

Teil I

**Veränderungen der Anforderungen an die Chemieindustrie,
Parameter für Nachhaltigkeit und Zirkularität und Ideales
Zielbild chemischer Unternehmen**



1

Kohlenstoffkreisläufe für eine nachhaltige und zirkuläre Chemieindustrie

Dr. Jörg Rothermel

Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI)

Abstract

Die Chemie ist die Industrie, die am stärksten vom Element Kohlenstoff abhängt. Kohlenstoff spielt sowohl bei der Energiebereitstellung für die Produktionsprozesse als auch in den Produkten eine entscheidende Rolle. Darum kommt der chemischen Industrie eine besondere Rolle auf ihrem Weg zur Treibhausgasneutralität bis 2045 zu. In der Energieversorgung kann Treibhausgasneutralität durch konsequente Dekarbonisierung der Energieträger, d. h. durch Einsatz erneuerbarer Energien für die Strom- und Prozesswärmeversorgung, gelingen. Eine Dekarbonisierung der organischen Produkte, die auf Kohlenstoff aufbauen, ist nicht möglich. Hier ist nur eine Defossilisierung der Rohstoffe möglich, die wiederum nur durch eine vollständige Kreislaufführung des Kohlenstoffes im weitesten Sinne erreicht werden kann.

1.1 Einführung

Die chemische Industrie sieht sich mit zwei zentralen Herausforderungen bei der Transformation zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise konfrontiert. Zum einen muss sie sowohl in ihrer Produktion als auch mit ihren Produkten bis Ende des nächsten Jahrzehnts treibhausgasneutral werden. Die andere Herausforderung besteht in der weltweit wachsenden Menge an Kunststoffen, die hinsichtlich der Menge die größte Produktegruppe der chemischen Industrie ausmacht. Hier gilt es einen Weg zu finden, Kunststoffe so zu managen, dass sie nicht als Plastikmüll in Flüssen und Meeren enden und dort Umweltschäden verursachen.

Die Lösung für beide Herausforderungen ist eine vollständige Kreislaufführung des eingesetzten Kohlenstoffes als wichtigstem Element in der Chemie. Historisch wurde eine Kreislaufführung vor allem angestrebt, um Ressourcen zu schonen. Dieses Ziel war insbesondere wichtig in der Chemie, weil ihre Produktion und

Produkte auf endlichen kohlenstoffhaltigen Ressourcen (Erdöl, Erdgas) beruhen. Gegenwärtig ist das Argument des Ressourcenschutzes in den Hintergrund getreten, da vor dem Hintergrund des Ausstiegs aus der fossilen Energieerzeugung die vorhandenen Ressourcen für die stoffliche Nutzung in der Chemie noch sehr lange ausreichen würden.

Heute hat die Kreislaufführung vor allem zwei Zielrichtungen: Zum einen muss verhindert werden, dass Kunststoffe in die Umwelt gelangen, und die bereits ausgetragenen Kunststoffe müssen zurückgeholt und verwertet werden. Ein weiteres Anwachsen der Plastikberge in Flüssen und Meeren gilt es zu abzuwenden und schon vorhandene Müllberge müssen abgebaut werden, bevor durch Verwitterung und Abrieb noch mehr Mikroplastik entsteht und in die Umwelt und Nahrungsketten gerät.

Eine zweite zentrale Zielrichtung der Kreislaufführung ist der Klimaschutz. Die Chemie ist die einzige Industrie, die Kohlenstoff in ihre (organischen) Produkte einbaut. Dieser Kohlenstoff wiederum wird heute zum größten Teil noch am Ende des Produktlebens als (fossiles) CO₂ in die Atmosphäre entlassen und trägt damit zum Klimawandel bei. Die Herausforderung für die chemische Industrie besteht nun darin, den eingesetzten Kohlenstoff zurückzuholen und in einem ständigen Kreislauf zu halten, um zu verhindern, dass die Umwelt mit Kunststoffabfällen und die Atmosphäre mit fossilem CO₂ weiter belastet werden.

1.2 Kohlenstoff und CO₂-Emissionen in der Chemie

Kohlenstoff und seine Umwandlung in das Treibhausgas CO₂ nimmt in der Wertschöpfungskette der chemischen Industrie eine zentrale Rolle ein. Abbildung 1.1 gibt einen Überblick über die Chemiewertschöpfungskette und die Kettenglieder, bei denen Kohlenstoff über Roh- und Brennstoffe in die Wertschöpfungskette eingebracht wird und daraus CO₂-Emissionen entstehen.

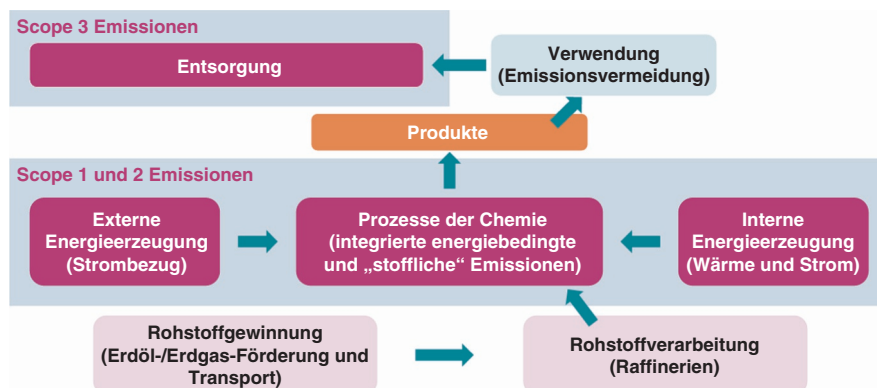


Abb. 1.1 CO₂-Emissionen in der Chemie-Wertschöpfungskette (Quelle: eigene Darstellung).

Nach aktuellen Zahlen des Verbandes der Chemischen Industrie [1, VCI, Energiestatistik, Feb. 2024] werden immer noch rund 85 Prozent des Rohstoffbedarfs in der organischen Chemie durch Erdöl und Erdgas gedeckt. Ebenso stammt der größere Teil der Energie für die Produktion aus fossilen (kohlenstoffhaltigen) Energieträgern. Bereits bei der Rohstoff- und Brennstoffgewinnung aus Erdöl- und Erdgasfeldern und vor allem auch bei der Aufbereitung (Raffination) des Erdöls entstehen erhebliche Mengen an Kohlendioxid. Deren Reduktion kann die Chemie selbst nur dadurch beeinflussen, indem sie deutlich weniger oder keine fossilen Roh- und Brennstoffe mehr einsetzt.

Ca. die Hälfte (2020 ca. 56 Mio. Tonnen, [2, VCI/VDI, Chemistry4Climate, Abschlussbericht 2023]) der direkt von der Chemie zu verantwortenden CO₂-Emissionen entstehen in der Produktion selbst: Chemieprozesse haben einen erheblichen Energiebedarf, dabei sind vor allem Prozesse zur Herstellung von Basischemikalien besonders energieintensiv. Diese Energie in Form von Prozesswärme und Strom wird entweder in eigenen Anlagen, vor allem in erdgasbefeuerten Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, selbst bereitgestellt oder der Strom wird aus dem Netz bezogen. Zudem entstehen in einigen Prozessen aus den kohlenstoffhaltigen Rohstoffen auch sogenannte Prozessemissionen.

Die Reduktion der energiebedingten CO₂-Emissionen gelang in der Vergangenheit vor allem durch erhebliche Effizienzsteigerungen in der Energiebereitstellung, z. B. indem die Primärenergieträger Kohle und Braunkohle durch Erdgas ersetzt wurden, aber auch durch Prozessoptimierungen. Die künftige weitere Reduktion bis zur Treibhausgasneutralität wird aber nur durch konsequente Dekarbonisierung der eingesetzten Energie gelingen. Hier bedarf es eines kontinuierlich steigenden Einsatzes an treibhausgasneutralen erneuerbaren Energien z. B. durch Einsatz erneuerbaren Stroms in Wärmepumpen für die Prozesswärmebereitstellung oder auch in direkt elektrisch „befeuerten“ Anlagen. Für die Wärmebereitstellung vor allem in Hochtemperaturprozessen ist auch die Nutzung von treibhausgasneutralem Wasserstoff möglich. Die Prozessemissionen können jedoch aus grundsätzlichen Gründen nicht durch Dekarbonisierung vermindert oder ganz vermieden werden: Da die chemische Wertschöpfungskette auch weiterhin auf Kohlenstoff als Grundelement und damit auf kohlenstoffhaltige Rohstoffe angewiesen ist, entstehen bei chemischen Prozessen diese Emissionen. Treibhausgasneutralität lässt sich hier nur durch Maßnahmen erreichen, die auch bei der Entsorgung der kohlenstoffhaltigen Produkte entscheidend sind.

Bei der Entsorgung der kohlenstoffhaltigen Produkte entsteht die andere Hälfte der von der Chemie zu verantwortenden CO₂-Emissionen (2020 ca. 57 Mio. Tonnen [2, VCI/VDI, Chemistry4Climate, Abschlussbericht 2023]). Allein in den für die Produktion eingesetzten Rohstoffen (ohne Brennstoffe) sind nach Berechnungen des Verbandes der Chemischen Industrie bis zu 16 Mio. Tonnen Kohlenstoff enthalten. Am Produktlebensende wird dieser in den Produkten erhaltene Kohlenstoff entweder durch biologische und chemische Zersetzung in Kläranlagen oder in der Natur („kalte Verbrennung“) oder durch normale Verbrennung in Müllverbrennungsanlagen als CO₂ freigesetzt.

Der kalten Verbrennung unterliegen vor allem Chemieprodukte wie Wasch- und Reinigungsmittel, Kosmetika, Arzneimittel, und sonstige Produkte, die in der Regel nicht zurückgeholt werden können. Diese Produkte machen ungefähr ein Drittel des Masseoutputs der chemischen Industrie aus. Der normalen Verbrennung unterliegen vor allem die Kunststoffe und Polymere (in Lacken, Farben und Klebstoffen). Diese Produkte lassen sich in der Regel gut einsammeln und einer geregelten Entsorgung (hier durch Verbrennung) zuführen. Kunststoffe bilden etwa zwei Drittel des Masseoutputs der chemischen Industrie.

Im Rahmen der allgemeinen Bemühungen zur Erreichung der Klimaneutralität in allen Bereichen wächst auch das Kundenbewusstsein für kohlenstoffhaltige Chemieprodukte. Kunden erwarten zunehmend Produkte mit geringerem CO₂-Footprint bzw. treibhausgasneutrale Produkte. Das setzt die chemische Produktion unter Druck, neben der Dekarbonisierung des Energiebedarfs auch das inhärente Problem des fossilen Kohlenstoffs in den Produkten zu lösen. Da die Chemie aber weiterhin auf Kohlenstoff als zentrales Element angewiesen ist, kann dieses Problem nicht durch Dekarbonisierung, sondern nur durch eine Defossilisierung der Rohstoffbasis gelingen.

1.3 Kohlenstoffkreislaufführung in der Chemie

Eine umfassende Defossilisierung der Rohstoffbasis kann nur dadurch funktionieren, wenn der für die Produkte erforderliche Kohlenstoff kontinuierlich im Kreis geführt wird und künftig nicht mehr als zusätzliches fossiles CO₂ zum Anstieg der CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre und damit zur Erwärmung beiträgt. Dabei ist zu beachten, dass Kreislaufwirtschaft im Zusammenhang mit Kohlenstoff in einem sehr breiten Sinne verstanden werden und deutlich über das heutige allgemeine Verständnis der Kreislaufwirtschaft hinausgehen muss.

1.3.1 Potenzielle Kohlenstoffkreisläufe

In Abbildung 1.2 sind die möglichen und erforderlichen Kohlenstoffkreisläufe im Überblick dargestellt. Die größte Herausforderung für die Kohlenstoffkreislaufwirtschaft ist das Schließen des Kohlenstoffkreislaufes auch für die Chemieprodukte, die nicht mehr eingesammelt und zurückgeholt werden können und sich bestimmungsgemäß in Kläranlagen oder der Natur biologisch und chemisch zersetzen. Die Herausforderung besteht darin, auch für das dabei entstehende CO₂, das gegenwärtig immer noch in die Atmosphäre freigesetzt wird, Kreislaufwege zu finden.

Eine effiziente Kreislaufführung setzt bereits bei der Produktion und beim Produktdesign selbst an. Durch eine effiziente Ressourcenverwendung bei der Produktion und einer intelligenten Produktgestaltung kann der Kohlenstoffeinsatz bereits am Anfang der Wertschöpfungskette minimiert werden. Der Kohlenstoff, der am

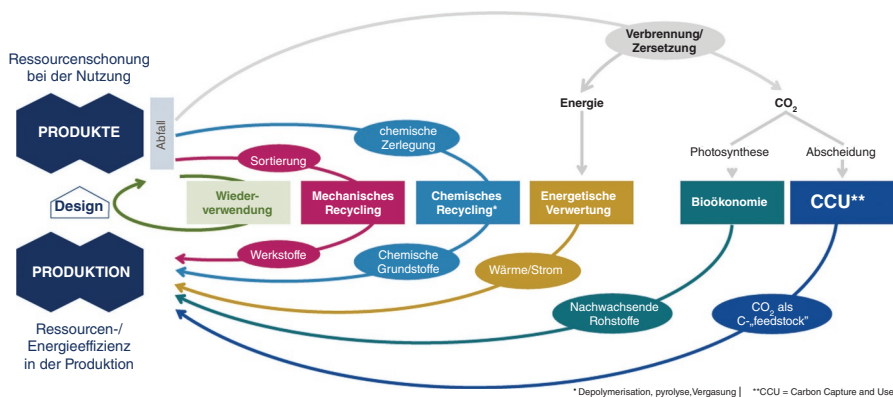


Abb. 1.2 Kohlenstoffkreisläufe in der Chemie (Quelle: eigene Darstellung).

Anfang eingespart und gar nicht erst in die Wertschöpfungskette eingebracht wird, muss später auch nicht in aufwändigen Kreislaufprozessen wiedergewonnen werden. So tragen z. B. immer intelligentere leichtgewichtige Kunststoffmaterialien als Leichtbaumaterialien nicht nur zur Treibhausgasreduktion in der Anwendung bei, sondern reduzieren auch den Bedarf an Kohlenstoff und damit auch die Notwendigkeit der Kreislaufführung in der eigenen Wertschöpfungskette.

Selbstverständlich ist eine möglichst lange häufige Wiederverwendung von Produkten im Hinblick auf den Ressourcen- und Energieeinsatz der effizienteste Weg der Kreislaufführung. Hierfür steigen dann aber auch die Ansprüche an die Langlebigkeit insbesondere der Kunststoffprodukte. Eine solche Langlebigkeit und Beständigkeit kann jedoch wiederum zu einem Problem werden, wenn die Produkte nicht wiederverwendet bzw. nicht ordnungsgemäß (z. B. durch Verbrennung) entsorgt werden, sondern unsachgemäß in der Natur landen und sich dort ansammeln. Jede Optimierung der Produktbeständigkeit für eine eventuelle Wiederverwendung muss zwingend mit einem funktionierenden Entsorgungssystem verknüpft werden, und das weltweit.

Auch jedes wiederverwendete Produkt hat ein Lebensende und wird irgendwann zwangsläufig zu Abfall, der einem Kreislaufsystem zugeführt werden muss. Dabei ist das einfachste System das Einsammeln der Kunststoffprodukte und deren Zuführung zu einem klassischen Recycling. Hierbei ist zwischen einem mechanischen Recycling und einem chemischen Recycling zu unterscheiden. Beim mechanischen Recycling werden in der Regel sortenreine Produktfraktionen mit rein physikalischen Methoden behandelt, bei denen die Polymerstruktur der Kunststoffe nicht verändert wird und der Kunststoff als Material erhalten bleibt. Das chemische Recycling hat zum Ziel, nicht das Kunststoffmaterial als solches zu erhalten, sondern die Grundbaustoffe des Materials (Kohlenstoff bzw. Kohlenwasserstoffe) für eine neue Chemieproduktion zurückzugewinnen.

Der derzeit noch für den Großteil des kohlenstoffhaltigen Abfalls angewendete Entsorgungsweg ist die Verbrennung, die zumindest zum Teil eine Kreislaufführung

darstellt. Dabei wird aber nur der Energiegehalt der Produkte „zurückgewonnen“ und als Prozesswärme bzw. Strom der Produktion wieder zugeführt. Verloren geht dabei jedoch der Kohlenstoff, der als Kohlendioxid in die Atmosphäre freigesetzt wird. Eine solche Freisetzung geschieht auch bei der sog. „kalten Verbrennung“ der Produkte, wenn diese sich in Kläranlagen, auf Deponien oder in der Natur biologisch oder chemisch zersetzen. Auch hier geht die eigentliche Masse in Form von Kohlendioxid in die Atmosphäre verloren, allerdings ohne, dass der Energiegehalt in irgendeiner Weise genutzt wird.

Auch der über Verbrennung oder Zersetzung freigesetzte Kohlenstoff muss einem Kreislauf zugeführt werden. Die Lösung dieses Problems liegt in der Verwendung dieses Kohlendioxids selbst als Kohlenstoffquelle. Hierfür muss das Kohlendioxid wieder aus der Atmosphäre eingesammelt werden. Dieses „Einsammeln“ kann einerseits auf höchst energieeffizientem Wege der Pflanzenwelt in der Natur überlassen werden, die permanent der Atmosphäre CO_2 entnimmt und daraus Biomasse aufbaut. Setzt jetzt die chemische Industrie Biomasse bzw. die sog. nachwachsenden Rohstoffe als Rohstoff ein, „recycelt“ sie in gewissem Maße den Kohlenstoff, der zuvor aus ihren Produkten freigesetzt worden ist. Im Rahmen der Bioökonomie setzt die chemische Industrie in Deutschland heute bereits rund 2,5 Mio. Tonnen nachwachsende Rohstoffe ein, was in etwa 15 Prozent des Rohstoffbedarfs abdeckt [1, VCI, Energiestatistik, Feb. 2024].

Eine alternative Möglichkeit der CO_2 -Nutzung ist die direkte chemische Nutzung von CO_2 in sogenannten Carbon-Capture-and-Utilization-Prozessen (CCU). Dafür muss CO_2 mit hohem Energieaufwand entweder direkt aus der Atmosphäre (Direct Air Capture, DAC) oder aus anderen, in die Atmosphäre emittierenden Quellen abgeschieden werden. Auch das geschieht heute bereits, wenn auch in geringerem Maße in Prozessen wie der Harnstoffproduktion. Dort wird CO_2 als Rohstoff eingesetzt, das zuvor als Prozessemission in der Ammoniak-Produktion entstanden ist und dort durch Abscheidung aus dem Abgas gewonnen wurde.

1.3.2 Klassisches Recycling

Kunststoffe und andere polymere Materialien bilden etwa zwei Drittel des Produktoutputs der chemischen Industrie in Deutschland. Diese Materialien sind aufgrund ihrer Beständigkeit und ihrer Anwendungsgebiete grundsätzlich einsammelbar und können einer Wiederverwendung oder einem Recycling zugeführt werden. Gemäß der Conversio-Studie zum Stoffstrombild für Kunststoffe für das Jahr 2021 [3 Lindner et al., Conversio-Studie 2021] sind rund 6,3 Mio. Tonnen (Post Consumer)-Kunststoffabfälle und Nebenprodukte aus den Herstellungs- und Verarbeitungsprozessen für Kunststoffe entstanden, die zu über 99 Prozent auch verwertet worden sind. Dabei geht immer noch der deutlich größere Anteil (rund 65 Prozent) in die energetische Verwertung (Verbrennung) und nur rund 35 Prozent in die stoffliche Verwertung mittels klassischem Recycling (im Wesentlichen mechanisches Recycling) im In- und Ausland.

Das klassische Recycling in der Chemie ist im Wesentlichen nur für die Kunststoffprodukte relevant. Dabei dient das zurückgeführte Kunststoffmaterial als Rohstoff für die Produktion von neuen Kunststoff- oder anderen Chemieprodukten. Das Recycling kann mit rein physikalischen Methoden (mechanisches Recycling) unter Erhalt der Materialeigenschaften oder mit chemischen Methoden (chemisches Recycling) unter chemischer Zersetzung des Materials in Monomere oder chemische Grundbausteine erfolgen. Gelegentlich wird, mehr von den Endprodukten des Recyclingprozesses kommend, auch mit den alternativen Begriffen „Werkstoffliches Recycling“ (anstelle von mechanischem Recycling) und „Rohstoffliches Recycling“ (anstelle von chemischem Recycling) gearbeitet [4 UBA, Chemisches Recycling, Hintergrund 2020]. Damit soll verdeutlicht werden, dass im mechanischen/werkstofflichen Recycling der Werkstoff im Wesentlichen erhalten bleibt, und im chemischen/rohstofflichen Recycling der Werkstoff chemisch wieder in verwertbare Rohstoffe zurückverwandelt wird.

1.3.2.1 Bedeutung des Mechanischen Recyclings

Voraussetzung für ein mechanisches Recycling ist eine größtmögliche Reinheit der zu recycelnden Kunststoffsorten, um entsprechende Qualitäten zu erhalten und ein Downcycling möglichst zu verhindern. Da insbesondere die Postconsumer-Abfälle aber normalerweise gemischt anfallen, muss dem mechanischen Recycling ein aufwendiges Sortier- bzw. Aufbereitungsverfahren vorgeschaltet werden. Diese Aufbereitungsverfahren haben ihre technischen und wirtschaftlichen Grenzen: Der Anteil von mechanisch recyceltem Kunststoff kann sicherlich noch weiterhin erhöht werden, wird aber trotzdem nur einen begrenzten Teil des Recyclings insbesondere der Postconsumer-Abfälle abdecken können. Ansonsten stellt das mechanische Recycling die am wenigsten energieintensive Art des Kunststoffrecyclings dar.

1.3.2.2 Bedeutung des Chemischen Recyclings

Von den heute anfallenden Kunststoffabfallmengen wird auch weiterhin nur ein begrenzter Teil durch ein mechanisches Recycling in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden können. Der größere Rest des Abfalls in Deutschland wird mangels sonstiger Recycling-Möglichkeiten heute noch der energetischen Verwertung zugeführt, um wenigstens den Energiegehalt zu nutzen. Dabei geht allerdings der Kohlenstoff für den Kreislauf verloren. Hier setzen nun die chemischen Recyclingmöglichkeiten (Depolymerisation, Pyrolyse und Vergasung) an, um den Kohlenstoff in Form von Monomeren (für eine erneute Polymerisation), Synthesegas oder eines Pyrolyseöls (Ersatz für bisheriges Naphta aus Erdöl als Feedstock im Cracker) zurückzugewinnen, bevor er nach einer Verbrennung als CO_2 in der Atmosphäre landet. Die Verfahren für das chemische Recycling befinden sich überwiegend noch in der Entwicklung.

Allerdings ist das chemische Recycling insbesondere bei Vergasung und Pyrolyse deutlich energieintensiver als das mechanische Recycling. Das führt in der öffentlichen Diskussion immer wieder zu massiver Kritik. Das chemische Recycling

bietet aber nicht nur die Möglichkeit, die Abfallfraktionen und damit die Kohlenstoffmengen, die ansonsten keinem anderen Recycling zugeführt werden können, stofflich zu verwerten. Es löst auch das insbesondere beim mechanischen Recycling immer wieder auftretende Problem der Akkumulation von unerwünschten Schadstoffen, die bei einer chemischen Umsetzung ausgeschleust bzw. eliminiert werden können.

1.3.2.3 Politische Diskussion der Recyclingverfahren

In der politischen Diskussion hat das chemische Recycling bislang noch keine richtige Anerkennung und damit auch noch keine ausreichende Verankerung in den gesetzlichen Regelungen gefunden. Hauptkritikpunkte sind der hohe notwendige Energieeinsatz für Vergasung und Pyrolyse und die mit diesen Verfahren verbundene vermeintliche „Materialzerstörung“. Beide Kritikpunkte halten aber einer langfristigen Nachhaltigkeitsbetrachtung nicht stand. Der Energieeinsatz als solcher stellt langfristig kein Problem mehr da, wenn dieser wie in allen anderen Prozessen auch mit dekarbonisierter (erneuerbarer) Energie erfolgt. Auch Vergasungs- und Pyrolyseöfen werden aus Gründen der Treibhausgasneutralität auf Basis erneuerbarer Energien betrieben werden müssen. Das Argument der Materialzerstörung ist vor dem Hintergrund der Frage zu diskutieren, was das eigentliche „Material“ ist, das aus Nachhaltigkeitsgründen im Kreislauf geführt werden muss. Und das ist für die chemische Industrie eindeutig der Kohlenstoff und nicht zwingend die daraus hergestellten Produkte selbst.

Eine kontroverse Diskussion über die zukünftige Bedeutung des chemischen Recyclings gab es auch lange Zeit zwischen der chemischen/Kunststoff-Industrie und der Entsorgungsindustrie. Hauptsorge der Entsorgungsindustrie dabei war, dass die chemischen Recyclingverfahren eine massive Konkurrenz für die bereits in der Entsorgungsindustrie etablierten mechanischen Recyclingverfahren darstellen könnten und der ohnehin begrenzte Kunststoffabfall in Deutschland langfristig vollständig von den chemischen Verfahren „aufgesaugt“ werden und nicht mehr länger dem mechanischen Recycling zur Verfügung stehen könnte. Schon aus rein wirtschaftlichen Gründen sieht die chemische und die Kunststoff-Industrie das chemische Recycling ausschließlich als Ergänzung des mechanischen Recyclings und nicht als Ersatz. Es ist schlicht unwirtschaftlich, die Abfallmengen, die mechanisch recycelt werden können, chemisch zu recyceln. Inzwischen haben die chemische und Kunststoff-Industrie und die Entsorgungswirtschaft eine gemeinsame Sichtweise entwickelt, die sie in einem Positionspapier der entsprechenden Wirtschaftsverbände BDE, VCI und Plastics Europe Deutschland festgehalten haben [5 Gemeinsames Leitbild zur Kreislaufwirtschaft, BDE, PED, VCI, 2024].

1.3.3 Kohlenstoff-Recycling über CO₂

Theoretisch könnte der derzeitige Kohlenstoffbedarf von bis zu 16 Mio. Tonnen pro Jahr in der chemischen Produktion ausschließlich durch Zurückholen und

durch klassisches Recycling der produzierten Chemieprodukte gedeckt werden. Dieser theoretischen Betrachtung stehen jedoch die praktischen Entwicklungen entgegen: Wie zuvor schon dargelegt, lässt sich nur ein begrenzter Teil der Chemieprodukte zurückgewinnen und damit einem Recycling zuführen. Ca. ein Drittel der Produkte verbleibt in der Umwelt und setzt den darin enthaltenen Kohlenstoff als CO_2 frei. Des Weiteren werden mehr Chemieprodukte exportiert als importiert, sodass auch hier ein Teil des Kohlenstoffs nicht im deutschen Abfall landet und deshalb nicht zurückgeholt werden kann. Zudem wird ein Teil der Chemieprodukte, vor allem Kunststoffe und Polymere, langfristig verbaut und die Menge, die jährlich aus der Verbauung zurückkommt, deckt nicht den Bedarf, der jährlich in die Verbauung geht. Diese Entwicklungen führen dazu, dass nur ein relativ geringer Teil des Kohlenstoffbedarfs der chemischen Industrie durch klassisches Recycling gedeckt werden kann. Berechnungen im Rahmen des Roadmap- und des Chemistry4Climate-Projektes von VDI und VCI [2, VCI/VDI, Chemistry4Climate, Abschlussbericht 2023 und 6, Dechema/FutureCamp, Roadmap Chemie 2050] sehen im optimistischen Falle unter Ausnutzung der maximalen Abfallmenge in Deutschland eine Abdeckung des Kohlenstoffbedarfs in der Größenordnung von bis zu 15 Prozent. Zur Abdeckung des restlichen Kohlenstoffbedarfs ist eine andere treibhausgasneutrale Kohlenstoffquelle erforderlich. Und diese Quelle kann nur CO_2 in Form von Biomasse oder CO_2 selbst sein.

1.3.3.1 Biomasse als Kohlenstoffquelle

Bevor Kohle, Erdöl und andere fossile Kohlenstoffträger großtechnisch die Rohstoffgrundlage für die chemische Industrie bildeten, dienten Biomasse bzw. daraus extrahierte nachwachsende Rohstoffe als Kohlenstofflieferant für die organische Chemie. Die Nutzung von Biomasse ging auch in der Boomphase der Erdölchemie nie ganz verloren und erlebte insbesondere in der Zeit nach den Ölkrisen in den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts eine gewisse Renaissance. Vor dem Hintergrund einer aus Klimaschutzgründen notwendigen Abkehr von fossilen Kohlenstoffträgern nimmt Biomasse wieder an Bedeutung zu.

Theoretisch ist denkbar, dass der Kohlenstoffbedarf der deutschen Chemie vollständig durch Biomasse gedeckt werden könnte. Erforderlich wären dazu ca. 40 Mio. Tonnen Trockenbiomasse bei einer rein theoretischen, stöchiometrischen Betrachtung und einer 100-prozentigen Ausnutzung des Kohlenstoffgehalts. Praktisch läge der Bedarf sicherlich eher bei dem Doppelten, also bei einer Menge, die aus verschiedenen Gründen nicht zur Verfügung steht. Biomasse ist zwar zunächst als (immer wieder) nachwachsender Rohstoff grundsätzlich unendlich verfügbar. Die tatsächlich absolute Verfügbarkeit ist jedoch limitiert, alleine schon aufgrund der Flächenbegrenztheit für nachhaltige Biomasse. Neben der absoluten Verfügbarkeit ist darüber hinaus auch die spezifische Verfügbarkeit für die einzelnen Anwendungsbereiche aufgrund der enormen Nutzungskonkurrenzen begrenzt. Die Nutzung von Biomasse für Nahrungs- und Futtermittel hat aus Nachhaltigkeitsgründen immer Vorrang vor allen technischen Nutzungsgebieten.

Aber auch zwischen den technischen Nutzungsbereichen existieren erhebliche Konkurrenzen. Biomasse wird sowohl als treibhausgasneutraler Brenn- und Treibstoff wie auch als treibhausgasneutraler Baustoff eingesetzt und kann auch als treibhausgasneutraler Rohstoff und Kohlenstofflieferant in der Chemie eingesetzt werden. Die im Chemistry4Climate-Prozess involvierten Stakeholder fordern deshalb auch eine politisch vorgegebene Nutzungshierarchie für Biomasse [2, VCI/VDI, Chemistry4Climate, Abschlussbericht 2023]: stoffliche Nutzung (in der Chemie) sollte Vorrang haben vor der energetischen Nutzung. Aber auch damit könnte eine Vollabdeckung des Kohlenstoffbedarfs nicht gewährleistet werden. Im Rahmen des Chemistry4Climate-Prozesses wurde als maximale verfügbare Menge ein Wert von knapp 30 Mio. Tonnen nachhaltiger Biomasse berechnet, die immer noch eine erhebliche Lücke bei der Deckung des Kohlenstoffbedarfs der Chemie hinterlässt. Diese Lücke kann schließlich nur über die Nutzung von CO₂ selbst als Kohlenstofflieferant geschlossen werden.

Die Möglichkeiten der Biomassenutzung in der Chemie sind vielfältig. Einerseits kann die bisherige Verwendung von Biomasse vornehmlich zur Herstellung von Fein- und Spezialchemikalien unter Ausnutzung der Syntheseleistungen der Natur noch weiter ausgebaut werden. Insbesondere die Möglichkeiten der industriellen Biotechnologie werden hier weitere Optionen eröffnen. Andererseits wird künftig vor allem unspezifische (Abfall)Biomasse auch stärkere Anwendung in der Basischemie finden müssen. Analog zu den Technologien beim chemischen Recycling wird durch Vergasung und Pyrolyse von Biomasse Synthesegas und Pyrolyseöl als Ausgangsprodukte für die Synthese von Basischemikalien zur Verfügung gestellt werden können.

1.3.3.2 CO₂ als Kohlenstoffquelle

Die chemische Industrie ist in der Lage zumindest einen Teil ihres Treibhausgasemissions-Problems dadurch zu lösen, dass sie eben dieses Treibhausgas als Rohstoff nutzt – also mit einem „CO₂-Recycling“, das den Kohlenstoff-Kreislauf schließt und nicht mehr weiter zur Erhöhung der fossilen CO₂-Konzentration in der Atmosphäre beiträgt. Wie zuvor dargestellt, wird es nicht gelingen, den gegenwärtigen Kohlenstoffbedarf in der chemischen Produktion treibhausgasneutral über Recycling und/oder Biomassenutzung zu decken. Aus diesem Grunde wird auch die Nutzung von CO₂ selbst als Kohlenstoffträger erforderlich sein.

Das eingesetzte CO₂ muss zuvor aus Punktquellen, die bisher noch in die Atmosphäre emittieren, oder aus der Atmosphäre selbst abgeschieden werden. Bei den Punktquellen eignen sich derzeit noch alle Quellen, an denen kein Carbon Capture and Storage (CCS) betrieben wird, um das CO₂ dauerhaft in der Erde zu speichern. Dazu gehören auch Quellen wie die Zement- und Kalkindustrie, deren Verfügbarkeit aber mit zunehmender Anwendung von CCS zurückgehen wird, da das CO₂ aus diesen Quellen auch als fossil einzustufen ist. Treibhausgasneutralität wird mittel- bis langfristig nur durch die Punktquellen der Abfall- oder der Biomasseverbrennung in Verbrennungsanlagen zu gewährleisten sein, weil entweder der Kohlenstoff bei

diesem CO_2 direkt aus den Chemieprodukten stammt (Abfallverbrennung) oder das CO_2 zuvor aus der Atmosphäre entnommen wurde (Biomasseverbrennung). Können diese Punktquellen den künftigen CO_2 -Bedarf der chemischen Industrie nicht mehr abdecken, bleibt nur noch die direkte Entnahme von CO_2 aus der Atmosphäre (Direct Air Capture, DAC). Allerdings ist die Abscheidung aus der Luft aufgrund der äußerst geringen Konzentration von CO_2 von ca. 400 ppm eine äußerst energieintensive Maßnahme und kann aus wirtschaftlichen und Nachhaltigkeitsgründen nur die ultima ratio sein.

Der Rohstoff CO_2 wird dann in sogenannten CCU-Prozessen (Carbon Capture and Utilization) in der Regel mit Wasserstoff zu weiter verarbeitbaren Kohlenwasserstoffderivaten umgesetzt. Zu diesem Zweck stehen im Wesentlichen zwei Technologielinien zur Produktion von Basischemikalien zur Verfügung: die Methanolroute und die Cracker-Route. Für die Methanolroute wird aus CO_2 mit Wasserstoff Methanol (CH_3OH) produziert. Dieses wird anschließend über die MTO-(Methanol to Olefin) bzw. MTA-(Methanol to Aromatics)-Routen zu Basischemikalien (Olefine und Aromate) umgewandelt.

Die Cracker-Route nutzt die bestehende Produktionsstruktur über die Cracker als Grundeinheiten für die Basischemie. Hier wird das CO_2 zunächst mit Wasserstoff in einer Fischer-Tropsch-Synthese zu einem synthetischen Naphta umgesetzt, das dann als Ersatz für das bisherige erdölbasierte Naphta als Feedstock im Cracker eingesetzt wird. Die Crackeroute hat den Vorteil, dass die bisherige Produktionsstruktur und die Anlagen weitgehend erhalten bleiben können und zudem das Pyrolyseöl aus dem chemischen Recycling mitverwendet werden kann.

Wie zuvor beschrieben ist Wasserstoff der zentrale Co-Faktor für die Umsetzung von CO_2 . Zum einen dient er dazu, den Sauerstoff aus dem CO_2 -Molekül zu binden und den Kohlenstoff zu isolieren, und zum anderen ist er erforderlich, um aus dem Kohlenstoff entsprechende Kohlenwasserstoffe zu erzeugen. Der Wasserstoff hat hier also ebenfalls eine (roh)stoffliche und keine energetische Funktion wie in anderen industriellen Anwendungen. Der Bedarf an Wasserstoff hängt von den benötigten Mengen an CO_2 ab, die wiederum davon bestimmt werden, wieviel vom Kohlenstoffbedarf in der Chemieproduktion durch Recycling und Biomasse abgedeckt werden kann.

Auf jeden Fall muss der eingesetzte Wasserstoff ebenfalls treibhausgasneutral erzeugt werden, was langfristig nur über eine Wasserelektrolyse mit erneuerbarem Strom gewährleistet sein wird. Entsprechend steigt mit dem Bedarf an CO_2 als Rohstoff auch der Bedarf an erneuerbarem Strom. In dem im Chemistry4Climate-Prozess berechneten Maximalszenario der CO_2 - und damit der Wasserstoffanwendung liegt der Wasserstoffbedarf der chemischen Industrie bei rund 280 Terrawattstunden (TWh) für ca. 8,5 Mio. Tonnen Wasserstoff und der Bedarf an erneuerbarem Strom bei rund 500 TWh, also ungefähr dem heutigen Gesamtbedarf an Strom in Deutschland. Diese Zahlen machen auch die Notwendigkeit neuer Infrastruktur (Strom- und/oder Wasserstoffnetze) für eine zirkuläre und treibhausgasneutrale chemische Industrie deutlich.

Die neuen zirkulären, insbesondere auf CO₂ basierenden Technologien werden kurzfristig gegenüber den konventionellen Produktionstechnologien auf Basis von fossilen Rohstoffen nicht wettbewerbsfähig sein, da die Produktionskosten deutlich höher liegen. Insofern ist zumindest für eine Anfangsphase eine Förderung dieser Technologien notwendig, z. B. durch das neue Instrument der Klimaschutzverträge. Für CCU-Technologien wäre eine Anerkennung und Gleichstellung mit CCS-Technologien im EU-Emissionshandel ein erster sinnvoller Schritt der Förderung.

1.3.4 Königsweg der Zirkularität in der chemischen Industrie

Nach der Beschreibung der komplexen Möglichkeiten der zirkulären Wirtschaft in der chemischen Industrie stellt sich die Frage, ob es einen Königsweg geben kann. Wie zuvor dargestellt kann vollständige Zirkularität und Treibhausgasneutralität nur durch eine Mischung aller drei Technologierouten (Recycling, Biomasse- und CO₂-Einsatz) erreicht werden. Auf jeden Fall ist anzustreben, den Recycling-Anteil und den Anteil an Biomasseeinsatz soweit wie möglich auszudehnen und damit den trotzdem noch notwendigen, aber äußerst energieintensiven CO₂-Einsatz zu minimieren. Wie im Chemistry4Climate Prozess [2, VCI/VDI, Chemistry4Climate, Abschlussbericht 2023] errechnet, spart jede Tonne recycelter Kunststoff rund 14 Megawattstunden (MWh) Strom und 0,5 t Wasserstoff und jede Tonne Holz/Stroh-Einsatz ca. 7 MWh Strom und ca. 0,1 t Wasserstoff im Gesamtprozess ein.

Um diese Prozesse voranzubringen, müssen noch etliche politische und gesetzgeberische Hürden überwunden werden. So braucht es z. B. dringend eine politische und gesetzgeberische Anerkennung des chemischen Recyclings. Des Weiteren muss über eine Fortentwicklung der Gesetzgebung zur grenzüberschreitenden Abfallverbringung nachgedacht werden, um dauerhaft auch größere Abfallmengen dem Recycling zugänglich zu machen. Bei der Biomasse ist zu diskutieren, wo sich diese am effizientesten und nachhaltigsten einsetzen lässt. Schließlich gilt es auch die Frage zu klären, wie in Deutschland die notwendige Wasserstoffwirtschaft und die dazugehörige Infrastruktur aufgebaut werden können, um eine entsprechende Versorgung der chemischen Industrie zu gewährleisten.

Literaturverzeichnis

1. Verband der Chemischen Industrie (VCI) (2024). Energiestatistik – Daten und Fakten, Stand. Abrufbar unter: <https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/energiestatistik-gesamt-2.pdf> (Zugriff am 14. Dezember 2024).
2. Geres, R., Wehrl, A., Ausfelder, F. et al. (2023). Wie die Transformation der Chemie gelingen kann. *Abschlussbericht 2023 von Chemistry4Climate*. Frankfurt, Abrufbar unter: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/broschueren-und-faltblaetter/final-c4c-broschure-langfassung.pdf> (Zugriff am 14. Dezember 2024).
3. Lindner, C., Schmitt, J., Fischer, E. et al. (2022). Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. *Conversio-Studie*

- 2021 Frankfurt, Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021 – Plastics Europe DE. Abrufbar unter: <https://plasticseurope.org/de/knowledge-hub/stoffstrombild-kunststoffe-in-deutschland-2021> (Zugriff am 14. Dezember 2024).
4. Vogel, J., Krüger, F. und Fabian M. (2020). *Chemisches Recycling*. Dessau-Roßlau Hintergrund. Hrsg. vom Umweltbundesamt. Abrufbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-17_hgp_chemisches-recycling_online.pdf (Zugriff am 14. Dezember 2024).
 5. Bruckschen, A., Bühler, I. und Große Entrup, W. (2024). Kunststoffkreisläufe intelligent schließen – Gemeinsames Leitbild zu einer Kreislaufwirtschaft mit Kunststoffen von BDE, PlasticsEurope Deutschland e. V. und VCI. *Positionspapier*. Berlin/Frankfurt, Abrufbar unter: <https://www.vci.de/themen/zirkulaere-wirtschaft/kunststoffkreislaeufe-intelligent-schliessen.jsp> (Zugriff am 14. Dezember 2024).
 6. Geres, R., Kohn, A., Lenz S. et al. (2019). *Roadmap Chemie 2050: Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland*. München: hrsg. von FutureCamp Climate GmbH und DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V.

