taha Sayed, Nabila Shehata, Abdul Hai Alami, Hussein M. Maghrabie, and Mohammad Ali Abdelkareem. 2022. 'Prospect of Post-Combustion Carbon Capture Technology and Its Impact on the Circular Economy'. *Energies* 15(22): 8639. doi:10.3390/en15228639.

OSPAR. 2007. 'Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic'. https://www.ospar.org/site/assets/files/1290/ospar_convention.pdf (October 17, 2025).

Panoutsou, Calliope, and Kyriakos Maniatis. 2021. 'Sustainable Biomass Availability in the EU to 2050' ed. Concawe. <https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/Sustainable-Biomass-Availability-in-the-EU-Part-I-and-II-final-version.pdf> (June 17, 2025).

petrochemicals europe. 2023. 'Interactive Flowchart, Version 2'. <https://www.petrochemistry.eu/about-petrochemistry/flow-chart/> (June 12, 2025).

Plastics Europe. 'Chemical Recycling'. Chemical Recycling. <https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/recycling/chemical-recycling/> (June 17, 2025).

Plastics Europe, and European Association of Plastics Recycling, eds. 2022. 'Plastics the Facts 2022'. https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2023/03/PE-PLASTICS-THE-FACTS_FINAL_DIGITAL-1.pdf (June 16, 2025).

Prognos, Öko-Institut, and Wuppertal-Institut. 2021. 'Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland Seine Klimaziele Schon Vor 2050 Erreichen Kann.' eds Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende, and Agora Verkehrswende. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2021/KNDE_2045_Langfassung/Klimaneutrales_Deutschland_2045_Langfassung.pdf.

Ragonnaud, Guillaume. 2024. 'Revision of the Packaging and Packaging Waste Directive' ed. Wissenschaftlicher Dienst des Europäischen Parlaments. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/745707/EPRS_BRI\(2023\)745707_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/745707/EPRS_BRI(2023)745707_EN.pdf) (May 15, 2025).

Rannard, Georgina, and Francesca Gillett. 2021. 'COP26: World Leaders Promise to End Deforestation by 2030'. BBC News. <https://www.bbc.com/news/science-environment-59088498> (June 4, 2025).

Rat der Europäischen Union. 2024. 'PRESSEMITTEILUNG 869/24 Rat Gibt Grünes Licht Für Einen EU-Rahmen Für Die Zertifizierung von Dauerhaften CO₂-Entnahmen, Kohlenstoffspeichernder Landbewirtschaftung Und Der CO₂- Speicherung in Produkten'. <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2024/11/19/council-greenlights-eu-certification-framework-for-permanent-carbon-removals-carbon-farming-and-carbon-storage-in-products/pdf/> (June 4, 2025).



'Richtlinie (EU) 2023/2413'. 2023.

Riebeek, Holli. 2011. 'The Carbon Cycle'. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle> (March 20, 2025).

Rizos, Vasileios, Patricia Urban, Edoardo Righetti, and Amin Kassab. 2023. Chemical Recycling of Plastics. https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/2023-07/Chemical%20recycling%20of%20plastics_o.pdf (June 17, 2025).

Saadat, Sahand, Timo-Julian Schneider, Ammar Tijani, and Tilman Cremer. 2023. 'DAC-Prozessentwicklung' ed. Fraunhofer Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie (IEG). <https://ptxlablausitz.de/fileadmin/ptx/Dateien/Publikationen/study-dac-prozessentwicklung-fraunhofer-ptx-lab-lausitz.pdf> (April 10, 2025).

SYSTEMIQ, ed. 2022. 'ReShaping Plastics: Pathways to a Circular, Climate Neutral Plastics System in Europe'. <https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2022/05/ReShapingPlastics-v2.1.pdf> (June 17, 2025).

Tagesschau. 2024. 'Keine Einigung Auf UN-Plastikabkommen'. <https://www.tagesschau.de/ausland/plastikabkommen-ohne-einigung-100.html> (June 4, 2025).

Übereinkommen von Paris. 2016. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:paris_agreement (June 4, 2025).

Umweltbundesamt, ed. 2024a. 'Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen'. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#kohlendioxid->

Umweltbundesamt, ed. 2024b. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Übereinkommen von Paris 2024 Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2022. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-der-klimarahmenkonvention-9>.

Umweltbundesamt, ed. 2024c. 'Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024)'. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/projektionen_technischer_anhang_o.pdf (June 16, 2024).

Umweltbundesamt. 2025. 'Emissionsübersichten KSG-Sektoren 1990-2024'. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen> (June 16, 2024).

UNFCCC Sekretariat. 2021. 'COP26: Pivotal Progress Made on Sustainable Forest Management and Conservation'. <https://unfccc.int/news/cop26-pivotal-progress-made-on-sustainable-forest-management-and-conservation> (June 4, 2025).

United Nations. 1972. 'Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping Wastes and Other Matter'. <https://treaties.un.org/doc/publication/unts/volume%25201046/volume-1046-i-15749-english.pdf> (October 17, 2025).

United Nations. 1992. 'United Nations Framework Convention on Climate Change'. https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf.

United Nations. 1996. '1996 Protocol to the Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter'. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/lpamended2006.pdf> (October 17, 2025).

United Nations. 1997. 'Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change'. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.html>.

United Nations Climate Change Conference, ed. 2021. 'The Global Forest Finance Pledge'. <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20230106145241/https://ukcop26.org/the-global-forest-finance-pledge/> (June 4, 2025).



United Nations Economic and Social Council. 2015. '2015/33. International Arrangement on Forests beyond 2015'. <https://documents.un.org/doc/undoc/gen/n15/259/77/pdf/n1525977.pdf> (June 4, 2025).

United Nations Environment Programme. 2024. 'Chair's Text'. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/46710/Chairs_Text.pdf (June 4, 2025).

United Nations Environment Programme. Intergovernmental Negotiating Committee on Plastic Pollution. <https://www.unep.org/inc-plastic-pollution> (June 4, 2025).

Vega, Fernando, Mercedes Cano, Sara Camino, Luz M. Gallego Fernández, Esmeralda Portillo, and Benito Navarrete. 2018. 'Solvents for Carbon Dioxide Capture'. In *Carbon Dioxide Chemistry, Capture and Oil Recovery*, eds Iyad Karamé, Janah Shaya, and Hassan Srour. Rijeka: IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.71443.

Verband der Chemischen Industrie (VCI). 2023. 'CO₂-Recycling Ermöglichen Und Anreizen'. <https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/20230928-vci-position-ccu-in-der-chemieindustrie.pdf> (September 3, 2025).

Verband der Chemischen Industrie. 2025. 'Daten Und Fakten Zu Energie, Rohstoffe Und Preisen'. <https://www.vci.de/die-branche/zahlen-berichte/vci-statistik-grafiken-energie-klima-rohstoffe-chemie.jsp> (October 20, 2025).

Zalasiewicz, Jan, Mark Williams, Colin N Waters, Anthony D Barnosky, John Palmesino, Ann-Sofi Rönnskog, Matt Edgeworth, et al. 2017. 'Scale and Diversity of the Physical Technosphere: A Geological Perspective'. *The Anthropocene Review* 4(1): 9–22. doi:10.1177/2053019616677743.



Anhang I – Technologiesteckbriefe

I.a. Biomasse

| Thermochemische Biomassevergasung | |
|---|---|
| Benötigte Rohstoffe | Feste, lignin-haltige und organische Biomasse |
| Produkt(e) | Hauptprodukt: Synthesegas , bestehend aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Methan und Kohlendioxid. Nebenprodukte: Asche, Teere und Kondensate |
| Prozessschritt(e) | Zuerst wird der Biomasse im Trocknungsschritt das Restwasser entfernt. Im zweiten Schritt erfolgt bei 300 - 600 °C die thermische Zersetzung der Biomasse in flüssige und gasförmige Bestandteile. Im letzten Prozessschritt erfolgt der Vergasungsprozess (partielle Oxidation und Reduktion) der gebildeten Holzkohle und der gasförmigen Bestandteile zu einem Synthesegas bei Temperaturen zwischen 800 - 1.400 °C. |
| Technologiereifegrad | 6-9 Die Technologie befindet sich zwischen Demonstrations- und frühem kommerziellen Einsatzstadium. Ein flächendeckender wirtschaftlicher Betrieb hat sich bislang noch nicht etabliert. |
| Technologische Hürden | <ul style="list-style-type: none">- Geringe Schüttdichte der Rohstoffe führt zu Dosierungsproblemen.- Teerbildung tritt vor allem bei Biomassearten mit einem hohen Aschegehalt auf, wodurch Korrosionen gefördert werden.- Technische anspruchsvolle Gasreinigung notwendig. |
| Energiebedarf | Der Vergasungsprozess an sich ist autotherm (notwendige Reaktionswärme wird durch wärmeerzeugende Teilreaktionen während der Verbrennung selbst bereitgestellt), jedoch fallen Energieeinträge für Trocknung, Dampfbereitstellung, Reinigungs- sowie Konditionierungsschritte an. |
| Ggf. CO₂-Konzentration im Abgasstrom/Produktstrom | < 50 % ³⁴ |
| Weltweite Kapazität | Unbekannt |
| Folgeprozess(e) | <ul style="list-style-type: none">- Methanisierung des Synthesegases zu Bio-SNG (synthetisches Erdgas).- Herstellung von flüssigem Treibstoff über die Fischer-Tropsch-Synthese.- Acetatsynthese liefert bspw. Ethanol, oder andere C₂+ Verbindungen aus Synthesegas. |
| Folgeprodukt(e) | Methanol und ggf. über einen Folgeprozess zu Essigsäure. |

³⁴ Ausfelder, Florian, and Hanna Ewa Dura, eds. 2018. 'Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien'.



| Pyrolyse von Biomasse | |
|------------------------------|---|
| Benötigte Rohstoffe | Trockene, lignin-haltige Biomasse |
| Produkt(e) | Hauptprodukt: Pyrolyseöl , Biokohle, Pyrolysegas Nebenprodukt: Wasser, Asche, Teerfraktion. |
| Prozessschritt(e) | Die Pyrolyse erfolgt unter Ausschluss von Sauerstoff und läuft in 3 Stufen ab. Die Trocknung der Biomasse findet bei ca. 105°C statt. Anschließend erfolgt der thermische Abbau (Pyrolyse) bei Temperaturen von 300-600 °C, wobei sich die Biomasse zu flüchtigen organischen Verbindungen und festen Rückstände zersetzt. Der letzte Schritt des Pyrolyseverfahrens beinhaltet die Produktkondensation- und Separation durch Abkühlen der Pyrolysedämpfe, um so das kondensierbare Pyrolyseöl abzuscheiden. Für die Maximierung des Pyrolyse-Anteils empfiehlt sich die schnelle Pyrolyse. |
| Technologiereifegrad | 5-7 für die Trockenpyrolyse. 5-6 im Falle der hydrothermalen Pyrolysetechnologie, wobei einige Projekte näher an der Demonstration sind. |
| Technologische Hürden | - Probleme bei der Verarbeitung unterschiedlicher Materialien, z.B. Teerbildung - Wärmeübertragung bei Vergrößerung des endothermen Pyrolysereaktors - Verbesserung der Qualität und Konsistenz des Bioöls (Pyrolyseöl). |
| Energiebedarf | Hierbei handelt es sich um einen endothermen Prozess (benötigt eine Wärmezufuhr zum Reaktionsstart), wobei der Energiebedarf verfahrensabhängig ist. LCA nennen 50 % bezogen auf den chemischen Energieinhalt des Pyrolyse-Bioöls. ³⁵ |
| Weltweite Kapazität | Unbekannt. Es existieren mehrere kommerzielle Pyrolyseanlagen in Nordamerika, Europa und Asien, jedoch kein globaler Masseneinsatz. |
| Folgeprozess(e) | - Phenole, Aromate und Alkohole können über die Destillation und Fraktionierung des Pyrolyseöls erzeugt werden. - Benzole, Toluole, Alkene und bspw. Ethen werden über das Nachschalten von katalytischen Cracking-Verfahren aus dem Pyrolyseöl zersetzt. |
| Folgeprodukt(e) | Pyrolyseöl kann als Plattformchemikalie eingesetzt werden, beispielsweise für die Produktion von Phenol und Aromaten. Die Biokohle findet vor allem in der Landwirtschaft und als Reduktionsmittel- sowie Kohlenstoffsenke Anwendung. Pyrolysegase können als Prozessenergie oder Energiespeicher verwendet werden, jedoch liegt der Fokus hier eher auf das flüssige und feste Produkt der Pyrolyse. |

³⁵ Puettmann, Maureen E., and J.E. Cooper. 2012. 'Life-Cycle Assessment of Pyrolysis Bio-Oil Production'. https://www.researchgate.net/publication/237079795_Life-Cycle_Assessment_of_Pyrolysis_Bio-Oil_Production.



I.b. Chemisches Recycling

| PYROLYSE VON KUNSTSTOFFABFÄLLEN | |
|---|---|
| Benötigte Rohstoffe | Hauptsächlich gemischte Kunststoffabfälle (v.a. mit Polyolefinen wie HDPE, LDPE, PP, PE), die nicht für das mechanische Recycling genutzt werden können. |
| Produkt(e) | Pyrolyseöl, Synthesegas und Koks |
| Prozessschritt(e) | Die Pyrolyse erfolgt unter Ausschluss von Sauerstoff und läuft in folgenden Stufen ab. Nach einer mechanischen Vorbehandlung der Kunststoffabfälle erfolgt nach der Zufuhr in den Pyrolysereaktor der thermische Abbau (Pyrolyse) bei Temperaturen von 300-800 °C, wobei sich der Kohlenstoffanteil der Kunststoffe zu flüchtigen organischen Verbindungen und festen Rückständen zersetzt. Der nächste Schritt des Pyrolyseverfahrens beinhaltet die Produktkondensation- und -separation durch Abkühlen der Pyrolysedämpfe, um so das kondensierbare Pyrolyseöl abzuscheiden. Additive und Zusatzstoffe finden sich je nach chemischer Zusammensetzung in unterschiedlichen Fraktionen wieder. Deshalb erfolgt ggf. eine Aufreinigung der Pyrolyseöle und -gase, um Heteroatome und Halogene abzutrennen. |
| Technologiereifegrad | 5-7 |
| Technologische Hürden | Aufgrund der großen Vielfalt der eingesetzten Kunststoffarten und der daraus resultierenden Heterogenität von Kunststoffabfällen ist die Vorsortierung für die Qualität der erzeugten Pyrolyseprodukte von Bedeutung. Zwischenprodukte können zum Verkleben oder zur Verschmutzung neigen. ³⁶ Aus Korrosionsgründen muss der Polyvinylchlorid- (PVC) -Gehalt im Einsatzstrom möglichst geringgehalten, oder Chlor über einen Entchlorungsschritt als Salzsäure (HCl) abgeschieden werden. Bei der Kunststoffherstellung werden z.B. Silizium und Halogene als Additive zugesetzt, um gewünschte Eigenschaften des Kunststoffs zu erhalten. Diese Additive können beim Recycling der Kunststoffe die Qualität der gewonnenen Recyclingprodukte je nach nachfolgender Verwertung verringern und in Folgeanlagen zu Problemen führen. Sie sollten deshalb, z.B. durch Hydrierung (Wasserstoffzugabe bei erhöhten Temperaturen und Drücken), entfernt werden. |
| Energiebedarf | Die Reaktion benötigt Energiezufuhr (endotherm). Je nach Ausgangsmaterial und Prozessparametern (i.d.R. 300 bis > 800 °C) schwankt der Energiebedarf. |
| Mittlerer Kohlenstoffgehalt von Abfallkunststoffen | Etwa 690 kg Kohlenstoff pro Tonne Abfallkunststoffe. ³⁷ Die Kohlenstoffeffizienz der Pyrolyse liegt bei etwa 65 %. ³⁶ |
| Weltweite Kapazität | Mittel Es existieren verschiedene kommerzielle Projekte im kt-Bereich. |
| Folgeprozess(e) | Synthesegas kann eine Reihe von Prozessen bedienen, etwa die klassische Methanol-, Alkohol-, Benzin-, Dimethylether- oder die Fischer-Tropsch-Synthese. Auch eine Methanisierung, Hydroformylierung oder ein biotechnologischer Einsatz ist möglich. |

³⁶ Stapf, D., H. Seifert, and M. Wexler. 2019. 'Thermische Verfahren zur rohstofflichen Verwertung kunststoffhaltiger Abfälle'. In Energie aus Abfall. Bd.16. Hrsg.: S. Thiel, Berlin, Deutschland: Thomé-Kozmiensky Verlag (TK), 357-75.

³⁷ Ausfelder, Florian, Alexis Bazzanella, Roland Geres, Andreas Wehrl, and Katja Wendler. 2023. 'Chemistry4Climate - Wie die Transformation der Chemie gelingen kann' eds Verband der Chemischen Industrie (VCI) and Verein Deutscher Ingenieure (VDI). https://dechema.de/-p-20325184-EGO-TEC-8ffd2006a97f924b4d1ea3decdbc7325/_/c4c-Wie%20die%20Transformation%20oder%20Chemie%20gelingen%20kann-Abschlussbericht%202023.pdf (February 1, 2024).



| | |
|------------------------|--|
| Folgeprodukt(e) | Alkohole, wie beispielsweise - Methanol - Ethanol - Propylenglykol Kraft- und Brennstoffe, wie etwa - Benzin - Methan - Diesel - Kerosin Aldehyde als Ausgangsbasis für etwa - Schmiermittel - Weichmacher - Waschmittel Biotechnologische Ansätze sind Basis für beispielsweise - Organische Säuren wie Acetat - Biokraft- und Brennstoffe, wie Methan - Alkohole |
|------------------------|--|

I.c. CO₂-Nutzung

| DIREKTSYNTHESE VON METHANOL | |
|---|---|
| Benötigte Rohstoffe | CO ₂ und H ₂ |
| Produkt(e) | Methanol |
| Prozessschritt(e) | <p>Die Methanol-Direktsynthese aus CO₂ und H₂ besteht ausschließlich aus dem Prozessschritt der katalytischen Hydrierung, die nach der folgenden Reaktionsgleichung abläuft:</p> $\text{CO}_2 + 3 \text{H}_2 \Rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ <p>Diese Reaktion kann homogen oder heterogen katalysiert werden. Industrielle Prozesse sind bevorzugt heterogen katalysiert, da der Prozess stabiler ist. Außerdem lassen sich Stoffe besser vom Katalysator abtrennen, was das Recycling verbessert.</p> <p>Ein gleichzeitiges Ablaufen einer rWGS-Reaktion ($\text{CO}_2 + \text{H}_2 \Leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$) muss verhindert werden^{38, 39}.</p> |
| Technologiereifegrad | 8-9 |
| Technologische Hürden | Die technologische Reife ist erreicht. Langzeittests haben bestätigt, dass der Prozess robust ist. Eine Anlage in China demonstriert die Methanol-Direktsynthese im kleinen industriellen Maßstab. |
| Energiebedarf | $\Delta H_{298, \text{K}} = -49,5 \text{ kJ mol}^{-1}$ ³⁹ Es handelt sich um eine exotherme Reaktion. |
| CO₂-Konzentration im Abgasstrom | Je nach Druck- und Temperaturbedingungen kann mehr oder weniger CO ₂ umgesetzt werden. Bei 230 °C und 50 bar würden etwa 30 % CO ₂ zu Methanol umgesetzt ³⁸ und etwa 70 % im Abgasstrom verbleiben. Dieser wird dem Reaktor meist wieder zugeführt. |
| Weltweite Kapazität | Hoch Derzeit werden etwa 100 Mt jährlich über diesen Weg gewonnen. In Zukunft könnte die Nachfrage steigen. |
| Folgeprozess(e) | Methanol kann für verschiedene Folgeprozesse, sog. Methanolrouten, eingesetzt werden, beispielsweise für die Produktion von Olefinen und Aromaten oder Flugzeugtreibstoff. Aber auch der Formoxprozess, eine Carbonylierung oder eine Dehydratisierung können folgen. |

³⁸ Bowker, Michael. 2019. 'Methanol Synthesis from CO₂ Hydrogenation'. ChemCatChem 11(17): 4238–46. doi:10.1002/cctc.201900401.

³⁹ Guil-López, R., N. Mota, J. Lorente, E. Millán, B. Pawelec, J.L.G. Fierro, and R. M. Navarro. 2019. 'Methanol Synthesis from CO₂: A Review of the Latest Developments in Heterogeneous Catalysis'. Materials 12(23): 3902. doi:10.3390/ma12233902.



| | |
|------------------------|---|
| Folgeprodukt(e) | Formaldehyd als Ausgangsbasis für beispielsweise - Arzneimittel - Farbstoffe - Harnstoff-, Melamin- und Phenol-Formaldehydharze Essigsäure als Ausgangsbasis für beispielsweise - Polymere wie Polyvinylacetat für Farben und Klebstoffe - Celluloseacetate für Folien oder Textilien Olefine als Ausgangsbasis für beispielsweise - Waschmittelkomponenten - Isopropanol - Aceton Aromate als Ausgangsbasis für beispielsweise - Adipinsäure für die Nylonproduktion Dimethylether - Direkter Einsatz, beispielsweise als Treibgas in Haarspray oder als Kraftstoff - Als Ausgangsbasis für Kältemittel (R723) |
|------------------------|---|



| REVERSE WASSERGAS-SHIFT-REAKTION | |
|---|---|
| Benötigte Rohstoffe | CO ₂ und H ₂ |
| Produkt(e) | Synthesegas |
| Prozessschritt(e) | Über die Druck- und Temperaturbedingungen, sowie die Katalysatorwahl kann das Gleichgewicht wie für den Folgeprozess benötigt eingestellt werden. CO ₂ + H ₂ ⇌ CO + H ₂ O |
| Technologiereifegrad | 8 |
| Technologische Hürden | Eine Skalierung ist noch erforderlich. |
| Energiebedarf | $\Delta H_{298K} = 42.1 \text{ kJ mol}^{-1}$ ⁴⁰ Die Reaktion ist endotherm – Energie muss zugeführt werden. |
| CO₂-Konzentration im Produktstrom | Der CO ₂ -Gehalt der zugeführten Gasmischung ist abhängig von der vorgeschalteten Quelle. Ein vorgeschaltetes Kraftwerk weist meist geringe CO ₂ -Konzentrationen auf, im Gegensatz zu aus anderen Prozessen abgetrenntes CO ₂ , wie etwa in der Ammoniaksynthese oder der Biomethanaufbereitung (vgl. Kapitel 3). |
| CO₂-Konzentration im Abgasstrom | Über die Wahl der Temperatur und passendem Reaktordesign können sehr hohe Umsetzungsraten generiert werden ⁴¹ . |
| Weltweite Kapazität | Gering - mittel Eine Demonstrationsanlage hat im Mai 2025 den Betrieb aufgenommen ⁴² , welche bis zu 2.500 Tonnen synthetische Kraftstoffe pro Jahr produzieren soll. |
| Folgeprozess(e) | Synthesegas kann eine Reihe von Prozessen bedienen, etwa die klassische Methanol-, Alkohol-, Benzin-, Dimethylether- oder die Fischer-Tropsch-Synthese. Auch eine Methanisierung, Hydroformylierung oder ein biotechnologischer Einsatz ist möglich. |

⁴⁰ Guil-López, R., N. Mota, J. Llorente, E. Millán, B. Pawelec, J.L.G. Fierro, and R. M. Navarro. 2019. 'Methanol Synthesis from CO₂: A Review of the Latest Developments in Heterogeneous Catalysis'. *Materials* 12(23): 3902. doi:10.3390/ma12233902.

⁴¹ Whitlow, Jonathan E., and Clyde F. Parrish. 2003. 'Operation, Modeling and Analysis of the Reverse Water Gas Shift Process'. *AIP Conference Proceedings* 654(1): 1116–23. doi:10.1063/1.1541409.

⁴² INERATEC. 2025. 'INERATEC Produziert Erstes E-Fuel an Pionieranlage in Frankfurt'. <https://www.ineratec.de/de/news/ineratec-produziert-erstes-e-fuel-pionieranlage-frankfurt> (May 21, 2025).



| | |
|------------------------|--|
| Folgeprodukt(e) | Alkohole, wie beispielsweise - Methanol - Ethanol - Propylenglykol Kraft- und Brennstoffe, wie etwa - Benzin - Methan - Diesel - Kerosin Aldehyde als Ausgangsbasis für etwa - Schmiermittel - Weichmacher - Waschmittel Biotechnologische Ansätze sind Basis für beispielsweise - Organische Säuren wie Acetat - Biokraft- und Brennstoffe, wie Methan - Alkohole |
|------------------------|--|



Anhang II - Fördermaßnahmen

II.a. Fördermaßnahmen der EU

Die Europäische Union unterstützt CCU-Technologien durch verschiedene Programme:

- Horizon 2020 ⁴³ & Horizon Europe ⁴⁴: Bietet Forschungsgelder für die Entwicklung neuer CCU-Technologien und deren industrielle Umsetzung. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Effizienzsteigerung von CO₂-Abscheidung und innovativen Verwertungsmethoden für abgeschiedenes CO₂ ⁴⁵
- Innovation Fund ⁴⁶: Eines der weltgrößten Förderprogramme für innovative CO₂-arme Technologien. Es unterstützt Projekte in Bereichen wie kohlenstoffarme Prozesse in energieintensiven Industrien, CO₂-Abscheidung und -Nutzung (CCU), CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS), erneuerbare Energieerzeugung und Energiespeicherung. Die Gesamtförderung hängt vom CO₂-Preis ab und kann zwischen 2020 und 2030 bis zu 40 Milliarden Euro betragen.
- Recovery and Resilience Facility ⁴⁷: Unterstützt Mitgliedstaaten bei der wirtschaftlichen Erholung von der Coronakrise und der grünen Transformation. Innerhalb dieses Programms werden Investitionen in klimaneutrale Technologien, darunter auch CCU, gezielt gefördert.
- Important Projects of Common European Interest (IPCEI) ⁴⁸: Instrument der Europäischen Union zur Förderung von Projekten, die erheblich zur wirtschaftlichen Entwicklung und Wettbewerbsfähigkeit der EU beitragen. Sie ermöglichen es, transnationale Kooperationen und strategisch bedeutende Wertschöpfungsketten durch staatliche Beihilfen zu unterstützen, insbesondere in Bereichen wie Umwelt, Energie und Digitalisierung. Somit bietet IPCEI eine wertvolle Plattform zur Förderung von CCU-Projekten innerhalb der EU, indem sie finanzielle Unterstützung und transnationale Kooperationen ermöglichen, die für die erfolgreiche Implementierung solcher Technologien unerlässlich sind.
- Connecting Europe Facility (CEF) ⁴⁹: Ein zentrales EU-Förderinstrument zur Umsetzung des European Green Deals, das transnationale Infrastrukturprojekte im Bereich Energie, Transport und Digitalisierung unterstützt. CCU-Technologien werden hier vor allem im Zusammenhang mit CO₂-Transportinfrastrukturen und deren Anbindung an Industrieanlagen gefördert. ⁵⁰
- InvestEU Programme ⁵¹: Unterstützt nachhaltige Investitionen und Innovationen mit dem Ziel, über 372 Milliarden Euro an privaten Investitionen zu mobilisieren. Prinzipiell werden auch CCU-Technologien unterstützt, allerdings sind diesbezüglich bisher keine Projekte im Rahmen von InvestEU bekannt.
- LIFE Programme ^{52, 53}: Das Programm ist die Leitinitiative der EU für Umwelt- und Klimamaßnahmen und spielt damit eine zentrale Rolle bei der Verwirklichung der Ziele des Europäischen Green Deal. Die Finanzausstattung von 5,4 Milliarden Euro für den Zeitraum 2021-2027 ist in zwei Bereiche und vier Unterprogramme aufgeteilt, die jeweils spezifische Ziele verfolgen. Beispielhaft kann hier das CO₂toCH₄-Initiative ⁵⁴ genannt werden, die ein innovatives, integriertes und nachhaltiges industrielles Verfahren entwickeln und demonstrieren soll, dass sowohl die Energiespeicherung als auch die CO₂-Abscheidung und -Verwertung (CCU) ermöglicht. Die Technologie wird erneuerbaren Wasserstoff erzeugen, der aus erneuerbarer Elektrizität und Wasserelektrolyse gewonnen und biologisch in Methan umgewandelt wird, unter der Verwendung von CO₂ aus Abgasen.

43 https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-2020_en

44 https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en

45 https://setis.ec.europa.eu/document/download/f3ece8a5-c395-4163-b498-b72c8de70f7c_en

46 https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund_en

47 https://next-generation-eu.europa.eu/recovery-and-resilience-facility_en

48 https://competition-policy.ec.europa.eu/state-aid/ipcei_en

49 https://commission.europa.eu/funding-tenders/find-funding/eu-funding-programmes/connecting-europe-facility_en

50 https://cinea.ec.europa.eu/programmes/connecting-europe-facility_en

51 https://investeu.europa.eu/investeu-programme_en

52 https://cinea.ec.europa.eu/programmes/life_en

53 Regulation (EU) 2021/783 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2021 establishing a Programme for the Environment and Climate Action (LIFE), and repealing Regulation (EU) No 1293/2013. OJ L 172

54 <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE20-CCM-GR-001642/demonstration-of-a-mobile-unit-for-hybrid-energy-storage-based-on-CO2-capture-and-renewable-energy-source>



II.b. Fördermaßnahmen in Deutschland

- Kopernikus-Projekte P2X ⁵⁵: Erforschung von Power-to-X-Technologien, die CO₂ für synthetische Kraftstoffe und chemische Prozesse nutzbar machen. Ziel ist die Entwicklung industriell skalierbarer Lösungen für CCU-basierte Energie- und Rohstoffkreisläufe.
- Bundesförderung für industrielle Klimaschutzmaßnahmen ⁵⁶: Finanzielle Unterstützung für klimafreundliche Investitions- sowie Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationsvorhaben im Industriesektor. Die Förderung umfasst zwei Module:
 - Modul 1 fördert die Dekarbonisierung der Industrie durch Investitionen und Forschung zur dauerhaften Reduktion von Treibhausgasemissionen.
 - Modul 2 fördert gezielt die Anwendung und Umsetzung von Carbon Capture and Utilization (CCU) und Carbon Capture and Storage (CCS), insbesondere in Sektoren mit schwer vermeidbaren Emissionen wie Zement, Kalk, Chemie, Stahl und thermische Abfallbehandlung. Auch Negativemissionstechnologien werden adressiert.
- Nationale Wasserstoffstrategie ⁵⁷: Fördert den Hochlauf von grünem Wasserstoff als zentralen Baustein der Energiewende und Transformation der Industrie. Sie betont die Rolle von CO₂ als Rohstoff in der Wasserstoffwirtschaft, insbesondere für Power-to-X-Anwendungen wie die Herstellung von eFuels und Chemikalien. CCU wird als Teil der Wertschöpfungskette betrachtet, wenn abgeschiedenes CO₂ in Kombination mit erneuerbarem Wasserstoff genutzt wird. Die Strategie legt den Fokus auf die Nutzung von erneuerbarem Wasserstoff, sieht aber auch vor, dass CO₂-Quellen möglichst nachhaltig und bevorzugt aus biogenen oder atmosphärischen Quellen stammen sollten.
- Förderwegweiser Dekarbonisierung ⁵⁸: Eine zentrale Anlaufstelle für Unternehmen zur Identifikation passender Fördermöglichkeiten. Enthält spezifische Programme zur finanziellen Unterstützung von CCU-Technologien sowie Beratungsangebote für Unternehmen, die CCU in ihre Produktionsprozesse integrieren möchten.

⁵⁵ <https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/p2x>

⁵⁶ <https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Bund/BMWi/bundesfoerderung-decarbon-bik-Mod1.html>

⁵⁷ <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html>

⁵⁸ <https://www.klimaschutz-industrie.de/foerderung/foerderwegweiser-dekarbonisierung/>



Anhang III – Forschung und Entwicklung

III.a. Technologiereifegrad

Die hier verwendete Definition des Technologischen Reifegrades ist in Anlehnung an die ursprüngliche TRL-Definition der NASA.

TRL 1: Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips

Die wissenschaftliche Grundlagenforschung ist abgeschlossen. Grundlegende Prinzipien sowie die Umriss des Prozesses sind festgelegt.

TRL 2: Beschreibung des Technologiekonzepts und/oder der Anwendung einer Technologie

Theorie und wissenschaftliche Grundlagen fokussieren auf spezifische Anwendungsbereiche, um das technologische Konzept zu definieren. Anwendung und Durchführungskriterien wurden formuliert. Entwicklung von analytischen Methoden zur Simulation oder Untersuchung der Anwendung.

TRL 3: Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie

Prüfung (experimenteller Beleg) des Konzeptes. Forschung und Entwicklung wurde mit den ersten Laboruntersuchungen gestartet. Nachweis der generellen Machbarkeit durch Laborversuche ist erfolgt.

TRL 4: Versuchsaufbau im Labor

Eigenständiger Prototypenbau, Implementierung und Test, Integration der technischen Elemente. Versuche mit komplexen Aufgabenstellungen oder Datensätzen.

TRL 5: Versuchsaufbau in Einsatzumgebung

Versuchsaufbau wird intensiv in relevanter Umgebung erprobt. Wesentliche Technikelemente wurden mit den unterstützenden Elementen verbunden. Prototypenimplementierung entspricht der Zielumgebung und Schnittstellen.

TRL 6: Prototyp in Einsatzumgebung

Prototypenimplementierung mit realistischen komplexen Problemen. Teilweise integriert in existierende Systeme. Begrenzte Dokumentation verfügbar. Technische Machbarkeit im aktuellen Anwendungsbereich komplett nachgewiesen.

TRL 7: Prototyp im Einsatz

Demonstration des Versuchsaufbaus im betrieblichen Umfeld. System ist beinahe maßstabsgetreu zum betrieblichen Umfeld. Die meisten Funktionen für Demonstration und Test sind vorhanden. Gut integriert mit dem Sicherheits- und Hilffsystem. Begrenzte Dokumentation verfügbar.

TRL 8: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich

Systementwicklung beendet. Vollständige Integration in die betriebliche Hardware und Softwaresysteme. Großteil der Benutzerdokumentation, Ausbildungsdokumentation und Wartungsdokumentation sind verfügbar. Das System wurde funktionsgeprüft in simulierten und Betriebsszenarien. Verifizierung und Validierung abgeschlossen.

TRL 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes

Das gegenwärtige System wurde intensiv demonstriert und getestet in seiner Betriebsumgebung. Dokumentation vollständig abgeschlossen. Erfolgreiche Betriebserfahrungen.

III.b. Forschung und Entwicklung: (chemisches) Recycling

ARCUS Greencycling hat eine erste kommerzielle Pyrolyse-Anlage für chemisches Recycling von Kunststoffabfällen am Industriepark Höchst errichtet. Dort werden pro Jahr ca. 4.000 t gemischter Kunststoffe verarbeitet⁵⁹. Sie ist die bisher größte Anlage seiner Art in Deutschland. Des Weiteren betreibt Carboliq seit 2021 eine Anlage zur Direktverölung von Kunststoffabfällen mit einer nominellen Kapazität von 2.500 t/a. Der carboliq-Prozess wird mittels Reibungswärme betrieben, welche durch spezielle rotierende Aggregate erzeugt wird, sowie unter Einsatz eines Katalysators. Dieser ermöglicht die Durchführung des Prozesses bei niedrigen

⁵⁹ <https://arcus-greencycling.com/>



Temperaturen und beschleunigt diesen. Seit 2023 wird eine Anlage nahe Köln gebaut, die mit einer Kapazität von 10 kt Output pro Jahr ausgelegt ist und 2025 mit den ersten Produkten auf den Markt kommen soll.^{60, 61, 62}

Ferner hat der PVC-Hersteller Ineos Inovyn zwei Pilotanlagen für chemisches Recycling von PVC-Abfällen in Betrieb genommen. Ineos Inovyn gibt an, dass hier mit dem lösungsmittelbasierten „Vinyloop™“ Verfahren Abfälle recycelt werden, die nicht mechanisch verwertet werden können. Das Unternehmen hat sich zum Ziel gesetzt, eine Anlage für den wirtschaftlichen Betrieb mit einer Kapazität von 40 kt pro Jahr bis 2030 zu errichten^{63, 64}. Des Weiteren planen DOW und Mura Technologies die Errichtung einer Anlage zum chemischen Recycling mittels Hydro-PRT (Hydrothermal Plastic Recycling Technology), einem Recyclingverfahren, das überkritisches Wasser verwendet für die Herstellung kurzkettiger Kohlenwasserstoffe. Die Anlage mit einer Kapazität von 120 kt pro Jahr (und mit einer geplanten Produktionskapazität von 100 kt recycelter Kohlenwasserstoffe pro Jahr), die in Böhlen, Sachsen, gebaut werden soll, wäre die bis dato größte Anlage zum chemischen Recycling in Europa. Im Jahr 2025 soll die Anlage in Betrieb gehen.^{65, 66}

Nennenswert ist eine von COVESTRO betriebene Anlage im Pilotmaßstab, die Polycarbonat-Abfälle mit Hilfe der Chemolyse in Monomere zerlegt. Hier können Abfälle mit einem hohen Polycarbonat-Anteil von über 50 % recyceln werden⁶⁷. Das Start-up Mattered aus Braunschweig hat zusammen mit der Rittec 8.0 Umwelttechnik GmbH ein Verfahren entwickelt, um Polyester in Monomere aufzulösen. Diese sollen wiederum dazu genutzt werden, Neuwaren herzustellen. Eine Technikumsanlage soll ausgebaut werden, die 25 kg Abfall pro Stunde verarbeitet⁶⁸. Die in diesem Absatz genannten Verfahren, welche von COVESTRO und Mattered/Rittec 8.0 Umwelttechnik GmbH genutzt bzw. entwickelt werden, sind nicht dafür entwickelt, um Rohstoffe für die Grundchemikalienherstellung bereitzustellen.

Grundsätzlich fokussierte sich die Mehrheit der Projekte auf die Nutzung von Pyrolyse⁶⁹

III.c. Forschung und Entwicklung: Biomassenutzung

Die Pyrolyse von Biomasse wurde bereits Pilotanlagen untersucht. Im JRC-Report Bioenergy in the European Union von 2024 angegeben, dass es Anlagen gibt, die bis zu 200 Tonnen Biomasse pro Tag nutzen. In einem weiteren Satz wird erwähnt, dass Pyrolyse und Bioölveredelungstechnologie noch nicht kommerziell verfügbar sind. Das TRL wird mit 5-7 angegeben.

Als Beispiel kann die BTG Biomass Technology Group BV aufgeführt werden. Das Unternehmen ist darauf spezialisiert Biomasse in Brennstoffe, Energie und biologische Rohstoffe umzuwandeln. BTS ist ein führender Anbieter von Schnellpyrolyse-Technologie und liefert Produktionsanlagen, die nachhaltige Biomassereste in Fast Pyrolysis Bio-Oil (FPBO) umwandeln, das fossile Brennstoffe ersetzen kann. BTG-Bioliquids liefert Fast Pyrolysis Bio-Oil-Anlagen, die ausschließlich mit Biomasserückständen wie Sägemehl, Sonnenblumenschalen, Straßenbegleitgrün und Stroh betrieben werden können. Auf der Firmenwebsite wird eine Pyrolyseöl-Produktionsanlage in Hengelo, Niederlande erwähnt, die Anfang 2015 in Betrieb genommen und die Produktion seitdem schrittweise gesteigert wurde. Die Anlage wandelt 5 Tonnen Holzabfälle pro Stunde in Pyrolyseöl, Prozessdampf und Strom um. Die Nennkapazität wurde 2017 erreicht, und seither läuft die Anlage kontinuierlich. Der Erfolg des Projekts war der erste Schritt zur Kommerzialisierung der Schnellpyrolyse-Technologie im großen Maßstab. Aktuell wird daran gearbeitet die Anlage weiter zu optimieren und z. B. ein Großlager für andere mögliche künftige Rohstoffarten zu errichten.⁷⁰

Ferner stellt das Bio-Raffinerieunternehmen Green Fuel Nordic Oy im kommerziellen Maßstab Bio-Öl her. Dabei nutzt das Unternehmen Holzreststoffe für einen Pyrolyseprozess. Das Bio-Öl kann in der Industrie weiter als Rohstoff für die Herstellung von

60 <https://packaging-journal.de/carboliq-verwandelt-kunststoffabfaelle-in-oel/>

61 <https://www.suedpack.com/de/nachhaltigkeit/kreislaufwirtschaft/carboliq>

62 https://www.kunststoffweb.de/branchen-news/carboliq_dr_harald_klein_neuer_geschaefsfuehrer_t256383

63 <https://www.ineos.com/news/shared-news/ineos-inovyn-launches-next-generation-recycling-pilot-plants--to-strengthen-europes-pvc-recycling/>

64 https://www.kunststoffweb.de/branchen-news/ineos_inovyn_pvc-erzeuger_nimmt_pilotanlagen_fuer_chemisches_recycling_t255515?

65 <https://de.dow.com/de-de/presse/pressemitteilungen/dow-und-mura-technology-planen-bau-europas-groebster-anlage-fur-chemisches-recycling.html>

66 <https://muratechnology.com/app/uploads/2024/05/Mura-Technology-2024-Brochure-German.pdf>

67 <https://www.covestro.com/press/de/chemisches-recycling-von-polycarbonat-erreicht-wichtiges-etappenziel/>

68 <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/mattered-baut-pilotanlage-fuer-chemisches-recycling-von-polyester/>

69 <https://eu-recycling.com/Archive/40330>

70 <https://www.btgworld.com/en/>



Treibstoffen Gas genutzt werden. So könnte der Prozess theoretisch auch genutzt werden, um Rohstoffe für die Herstellung von Grundchemikalien bereitzustellen.

In Alberta, Canada, hat das Unternehmen Enerkem eine Anlage zur Vergasungstechnologie für nicht verwertbare Bioabfälle im Demonstrationsmaßstab betrieben, um Biokraftstoffe herzustellen. In mehr als 15.000 Betriebsstunden wurden die Anlage getestet, wobei Ethanol und Methanol produziert wurde. Da die Ziele, die mit dem Bau der Anlage einhergingen, erreicht wurden, wurde die Anlage stillgelegt. Aktuell wird nach Investoren gesucht, damit die Technologie in die Marktreife gehoben werden kann.⁷¹

Die Chemieindustrie kann im Umgang mit der Biomassenutzung ggf. auch von Erkenntnissen im Bereich Biofuel-Erzeugung (Beispiel Projekt Synergy Fuels) und Verarbeitung verschiedener Arten von Biomasse im Allgemeinen (Beispiel Cluster zur Nutzung feuchter Biomasse) profitieren. Nicht zuletzt sind im Bereich nachhaltige Biomassegewinnung unter anderem umweltfreundliche Anbauverfahren wichtig, ein Beispiel dafür ist das Projekt Bunte Biomasse. Im Bereich der Forschung wird beispielsweise im Projekt Synergy Fuels eine Demonstrationsanlage zur Herstellung von E-Fuels und Biokraftstoffen untersucht. Das Ziel des Projektes ist es, die Kohlenstoffeffizienz biotechnologischer Verfahren zu steigern und durch die Integration von Synthesen die Effizienz zu steigern. An dem Projekt sind u. a. Fraunhofer UMSICHT und der TUM Campus Straubing beteiligt.⁷² Des Weiteren bündelt das Fraunhofer-Innovationscluster Bioenergy Kompetenzen aus Industrie und Wissenschaft, um neue Nutzungskonzepte für feuchte Biomasse zu entwickeln. Der Fokus liegt auf der Optimierung von Sammlung, Transport, Lagerung und Konversion, um biogene Zwischenprodukte für die chemische Industrie, Kosmetikindustrie und Energietechnik bereitzustellen.⁷³ Ferner ist das Projekt Bunte Biomasse nennenswert. Im Vorhaben wird darauf abgezielt, Landwirte beim Anbau von Wildpflanzen für die energetische Nutzung zu beraten. Ziel ist es, ökologisch wertvolle Kulturen als Energiepflanzen zu etablieren und gleichzeitig Biodiversität und Bodenschutz zu fördern.⁷⁴ Solche Maßnahmen könnten wichtig werden, um Biomasse auch für die Produktion von Grundchemikalien gewinnen zu können.

III.d. Forschung und Entwicklung: CCU

Im Bereich der Forschung und Entwicklung zur Nutzung von CO₂ als Rohstoff wurde speziell seit 2010 in Deutschland viele Projekte angestoßen. In dem Jahr startet die BMBF-Fördermaßnahme „Technologien für Nachhaltigkeit und Klimaschutz – Chemische Prozesse und stoffliche Nutzung von CO₂“. Im Rahmen der Fördermaßnahme wurde mit einem Fördervolumen von 100 Millionen Euro 34 Projekte gefördert. 16 der Projekte hatten zum Ziel, CO₂ für chemische Reaktionen zu nutzen. Zwei der Projekte bzw. Unternehmen der Fördermaßnahme können besonders hervorgehoben werden. Die Sunfire GmbH und COVESTRO haben durch die Förderung aus diesem Programm den Grundstein für eine Reihe von Aktivitäten im Bereich CCU legen können. Sunfire hat im gleichnamigen Projekt eine Power-to-Liquid-Anlage in Dresden errichtet, bei der mithilfe von CO₂, Wasser und erneuerbarer Energie synthetischer Diesel hergestellt werden konnte. COVESTRO fand im Project DreamReaction einen passenden Katalysator um CO₂ als Rohstoff in Kunststoffe einbinden zu können. Auf das BMBF-Programm folgten die Fördermaßnahmen CO₂Plus - Stoffliche Nutzung von CO₂ zur Verbreiterung der Rohstoffbasis“ und „CO₂WIN – CO₂ als nachhaltige Kohlenstoffquelle – Wege zur industriellen Nutzung“. Im Rahmen der beiden Fördermaßnahmen wurden 27 wissenschaftliche Verbundvorhaben zum Thema CO₂-Nutzung gefördert. CO₂-WIN verlief von 2020 bis 2024. Parallel wurden durch das BMBF durch die Großprojekte Kopernikus und Carbon2Chem CCU vorangetrieben. Aktuell läuft noch die BMBF-Fördermaßnahme KlimPro Industrie, die zum Ziel hat, Treibhausgasemissionen in der Grundstoffindustrie zu reduzieren. Auch im Rahmen dieses Programms werden vier CCU-Projekte gefördert.

Durch die Förderprogramme der Europäischen Kommission wurden eine Reihe von Projekten zur CO₂-Nutzung zu einer Vielzahl technischer Aspekte und Anwendungsfälle gefördert. In den letzten Jahren hat sich die Umsetzung von Unternehmen selbst-finanzierte Projekte drastisch erhöht. Im Folgenden werden Forschung & Entwicklungsaktivitäten zu CCU zusammenfassend beschrieben. Projekte zu rWGS und Methanolsynthese können dazu beitragen Grundchemikalien herzustellen. Auch die Projekte zur sogenannten Künstlichen Photosynthese zielen darauf ab, Energieträger und Grundchemikalien herzustellen. CCU-Projekte zur Herstellung von CO₂-basierten Kunststoffen tragen zur Reduzierung des Grundchemikalienbedarfs bei. Die Projekte, die der CO₂-Mineralisierung zugeordnet sind, dienen nicht dazu, den Kohlenstoffbedarf der chemischen Industrie zu decken oder zu

71 <https://enerkem.com/newsroom/enerkem-to-retire-its-edmonton-biofuels-facility>

72 <https://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/2023/SynergyFuels-macht-die-Herstellung-von-Biokraftstoffen-effizienter.html>

73 <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/projekte/innovationscluster-bioenergy.html>

74 <https://www.energie-aus-wildpflanzen.de/2021/05/25/endlich-politischer-rueckenwind-fuer-energie-aus-wildpflanzen/>



reduzieren. Bei diesen Verfahren soll Baumaterialien hergestellt werden. Dieser Pfad kann dazu beitragen CO₂-Emissionen zu reduzieren und Vorteile für die Baubranche auf den Weg zur Klimaneutralität mit sich bringen.

Power-to-X (rWGS und Fischer-Tropsch)

Die Sunfire GmbH demonstrierte mit ihrer Fuel 1 Anlage 2014, dass eine Power-to-Liquids-Anlage, bei der eine Hochtemperatur-elektrolyse, rWGS und Fischer-Tropsch Synthese miteinander verknüpft werden können, um mithilfe von CO₂, Wasser und Strom synthetische Kraftstoffe und Chemikalien herzustellen. Die Anlage produzierten ein Liter synthetischen Diesel. Sunfire war seit her bei unterschiedlichen Forschungsvorhaben engagiert, um Kraftstoffe und Chemikalien herzustellen. So hat Sunfire u. a. mit Nordic Electrofuel AS aus Norwegen zusammen an der Umsetzung einer kommerziellen Power-to-Liquid-Anlage am Industriepark Heroya in Prorsgrunn gearbeitet. Die Anlage soll in Kürze 10 Millionen Liter synthetischen Kraftstoff produzieren und dabei jährlich den CO₂-Fußabdruck um 25.000 Tonnen reduzieren. Im BMBF-Förderprogramm hat Sunfire zuletzt das Projekt HTCoEL koordiniert. Dabei wurden die kompakte Synthesegaserzeugung durch Hochtemperatur Co-elektrolyse untersucht. Mittlerweile konzentriert sich Sunfire auf die Herstellung und den Vertrieb von Elektrolyseuren.⁷⁵

Die INERATEC GmbH hat sich für die Entwicklung für modularen Power-to-Liquid-Anlagen spezialisiert und will nach eigenen Angaben alternativen Prozesswege für Produkte ebnen, die derzeit aus fossilem Erdöl gewonnen werden. Auf der Grundlage von erneuerbarem Strom, (grünem) Wasserstoff und CO₂ werden synthetische Chemikalien und Kraftstoffe hauptsächlich auf der Grundlage der Fischer-Tropsch-Synthese hergestellt. INERATEC beabsichtigt den Bau einer Power-to-Liquid-Anlage für e-Kraftstoffe (35.000 Tonnen pro Jahr) im Hafen von Amsterdam. Des Weiteren entsteht in Frankfurt am Main am Industriepark Hoechst die bisher größte Power-to-Liquid-Anlage zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen in Deutschland. Ziel ist es 2.500 Tonnen eFuels pro Jahr zu produzieren.

INERATEC ist in diversen Forschungsprojekten beteiligt, nennenswert ist z. B. eine Kooperation mit SOLER. Zusammen planen die Unternehmen den Bau einer Produktionsanlage für Biocarbon und eFuels in Frankreich. Bei der Herstellung von Biocarbon aus forstwirtschaftlichen Abfällen fällt Synthesegas als Nebenprodukt an. Dieses möchte INERATEC zur Herstellung von eFuels verwenden.⁷⁶

Das BMBF-geförderte Projekt Carbon2Chem startet im Jahr 2016 und ist seit 2020 in der zweiten Projektphase. Im Projekt, das von Thyssenkrupp koordiniert wird, soll Hüttengas aus der Stahlproduktion für die Herstellung von Chemikalien genutzt werden. Im Jahr 2018 wurde ein Technikum in Duisburg eröffnet, in dem erfolgreich Ammoniak, Methanol und höhere Alkohole aus CO₂ der Stahlproduktion hergestellt werden konnten. Der benötigte Wasserstoff kommt von einer alkalischen Wasserelektrolyse von ThyssenKrupp Uhde Chlorine Engineers und hat eine Leistung von 2 MW. Das Konsortium arbeitet weiter daran, den Prozess zu skalieren. Aktuell wird versucht das Projekt über eine weitere Förderung weiterzuführen.

In den vom BMBF geförderten "Kopernikus-Projekten für die Energiewende"⁷⁷ werden gemeinsam von Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft technologische und wirtschaftliche Lösungen für den Umbau des Energiesystems entwickelt. Innerhalb von drei Förderphasen sollen neue technologische Entwicklungen bis zur industriellen Reife gebracht und im entsprechenden Maßstab implementiert werden. Im Projekt P2X, mittlerweile in der dritte Förderphase, werden „Wasserstoff als Energie-Vektor“ und „Synthesegas als Energie-Vektor“ gebündelt und zu vollständigen Wertschöpfungsketten weiterentwickelt. Im Technologiepfad „Synthesegas als Energievektor“ wird auf die Felder „Mobilität“ und „Chemie“ eingegangen. Für die Synthese von Kohlenwasserstoff-basierten Kraftstoffen aus Synthesegas in modularen Anlagen liegt der Fokus auf dezentralen Anwendungen. Dabei wird ausschließlich die Fischer-Tropsch Technologie in einer Form berücksichtigt, die eine direkte Ankopplung an CO₂-Quellen ermöglicht.

Im Rahmen des Satellitenprojektes Reticus wird die Niedertemperatur Ko-Elektrolyse auf Basis der Silber-basierten Elektroden zur direkten Kopplung mit der Synthesegas-Fermentation untersucht. Als konkrete Produkte werden C6 Moleküle, bspw. Hexanol, synthetisiert, die ein marktnahes Potenzial in hochwertigen Kosmetikanwendungen aufweisen.

Solarbelt nutzt in Wertle CO₂ aus einer Biogasanlage und die Elektrolyse zur Wasserstoffherstellung für einen Fischer-Tropsch-Reaktor, um e-Kerosin herzustellen. Die Non-Profit-Organisation ist Eigentümerin und Betreiberin der weltweit ersten E-Kerosin-Produktionsanlage im Emsland⁷⁸.

⁷⁵ <https://sunfire.de/de/>

⁷⁶ <https://www.ineratec.de/de>

⁷⁷ <https://www.kopernikus-projekte.de/>

⁷⁸ <https://solarbelt.de/de/hauptseite-deutsch/>



Sasol aus Südafrika konzentriert sich derzeit auf die Nutzung fossiler Rohstoffe für seine Fischer-Tropsch-Verfahren. Die FT-Synthese von Sasol ist industriell verfügbar, daher liegt der TRL bei 9. Das Unternehmen erkennt jedoch die Bedeutung von Power-to-X-Prozessen (PtX) an, insbesondere in Verbindung mit den Zielen der EU in Bezug auf nachhaltige Flugkraftstoffe. Aus diesem Grund haben sie zusammen mit TOPSOE ein Joint Venture gegründet, das sich derzeit in der „Start-up Business/Inkubationsphase“ befindet. Es gibt jedoch keine Hinweise darauf, dass eine Demonstrationsanlage existiert, die auf der gesamten Wertschöpfungskette von Kohlendioxid basiert. Daher liegt der TRL wahrscheinlich unter 5⁷⁹.

Das dänische Unternehmen Topsoe bietet sowohl Prozesstechnologien als auch Katalysatorsysteme an. Die Technologien ermöglichen zum Beispiel die Herstellung von reinem CO oder Synthesegas aus CO₂. Topsoe ist auch mit der sogenannten PureStepTM-Lösung für die Umwandlung von Kunststoffabfällen in Naphtha im Bereich des chemischen Recyclings tätig. In einem Joint Venture mit Sasol wird eine rWGS-Anlage verwendet. Die neue Geschäftseinheit Sasol ecoFT, die 2021 gegründet wurde, arbeitet an der Erforschung, Entwicklung und Produktion von Kraftstoffen, wobei auch SAF erwähnt werden.

Methanol

Mit dem Bau der George-Olah-Plant in Island im Jahr 2012 war Carbon Recycling International (CRI) das erste Unternehmen, das CO₂-basiertes Methanol in industriellem Maßstab herstellte. Das Unternehmen nutzt am Standort CO₂ aus einer Geothermieanlage. Mit einem Scale-up in China im Jahr 2022 wurde die weltweit größte Produktionsanlage für Methanol aus recyceltem Kohlenstoff mit einer Kapazität von 110 kt/a in Betrieb genommen. Dort wird CO₂ aus einer Kokereianlage genutzt⁸⁰.

Das Unternehmen Perstorp⁸¹ leitet ein weiteres nennenswertes Projekt zur Herstellung von Methanol. Mit Project Air sollen 200.000 Tonnen fossil-basiertem Methanol ersetzt werden. Der Plan zum Bau der groß angelegten, kommerziellen CCU-Anlage zur Herstellung von nachhaltigem Methanol wurde von Perstorp im Januar 2019 offiziell vorgestellt. Des Weiteren ist Uniper Anteilseigner. Die genutzte alkalischen Druckelektrolyseanlage wurde von Sunfire gebaut.

Die Celanese Corporation ist ein weltweit tätiges Unternehmen, das differenzierte chemische Lösungen und Spezialmaterialien herstellt, die in den meisten wichtigen Industriezweigen und Verbraucheranwendungen eingesetzt werden. In Bezug auf CCU gründete Celanese 2013 zusammen mit Mitsui & Co. ein Joint Venture namens Fairway Methanol LLC, das Methanol in der Celanese-Anlage in Clear Lake produziert. An dem Standort wird Methanol auf herkömmliche Weise mit Hilfe von fossilen Rohstoffen hergestellt. Laut dem ESG-Bericht von Celanese soll das Methanol für die Verwendung in Chemikalien und Polymeren in ihren sogenannten „ECO-CC“-Wertschöpfungsketten verwendet werden, z. B. für Verpackungen, Druckfarben, Beschichtungen oder Klebstoffe. Celanese kündigte eine Erweiterung der Produktionskapazität dieser Anlage auf 1,62 Mt Methanol pro Jahr an, was zu einem Anstieg der Emissionen führt. Rund 60 % der CO₂-Emissionen aus dieser Anlage sollen aufgefangen und mit „kohlenstoffärmerem Wasserstoff“ zur Herstellung von Methanol umgewandelt werden. Celanese gibt an, dass 180 kt CO₂ abgeschieden und als Rohstoff für die Herstellung von etwa 130 kt Methanol pro Jahr verwendet werden. Die Inbetriebnahme des CCU-Projekts erfolgte Anfang 2024.⁸²

Das Demonstrationsprojekt Liquid Sunshine zur Herstellung von flüssigem „Solarkraftstoff“ wird vom Dalian Institute of Chemical Physics (DICP) in Lanzhou, China, durchgeführt. Dabei wird Wasserstoff mithilfe von einer 10 MW-Photovoltaikanlage erzeugt und für die Umwandlung von CO₂ in Methanol verwendet. Nach Angaben des DICP kann die Demonstrationsanlage 1kt Methanol pro Jahr mit einer Reinheit von 99,5 % produzieren. Die Demonstrationsanlage wurde Ende 2020 in Betrieb genommen. Der Umfang der Anlage soll in der nächsten Phase um ein oder zwei Größenordnungen, (10 – 100) kt Methanol pro Jahr, erweitert werden⁸³.

Liquid Wind ist ein schwedischer Hersteller von Elektrofuel-Anlagen. Im Rahmen des Projekts FlatschipONE – MeOH for ships soll eine kommerzielle Anlage für die Herstellung von Methanol bis 2025 errichtet werden. Die Anlage soll eine Jahreskapazität von 50 kt erreichen. Des Weiteren werden Anlagen mit einer Kapazität von 100 kt/a bereits anvisiert⁸⁴.

79 <https://www.sasol.com/our-businesses/sasol-ecoft>

80 <https://carbonrecycling.com/>

81 <https://www.perstorp.com/en/>

82 <https://www.celanese.com/news-and-media/2024/january/celanese-begins-carbon-capture-utilization-operations-at-clear-lake>

83 <https://mission-innovation.net/champions-corner-can-li-presents-the-liquid-sunshine-project-in-china/>

84 <https://www.liquidwind.com/>



Haru Oni ist eine eFuel-Anlage, die in Punta Arenas, Chile, aufgebaut werden. Ein Konsortium aus Porsche, Enel, Siemens Energy, Empresas Gasco, ENAP, ExxonMobil und HIF wollen Windenergie (3,4 MW Windturbinenkapazität) zur Herstellung von Wasserstoff (1,2 MW Elektrolyseurkapazität) nutzen. Auf einer Gesamtfläche von 3,7 Hektar sollen eFuels durch die Umwandlung von CO₂ und Wasserstoff hergestellt werden. Dabei entsteht im Zwischenschritt Methanol. In der Pilotphase sollen jährlich 130.000 Liter eFuels produziert werden. Dies konnte zu unserem Kenntnisstand bis 2024 noch nicht erreicht werden. Bis 2027 soll die Kapazität auf 550.000.000 Litern eFuels ansteigen⁸⁵.

Saudi Aramco aus Saudi-Arabien forscht im Rahmen eines sogenannten blauen Ammoniakprogramms an CO₂-basiertem Methanol⁸⁶.

Das Projekt GREEN MEIGA arbeitet an einem innovativen und integrierten technologischen Ansatz für die Produktion von E-Methanol. Das GREEN MEIGA-Projekt soll den Weg eröffnen, um eine r E-Methanol-Anlage im Industriemaßstab zu bauen. Langfristig soll über das Projekt die Unternehmen Iberdrola und FORESA in die Lage bringen, 100kt/a E-Methanol zu produzieren. Dabei würde 20 kt/a grünen Wasserstoff und 153 kt/a CO₂ benötigt⁸⁷.

Im Sinne der Produktion vom Grundchemikalien ist eine Zusammenarbeit der BASF mit BSE Methanol interessant. BSE Methanol bietet die Verfahrenstechnik von der Planung bis zum Betrieb von Anlagen zur Herstellung von CO₂-basiertem Methanol an. 2017 wurde verkündet, dass die beiden Unternehmen CO₂ und überschüssigen Strom zur Herstellung von Methanol nutzen wollen. Eine marktfähige Anlage ist daraus bis heute noch nicht entstanden^{88, 89}.

Das Fraunhofer-Zentrum für Chemisch-Biotechnologische Prozesse (CBP) entwickelt und skaliert in Leuna chemische Prozesse zur Umwandlung von CO₂ und Wasserstoff in Grundchemikalien, Brenn- und Kraftstoffe. Diese Verfahren sollen in Zusammenarbeit mit Partnern in Pilotanlagen demonstriert und optimiert werden. Des Weiteren wurde im Projekt Leuna 100 die weltweit erste Pilotanlage zur Herstellung von grünem Methanol eingeweiht⁹⁰.

Im ProMet Projekt wurde versucht, CO₂ zu Propen via eMethanol für die Herstellung von Grundchemikalien zu nutzen. Das Projekt wurde von COVESTRO koordiniert⁹¹.

Kunststoffe

Mit der „Dream“-Projektserie DreamReaction, DreamProduction und Dream Polymers hat COVESTRO im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Technologien für Nachhaltigkeit und Klimaschutz – Chemische Prozesse und stoffliche Nutzung von CO₂“ den Grundstein für die Herstellung von CO₂-basierten Kunststoffen in Deutschland gesetzt. Mit eigenen Mitteln hat COVESTRO 2016 eine Demonstrationsanlage zur Herstellung von CO₂-basiertem Polyol in Dormagen errichtet. Dort wurde das Produkt Cardyon, das aus 20 % CO₂ besteht, hergestellt und für Testzwecke vertrieben. Die Anlage wird inzwischen nicht weiter betrieben. Es ist davon auszugehen, dass wirtschaftliche Gründe dahinterstehen⁹².

Die BASF SE beteiligt sich an zahlreichen Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der CO₂-Nutzung. Dabei entwickelt die BASF Katalysatoren für Reaktionen mit CO₂ als Edukt. Die BASF führt selbst kein eigenes CCU-Verfahren durch, ist aber ein relevanter Partner sein, um Know-how einzubringen. In der Vergangenheit war die BASF u. a. mit der TU München an der BMBF-geförderten Projekt CO₂ als Polymerbaustein beteiligt. Des Weiteren wurde im Projekt DMEexCO₂ die Herstellung von Dimethylether mit Hilfe von CO₂ untersucht, im Projekt FfPag die Methanpyrolyse. Bei den Forschungsarbeiten unterstützte in der Vergangenheit oftmals das BASF-Nahe Katalyselabor CaRLa die Aktivitäten⁹².

85 <https://www.siemens-energy.com/de/de/home/pressemitteilungen/baubeginn-fuer-weltweit-erste-integrierte-kommerzielle-anlage-zur-herstellung-co2.html>

86 <https://www.gtai.de/de/trade/saudi-arabien/branchen/saudi-arabien-beginnt-mit-dekarbonisierung-der-industrie-973686>

87 <https://www.iberdrola.com/about-us/what-we-do/green-hydrogen/green-meiga>

88 <https://bse-methanol.com/>

89 <https://www.chemietechnik.de/markt/basf-und-bse-engineering-forschen-an-co2-zu-methanol.html>

90 <https://www.igb.fraunhofer.de/de/ueber-uns/fokusthemen/co2-als-rohstoff-fuer-eine-nachhaltige-chemie.html>

91 <https://co2-utilization.net/de/projekte/elektro-und-photokatalyse/promet/>

92 https://dechema.de/dechema_media/Bilder/Publikationen/CO2_Buch_Online.pdf



Biotechnologische Ansätze

Im Rahmen der BMBWF-Fördermaßnahme CO₂-WIN wurden Projekte mit biotechnologischen Ansätzen zur CO₂-Nutzung gefördert. Das Projekt BIO-UGS⁹³ führte eine Bewertung von Porenuntergrundspeichern für die gezielte biologische Umwandlung von CO₂ und Wasserstoff zu Methan durch. Geleitet wurde das Projekt von der DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH. In GAMES⁹⁴ wurde die mikrobielle Elektrosynthesen aus CO₂, basierend auf Gasdiffusionselektroden und auf Formiat als zentraler Zwischenstufe, erprobt. Dafür wurden u.a. innovative Gasdiffusionselektroden und Elektrolyse-zellen hergestellt und Formiat-basierte Prozesse erweitert. Das TRANSFORMATE-Konsortium⁹⁵ untersuchte die Kombi-Prozess-entwicklung zur Herstellung des Biopolymers PHB und der Crotonsäure. Dabei wird CO₂ in einem ersten Schritt durch elektrochemische Konversion zu Ameisensäure reduziert. Im zweiten Schritt wird die Ameisensäure in einen Bioreaktor eingespeist, wo Ameisensäure-verstoffwechselnde (sogenannte formatotrophe) Mikroorganismen die Ameisensäure hoch selektiv in Biokunststoffe umwandeln.

Künstliche Photosynthese

Die Künstliche Photosynthese war auch Teil des CO₂-WIN-Programms. Im Projekt Prodigy⁹⁷ wurde am LIKAT die Prozessentwicklung für die Gas- und Feststoffphotokatalyse für die Reduktion von CO₂ untersucht. Der Projektansatz zählt zur sogenannten Künstlichen Photosynthese. Dabei sollen mit Sonnenlicht als einzige Energiequelle, CO₂ und Wasser höherwertige Kohlenwasserstoffe hergestellt werden. Im Projekt PhasKat⁹⁷ „Phasenreine kohlenwasserstoffselektive Elektrokatalysatoren und Anpassung der Betriebsbedingungen der elektrochemischen CO₂-Reduktion“ wurden unter der Leitung von Siemens Energy Designregeln für Elektrolysatoren, die den Kohlenstoff aus CO₂ mit Hilfe grüner regenerativer Energie wieder in den wirtschaftlich industriellen Kreislauf zurückführen. Zielprodukte waren Bausteine mit zwei gekoppelten Kohlenstoffatomen wie Ethylen oder Ethanol, die nachhaltig eine Rohstoffbasis für die chemische Industrie oder die Herstellung von Treibstoffen mit einem jährlichen Volumen von mehreren hundert Millionen Tonnen bilden. CO₂SimO⁹⁸ zielte darauf ab, mit Solarenergie CO₂ in den Energieträger Methan umzuwandeln. Dabei sollte zugleich das Bleich- und Desinfektionsmittel Wasserstoffperoxid hergestellt werden. Koordiniert wurde das Projekt durch die TANIÖBIS GmbH.

Das Projekt Depecor ist im Bereich der Künstlichen Photosynthese zu verorten. Ziel des Projekts war es, die direkte photoelektrokatalytische CO₂-Reduktion zu untersuchen. Langfristig wird an der TU Ilmenau, die die Koordination übernahm, an der Vision gearbeitet, ein künstliches Blatt zu entwickeln, das als Multi-Absorber-Demonstrator das Potenzial hat, CO₂ in Kohlenwasserstoffe umzuwandeln. Das Projekt ist in der Grundlagenforschung zu verorten.

CO₂-Mineralisierung

Die Heidelberg Materials AG arbeitet im C₂inCO₂⁹⁹ Projekt daran, Calcium Carbonatisierung zur industriellen Nutzung von CO₂ umzusetzen. In rezyklierten Altbeton CO₂ einzubinden und wieder als Baustoff zu verwenden, bietet ein hohes Potenzial, um CO₂-Emissionen zu senken. Im Rahmen des Projekts wurde eine Pilotanlage erfolgreich getestet.

Das Projekts K₄ soll einen Beitrag dazu leisten, die Zielsetzung der deutschen Zementindustrie bis 2050 CO₂-neutralen Beton herzustellen. Unter der Leitung von Heidelberg Materials zielt K₄ darauf ab, Kalkstein bei der Klinkerherstellung zu ersetzen und CO₂ durch Carbonatisierungshärtung in Betonsteinprodukten einzubinden.

Das Projekt CO₂-LiPriSek¹⁰⁰ hatte das Ziel, ein wirtschaftliches Verfahren zur Gewinnung von vermarktungsfähigem Lithium aus lithiumhaltigen Erzen und Industrieabfällen zu entwickeln und zu bewerten. Mittels direkter Carbonatisierung sollten verschiedene Rohstoffe (z. B. lithiumhaltige Erze, Akkumulatorenrückstände) in Lithiumcarbonat mit battery grade-Qualität (bg-Li₂CO₃ >99,5 %) überführt werden. Koordiniert wurde das Projekt von der TU Bergakademie Freiberg.

NuKoS¹⁰¹ - Nutzung von Kohlenwasserstoffdioxid in Schlacken aus Stahl- und Metallproduktion - nutzte CO₂-haltige Rohgase in Schlacken aus der Stahl- und Metallproduktion, die bisher noch keiner hochwertigen stofflichen Verwertung zugeführt wurden. Somit sollte zum einen CO₂ verwertet und zum anderen die Menge an zu deponierenden Stoffen drastisch reduziert werden. Die

93 [https://CO₂-utilization.net/de/projekte/CO₂-als-baustein-fuer-chemische-grundstoffe/bio-ugs/](https://CO2-utilization.net/de/projekte/CO2-als-baustein-fuer-chemische-grundstoffe/bio-ugs/)

94 [https://CO₂-utilization.net/de/projekte/CO₂-als-baustein-fuer-chemische-grundstoffe/games/](https://CO2-utilization.net/de/projekte/CO2-als-baustein-fuer-chemische-grundstoffe/games/)

95 [https://CO₂-utilization.net/de/projekte/CO₂-als-baustein-fuer-chemische-grundstoffe/transformate/](https://CO2-utilization.net/de/projekte/CO2-als-baustein-fuer-chemische-grundstoffe/transformate/)

96 [https://CO₂-utilization.net/de/projekte/elektro-und-photokatalyse/prodigy/](https://CO2-utilization.net/de/projekte/elektro-und-photokatalyse/prodigy/)

97 [https://CO₂-utilization.net/de/projekte/elektro-und-photokatalyse/phaskat/](https://CO2-utilization.net/de/projekte/elektro-und-photokatalyse/phaskat/)

98 [https://CO₂-utilization.net/de/projekte/elektro-und-photokatalyse/CO₂simo/](https://CO2-utilization.net/de/projekte/elektro-und-photokatalyse/CO2simo/)

99 [https://CO₂-utilization.net/de/projekte/CO₂-mineralisation/c2inCO₂/](https://CO2-utilization.net/de/projekte/CO2-mineralisation/c2inCO2/)

100 [https://CO₂-utilization.net/de/projekte/CO₂-mineralisation/CO₂-lipriSek/](https://CO2-utilization.net/de/projekte/CO2-mineralisation/CO2-lipriSek/)

102 [https://CO₂-utilization.net/de/projekte/CO₂-mineralisation/nukos/](https://CO2-utilization.net/de/projekte/CO2-mineralisation/nukos/)



erzeugten Produkte sollen als hochwertige Sekundärrohstoffe (z. B. Karbonate) in unterschiedlichen Industriezweigen eingesetzt werden.

Weitere CCU-Projekte

Im Projekt GlasCO₂ wird eine Machbarkeitsstudie inklusive einer techno-ökonomischen Bewertung zu geschlossenen CO₂-Kreisläufen bei der Glasherstellung durchgeführt. In der Simulation werden die CO₂-Emissionen des Schmelzprozesses aus Gemengebestandteilen und aus der Verbrennung abgeschieden und mit grünem Wasserstoff wieder zu neuen Brennstoffen umgewandelt¹⁰².

Mit einer jährlichen Produktionsmenge von 150 Mt/a ist Ethylen (Ethen) ein bedeutender Ausgangsstoff für chemische Produkte. Bisher wurde Ethylen fast ausschließlich aus fossilen Ressourcen hergestellt. Ausgehend von nachhaltigen industriellen und biologischen Kohlenstoffquellen soll nun ein nachhaltiger und klimaschonender Technologiepfad für die Herstellung von Ethylen mit Hilfe von CO₂ entwickelt werden. In einem neuen Ansatz soll Ethylen direkt aus Synthesegas erhalten werden. Dazu werden im Rahmen von Syngas2Ethen Katalysatorkonzepte weiterentwickelt und ein neues Prozessfenster für das Produktionsverfahren identifiziert¹⁰³.

LanzaJet und LanzaTech sind zwei unabhängige Unternehmen, die zusammenarbeiten, um neue CCU-Technologien auf den Markt zu bringen. LanzaTech gibt an, Kohlenstoff- und Abfallbestände zur Umwandlung zu SAFs zu nutzen. LanzaTech ist für ihren biotechnologischen Prozess bekannt, bei dem CO₂ genutzt wird, um Ethanol herzustellen. Das Unternehmen ist Kooperation mit unterschiedlichen Konsumerproduktherstellern eingegangen. Einige CO₂-basierten Produkte sind bereits am Markt erhältlich^{104, 105}.

Fazit

Technologisch sind unter anderen die Prozesse zur Herstellung von CO₂-basierten Synthesegas und Methanol realisierbar. Da großen Mengen an erneuerbar erzeugtem Wasserstoff benötigt wird, der vor dem Hintergrund des hohen Strombedarfs und den einhergehenden Stromkosten teuer ist, werden die Prozesse aktuell nicht ausgerollt. Aktuell ist die Menge an benötigtem Wasserstoff auch nicht vorhanden. Dennoch ist es wichtig, dass Demonstrationsanlage, die nicht wirtschaftlich betrieben werden können, schon heute gefördert und umgesetzt werden. Langzeittests in industriellen Maßstab sind essenziell, um bereits heute Erkenntnisse zu gewinnen, die dazu dienen, zum Zeitpunkt einer wirtschaftlichen Betreibung von Anlagen voll einsatzbereit zu sein. So kann auch die wirtschaftliche Integration von CCU-Technologien in bestehende Geschäftsmodelle, wobei Europäische Unternehmen eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung neuer Geschäftsstrategien spielen sollen, welche CO₂-Reduktion mit wirtschaftlicher Rentabilität verbinden, ein weiteres wichtiges Thema sein.

Hohes Umsetzungspotenzial besteht bei CCU-Prozesse zur Herstellung von Feinchemikalien. Durch hohe Verkaufspreise solcher Produkte, spielen die Entstehungskosten eine im Vergleich zu Grundchemikalien kleinere Rolle. Um von CO₂ und Edukten direkt zu Feinchemikalien zu gelangen ist weitere Grundlagen- und Katalysatorforschung wichtig.

Ein weiterer zentraler Aspekt der Förderung von CCU-Technologien ist die gezielte Unterstützung von Forschungs- und Innovationsprojekten für die Verbesserung von CO₂-Abscheidetechnologien. Speziell die Verbesserung von DAC könnte eine stärkere Bedeutung von CCU erzeugen.

¹⁰² https://reinvent-klimpro.de/KLIMPRO_Projekte/Glas_CO2-p-34.html

¹⁰³ https://reinvent-klimpro.de/KLIMPRO_Projekte/SynGas2Ethen.html

¹⁰⁴ <https://www.lanzajet.com/>

¹⁰⁵ <https://lanzatech.com/>



Anhang IV Ableitung des Rohstoffbedarfs an Kohlenstoff für die Herstellung von petrochemischen Grundchemikalien der deutschen chemischen Industrie

Der VCI berichtet jährlich über den Rohstoffeinsatz kohlenstoffhaltiger Einsatzstoffe. Daraus kann unter Annahme von durchschnittlichen Kohlenstoffgehalten der Rohstoffe der Einsatz an Kohlenstoff abgeleitet werden.^{106, 107}

Tabelle 8: Ableitung des Kohlenstoffgehalts aus dem Einsatz kohlenstoffhaltiger Einsatzstoffe in der deutschen chemischen Industrie.^{108, 109, 110}

| Eingesetzter Rohstoff | Menge in Mt in 2023 | Umrechnungsfaktor für den Kohlenstoffgehalt | Menge C in Mt 2023 | Anmerkungen | Nr. |
|---|---------------------|---|--------------------|--|------------|
| Mineralölprodukte | 10,6 | 12/14 | 9,06 | Mineralöl als „-CH ₂ -“ berechnet | 1 |
| Erdgas | 1,8 | 12/16 | 1,35 | Erdgas als CH ₄ berechnet | 2 |
| Davon für Ammoniak | 0,7 | 12/16 | 0,55 | Produktionsmenge 1,72 Mt NH ₃ , 21 GJ/t NH ₃ und Emissionsfaktor 0,0564 tCO ₂ /GJ | 2a |
| Davon für Harnstoff | 0,1 | 12*(44/62) | 0,36 | Harnstoff (NH ₂) ₂ CO | 2b |
| Kohle | 0,2 | 1 | 0,2 | Anthrazitkohle, für die Herstellung von Soda | 3 |
| Nachwachsende Rohstoffe | 2,0 | 0,5 | 1,0 | Einsatz ausschließlich als Rohstoff für Spezialchemikalien | 4 |
| Summe | 14,6 | | 11,61 | | =1+2+3+4 |
| Summe fossiler Einsatz in der Petrochemie | 11,8 | | 10,22 | | =1+2-2a+2b |

106 Daten und Fakten zu Energie, Rohstoffe und Preise, VCI, Frankfurt Stand Oktober 2025

107 Verband der Chemischen Industrie. 2025. 'Daten Und Fakten Zu Energie, Rohstoffe Und Preisen'. <https://www.vci.de/die-branche/zahlen-berichte/vci-statistik-grafiken-energie-klima-rohstoffe-chemie.jsp> (October 20, 2025).

108 International Fertilizer Association (IFA). 2024. 'Urea Statistics by Country 2023'.

109 UBA. 2025. 'Liste Mit Emissionsfaktoren Für Die Treibhausgasbilanzierung von Organisationen'. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2378/dokumente/uba_liste_ef_fuer_thg_bilanzierung_v1.o.xlsx (October 20, 2025).

110 Daten und Fakten zu Energie, Rohstoffe und Preise, VCI, Frankfurt Stand Oktober 2025



Der Einsatz der Mineralölprodukte wird dominiert von Naphtha und LPG, aber es kommen noch weitere Fraktionen und Rückläufe zum Einsatz. Erdgas wird stofflich zur Herstellung von Ammoniak, Methanol und weiteren Produkten eingesetzt. Im Falle des Ammoniak wird Erdgas zur Erzeugung von Wasserstoff über die Dampfreformierung oder Partialoxidation eingesetzt. Der Kohlenstoff wird als CO_2 abgetrennt. Im Falle der Harnstoffherstellung wird das abgetrennte CO_2 wieder stofflich in den Harnstoff eingetragen. Sonst wird das CO_2 anderen Nutzungen zugeführt oder in die Atmosphäre entlassen. Der Eintrag des fossilen Kohlenstoffs in die Herstellung petrochemischer Grundchemikalien (d.h. ohne die nachwachsenden Rohstoffe, die für Spezialchemikalien verwendet werden, ohne den Eintrag für Kohle, der für die Sodaherstellung genutzt wird und unter Berücksichtigung jenes Anteils an Erdgas, der den Kohlenstoff einträgt, der zur Herstellung des Harnstoffs benötigt wird, ergibt sich ein Kohlenstoffeintrag von 10,22 Mt Kohlenstoff im Jahr 2023 (4. Spalte von links der Tabelle 8). Unter Berücksichtigung der Ungenauigkeiten also ein Eintrag von rund 10 Mt C. Diese Menge Kohlenstoff wird in der vorliegenden Studie für die weiteren Ausführungen und Berechnungen verwendet.



DECHEMA Gesellschaft für Chemische
Technik und Biotechnologie e.V.
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main

Telefon (069) 75 64-0
info@dechema.de
www.dechema.de