



VCI-Position

Kreisläufe für Kohlenstoff

Kernbotschaften

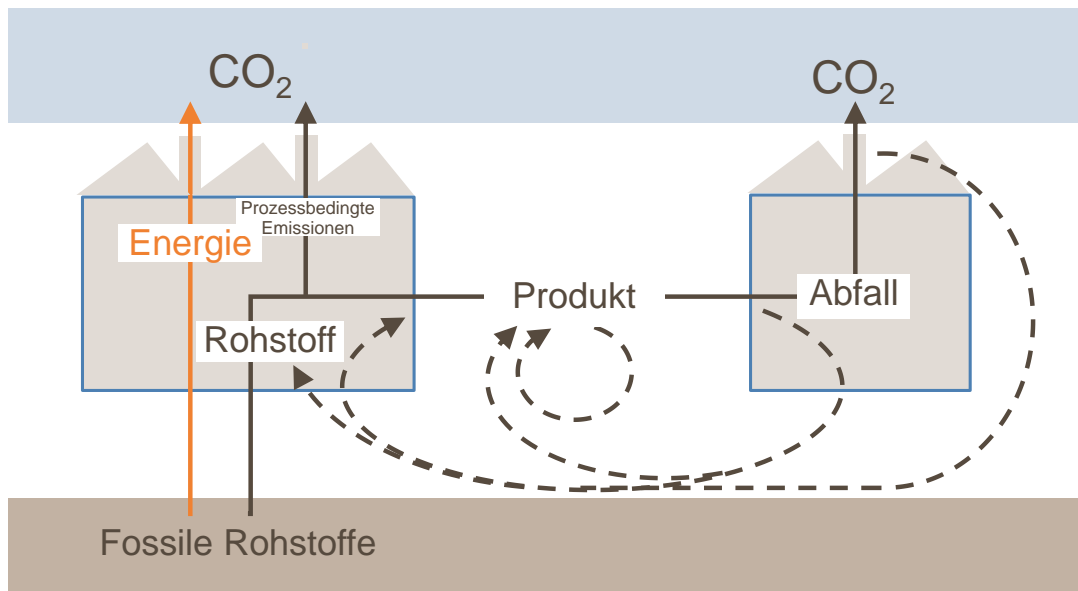
- Chemieprodukte, die auf Kohlenstoff basieren, werden auch in Zukunft Kohlenstoff enthalten. Als Beitrag zur nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen und zum Klimaschutz gewinnt die Kreislaufführung des Kohlenstoffs an Bedeutung.
- Die Potenziale für eine Wiederverwendung und die werkstoffliche Verwertung von Abfällen sind bei kohlenstoffhaltigen Produkten begrenzt. Dafür gibt es weitere Möglichkeiten für Kohlenstoffkreisläufe wie die rohstoffliche oder die energetische Verwertung von Abfällen. Letztere kann über die stoffliche Nutzung von CO₂ und die Bioökonomie ebenfalls zum Schließen des Kohlenstoffkreislaufs beitragen.
- Ein ganzheitlicher Ansatz für die Kreislaufführung von Kohlenstoff ist wichtig. Dies bedeutet, je nach Abfallstrom den zweckmäßigsten Verwertungsweg zu nutzen und darauf zu achten, dass eine Kreislaufführung ökonomisch und ökologisch sinnvoll ist – dies gilt insbesondere mit Blick auf Ressourceneffizienz, die Nutzenphase im Produktlebenszyklus und eventuelle Zielkonflikte.
- Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit sowohl innerhalb Deutschlands als auch im internationalen Vergleich sind unabdingbare Voraussetzungen für den Aufbau und eine verstärkte Nutzung von Kohlenstoffkreisläufen. Hierfür bedarf es Innovation und weiteren technischen Fortschritts in nahezu allen Bereichen der Wertschöpfungskette. Marktfähige Produkte zu erreichen ist dabei ebenso eine Herausforderung wie das Tätigen der erforderlichen Investitionen.
- Im Bereich der Regulierung können an den neu entstehenden Schnittstellen Anpassungen erforderlich werden. Diese gilt es mit Vorsicht und Augenmaß anzugehen, um eventuelle Doppelregulierungen oder Rechtsinkonsistenzen zu vermeiden. Innovative, neue Wege, zum Beispiel in der rohstofflichen Verwertung, dürfen nicht verbaut werden.

Hintergrund und Einordnung

Das chemische Element Kohlenstoff besitzt die besondere Fähigkeit zur Bildung einfacher wie komplexer organischer Verbindungen und weist von allen chemischen Elementen die größte Vielfalt auf. Diese Eigenschaft macht Kohlenstoff und seine Verbindungen zur Grundlage des Lebens auf der Erde. Bekannte Kohlenstoffvorkommen sind die fossilen Rohstoffe Erdöl, Erdgas und Kohle. Sie entstanden und entstehen durch Umwandlung pflanzlicher und tierischer Überreste unter hohem Druck. Erdöl, Erdgas und Kohle werden heute in großem Umfang als Energieträger genutzt zur Erzeugung von Strom, Wärme und Kraftstoffen. Bei ihrer Verbrennung

entsteht Kohlenstoffdioxid (CO₂), eine chemisch wenig reaktive Verbindung, die teilweise schon heute als Rohstoff und Kohlenstoffquelle für biologische als auch chemische Prozesse genutzt wird. CO₂ ist als Bestandteil der Erdatmosphäre Teil des Kohlenstoffkreislaufs der Natur. Es ist die Grundlage für das Leben der Pflanzen, da es durch die Photosynthese wiederum zu komplexen Molekülen umgesetzt wird. Als Treibhausgas trägt CO₂ maßgeblich zum anthropogenen Treibhauseffekt und damit zur globalen Erderwärmung bei.

Der größte Teil der fossilen Rohstoffe wird zur Energieerzeugung genutzt. Ein kleinerer Teil wird von der chemischen Industrie als Rohstoff zur Herstellung von Produkten stofflich verwendet: in Deutschland werden etwa 15 Prozent des Erdöls stofflich genutzt, weltweit etwa 10 Prozent. Dieser Kohlenstoff wird nicht verbrannt, sondern in den Produkten gebunden. Während der Nutzung der Produkte wird kein CO₂ aus dem Produktmaterial in die Atmosphäre freigesetzt – dies erfolgt dann, wenn die Produkte am Lebensende verbrannt und energetisch verwertet werden.



Als Beitrag zum Klimaschutz und zur nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen besteht die Herausforderung für die Gesellschaft darin, den Wertstoff Kohlenstoff effizient und ressourcenschonend zu nutzen, und zwar perspektivisch zunehmend durch eine Führung in Kreisläufen, und die CO₂-Emissionen zu verringern. Auch heute werden Stoffe schon in Kreisläufen geführt, so etwa beim Wassermanagement, Energiemanagement oder Stoff- und Abfallmanagement. In der Welt des Kohlenstoffs gibt es für Kreisläufe vielfältige Möglichkeiten. Je nach Art der Produkte und ihrer Nutzung eignen sich die Kreisläufe in unterschiedlicher Weise. Diese Optionen werden im Kapitel „Kreisläufe für Kohlenstoff“ beschrieben.

Politische Zielsetzungen und Umfeldtrends

RESSOURCENEFFIZIENZ UND RESSOURCENSCHONUNG

Den Rahmen für die nationale Ressourcenpolitik setzt das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm ProgRess. Das 2012 erstmals aufgelegte und seither fortgeschriebene Programm zielt darauf ab, eine nachhaltige Rohstoffversorgung zu sichern, Ressourceneffizienz in der Produktion zu steigern, Produkte und Konsum ressourcenschonender zu gestalten und eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft auszubauen.

KREISLAUFWIRTSCHAFT UND ABFALLPOLITIK

Auf europäischer Ebene steht die Ressourcenpolitik im Zeichen der Kreislaufwirtschaft. Die Europäische Kommission hat Ende 2015 ein Paket zur "Circular Economy" vorgelegt, um Wirtschaft und Konsum nachhaltiger zu gestalten. Ziel der EU-Kommission ist es, "linear" verlaufende Stoffströme vom Rohstoff über Produkte bis hin zum Abfall in Kreisläufe zu überführen, in denen möglichst viel stofflich verwertet (recycelt) wird. Neben Änderungen der Abfallgesetzgebung gehört ein umfangreicher Aktionsplan zu dem Paket. Die EU-Kommission will zahlreiche Maßnahmen in unterschiedlichen Politikfeldern ergreifen, die weit über die Diskussion zum Abfall-Legislativpaket hinausgehen.

Konkret beschreibt bereits heute die sogenannte „Abfallhierarchie“, wie mit Abfall umzugehen ist. Die Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft stehen in folgender grundsätzlicher Rangordnung:

1. Vermeidung von Abfällen
2. Vorbereitung zur Wiederverwendung
3. Recycling
4. Sonstige Verwertung (insbesondere energetisch)
5. Beseitigung (Deponierung oder Verbrennung ohne Energiegewinnung)

Die Abfallhierarchie ist ausdrücklich flexibel gestaltet: Die EU-Abfallrahmenrichtlinie und das Kreislaufwirtschaftsgesetz erlauben, nach Abwägung ökologischer, wirtschaftlicher und sozialer Folgen sowie unter Berücksichtigung der technischen Machbarkeit von der Hierarchie abzuweichen.

ZIRKULÄRE WIRTSCHAFT UND NACHHALTIGKEIT ALS ZUKUNFTSTRENDS FÜR DIE CHEMIE

Auch als Teil der neuen Ära Chemie 4.0 wird die zirkuläre Wirtschaft neben der Digitalisierung eine wichtige Rolle spielen. Die Studie „Chemie 4.0 – Wachstum durch Innovation in einer Welt im Umbruch“¹ zeigt, dass zirkuläre Wirtschaft im Bereich von chemischen Produkten, Dienstleistungen und Geschäftsmodellen der Chemie

¹ [Chemie 4.0 – Wachstum durch Innovation in einer Welt im Umbruch](#). Deloitte/VCI, 2017.

Wachstumspotenziale bieten und zugleich zur Erreichung ökologischer Ziele beitragen kann. Das in der Studie zugrunde gelegte Konzept der zirkulären Wirtschaft umfasst alle Beiträge zur Schonung von Ressourcen. Dies betrifft alle Aktivitäten,

- zur Steigerung der Ressourceneffizienz in allen Stufen der Wertschöpfungskette (Lieferanten, Chemieindustrie, Kunden, Verwerter),
- zur Erhöhung der Lebensdauer von Produkten und Komponenten und zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs in der Anwendung und
- um Kreisläufe u.a. durch Wiederverwendung, Recycling, stoffliche und energetische Verwertung möglichst weitgehend zu schließen und Reststoffe möglichst effizient zu verwerten.

KLIMASCHUTZ, DEKARBONISIERUNG, TREIBHAUSGASNEUTRALITÄT

Deutschland und die EU haben sich ambitionierte Klimaschutzziele gesetzt, die bis zum Jahr 2050 eine fast vollständige Reduzierung der Treibhausgasemissionen um bis zu 95 Prozent gegenüber dem Stand von 1990 vorsehen. Dies bedeutet für die Industrie, die energie- und prozessbedingten Emissionen aus der Produktion weitestgehend zu reduzieren.

In der internationalen Klimaschutzdiskussion hat sich der Begriff der „Dekarbonisierung“ als Abkehr der Energiewirtschaft von der Nutzung fossiler kohlenstoffhaltiger Energieträger etabliert. Während „Dekarbonisierung“ als Prozess verstanden wird, bezeichnet „Treibhausgasneutralität“ das langfristige Ziel dieses Prozesses. Ein Verzicht auf kohlenstoffhaltige Primärenergiequellen wie Öl, Kohle oder Gas durch Nutzung erneuerbarer Energiequellen wie Wind und Sonne ist für die Energieerzeugung vorstellbar, nicht jedoch für die stoffliche Nutzung von Kohlenstoff. Für das Ziel einer Treibhausgasneutralität ist daher die Kreislaufführung des in den Produkten auch weiterhin enthalten Kohlenstoffs der entscheidende Hebel. Dadurch kann perspektivisch auch die stoffliche Nutzung von Kohlenstoff ins Blickfeld rücken. Ungelöste Fragen gibt es bei der Bilanzierung des im Kreislauf geführten Kohlenstoffs bzw. Kohlendioxids (CO₂): Die Frage, wie vermiedene Emissionen durch stoffliche Nutzung als Bestandteile von Kreisläufen zu berücksichtigen sind, ist bislang weder in Lebenszyklusanalysen noch in Emissionshandelssystemen einfach zu beantworten.²

Nicht nur die Bilanzierung des Kohlenstoffs wirft Fragen auf. Auch der enorme Bedarf an erneuerbarer Energie und die enormen Kosten, die für eine Chemieproduktion auf Basis von CO₂ und Wasserstoff bzw. nachwachsenden Rohstoffen zu erwarten sind³ werfen die Frage auf, in welchem Zeitraum und in welchem Umfang die Vision einer Transformation der chemischen Industrie Realität werden kann. Bis dahin werden

² Die Kernfrage ist hierbei, ob die stoffliche Nutzung von CO₂ als „negative Emission“ angerechnet werden sollte. Damit wird zunächst die vermiedene Emission korrekt abgebildet, allerdings implizit und nicht zutreffend auch eine dauerhafte Speicherung angenommen. Dabei wird der weitere Lebensweg ausgeblendet, in dessen Verlauf das CO₂ zeitlich verzögert doch emittiert werden oder aber emissionsneutral weiterhin/erneut im Kreislauf geführt werden kann.

³ [Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry](#), DECHEMA 2017.

fossile Rohstoffe die Hauptrohstoffquelle der organischen Chemieproduktion bleiben. Voraussetzung für eine Transformation ist, dass das Ziel der Treibhausgasneutralität nicht auf Deutschland oder Europa beschränkt bleibt, sondern weltweit anerkannt wird und überall auf der Welt als Grundlage für die regulatorischen Rahmenbedingungen dient.

Kohlenstoff in der Chemie: Vom linearen Lebensweg zum Kreislauf

Die organische Chemie basiert auf Kohlenstoff. Die chemische Industrie in Deutschland deckt ihren Kohlenstoffbedarf zu fast 90 Prozent mit fossilen Rohstoffen auf Basis von Erdöl und Erdgas. Aus ihnen werde eine Reihe von Basischemikalien hergestellt, deren Weiterverarbeitung dann eine nahezu unerschöpfliche Vielfalt an Synthesemöglichkeiten bietet. Das Flussbild von Petrochemicals Europe⁴ zeigt einen Teil dieser Vielfalt der Produkte und ihrer Anwendungen auf.

Weder die Rohstoffnutzung noch die Abfallverwertung in ihren unterschiedlichen Ausprägungen sollten dabei als Selbstzweck betrachtet werden, sondern als Beitrag zu einer nachhaltigen Ressourcennutzung (wirtschaftlich, ökologisch, sozial), deren Wert für die Gesellschaft in dem vielfältigen Nutzen liegt, den die Produkte der chemischen Industrie erbringen. Dazu gehören auch die Einsparung natürlicher Ressourcen und die Vermeidung von Treibhausgasemissionen durch Anwendung chemischer Produkte.

Am Ende des Produktlebens steht die geordnete Entsorgung, idealerweise mit dem Ziel der optimalen Verwertung gemäß der Maßgaben des deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetzes. Die stoffliche Verwertung (werkstofflich oder rohstofflich) erlaubt es, Materialien den Herstellungsprozessen wieder zuzuführen. Wo dies nicht technisch machbar und/oder wirtschaftlich sinnvoll ist, ist die energetische Verwertung die nächste sinnvolle Option – auch sie ermöglicht eine Kreislaufführung des Kohlenstoffs, wie im Folgenden beschrieben wird.

Die große Vielfalt der Chemieprodukte und der Anwendungen, in denen sie genutzt werden, erschwert detaillierte Betrachtungen ihrer Lebenswege. Für die Produktgruppe der Kunststoffe sind die Lebenswege quantitativ gut dokumentiert:

- Kunststoffanwendungen finden sich in vielen Bereichen unseres Lebens. Als Verpackungsmaterialien dienen sie dem Schutz von Industrie- und Konsumgütern, wo sie Lebensmittel vor vorzeitigem Verderb schützen⁵. In der Autoindustrie tragen Kunststoffbauteile dazu bei, Fahrzeuge leichter und umweltverträglicher zu machen. Kunststoffe finden sich ferner in sehr langlebigen Produkten wie Fenstern, Türen, Dachbahnen, Rohrleitungen, Wärmedämmungen oder Bodenbelägen, in Elektro- und Elektronikgeräten, in der Medizin oder auch in den Flügeln von

⁴ <https://www.petrochemistry.eu/about-petrochemistry/flowchart/>

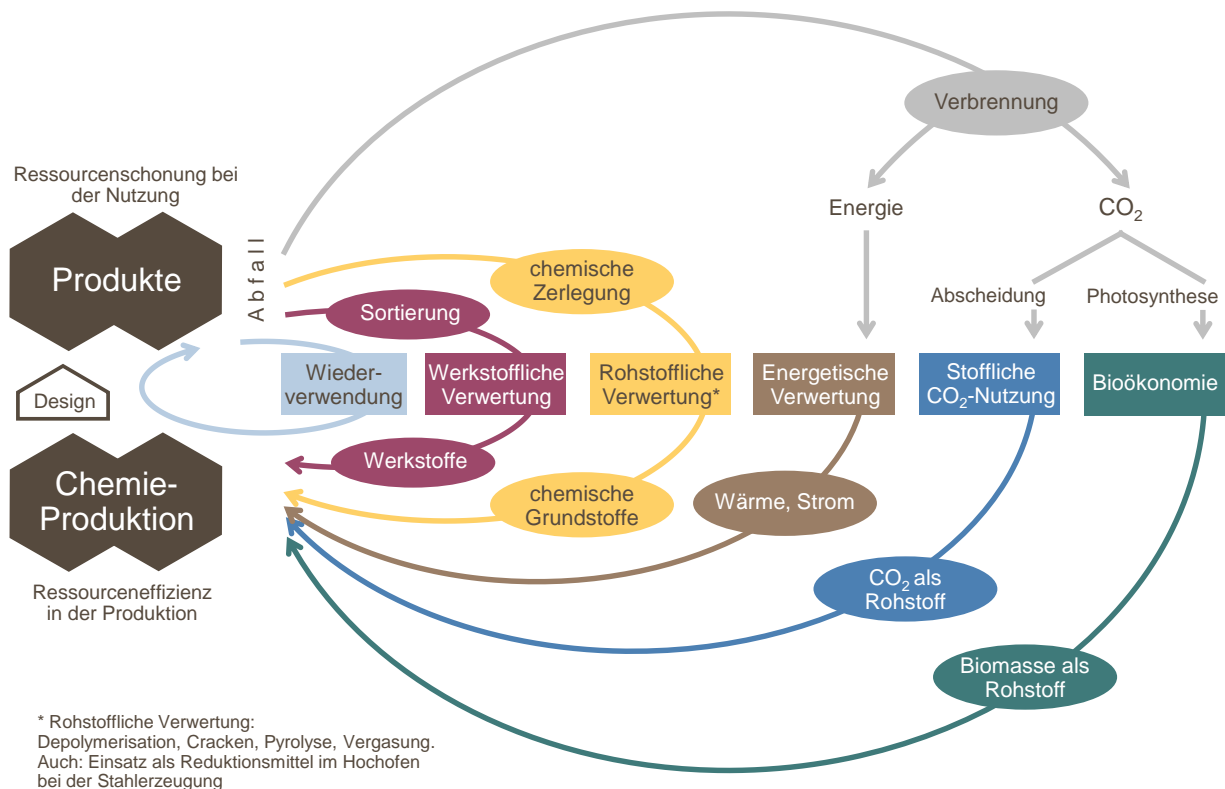
⁵ Die Studie „Vermeidung von Lebensmittelabfällen durch Verpackung“ der denkstatt GmbH aus dem Jahr 2015 zeigt, dass ohne Kunststoffverpackungen der Energieverbrauch in Europa um den Faktor 2,2 und die Menge an Treibhausgas um den Faktor 2,7 pro Jahr steigen würde.

Windkrafträdern. In vielen Fällen sparen Kunststoffe in ihrer Gebrauchsphase deutlich mehr Ressourcen ein, als für ihre Herstellung nötig sind.

- Auch nach ihrem Gebrauch haben Kunststoffprodukte nicht ausgedient. Die stoffliche und energetische Verwertung von Kunststoffabfällen ist in Deutschland auf einem sehr hohen technologischen Niveau organisiert. In Deutschland wurden im Jahr 2015 rund 18,5 Millionen Tonnen Kunststoff erzeugt. Im gleichen Jahr wurden 12,1 Millionen Tonnen in Deutschland zu Kunststoffprodukten verarbeitet. Die Kunststoffabfallmenge betrug 2015 inklusive Produktions- und Verarbeitungsabfällen 5,9 Millionen Tonnen. Davon wurden mehr als 99 Prozent verwertet: 45 Prozent werkstofflich, ein Prozent rohstofflich und 53 Prozent energetisch.⁶

Kreisläufe für Kohlenstoff

ÜBERSICHT ÜBER MÖGLICHE KREISLÄUFE FÜR KOHLENSTOFF



Die Abbildung zeigt, welche Kreisläufe grundsätzlich möglich sind. Auf eine quantitative Darstellung (z. B. der heutigen Mengen oder eine Abschätzung künftiger Potenziale durch Dicke der Pfeile) wurde bewusst verzichtet. Die Optionen unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihrer Eignung für die jeweiligen Abfallströme, sondern z. B. auch in ihrem Energie-/Wasserstoffbedarf, der etwa bei der stofflichen CO₂-Nutzung sehr hoch ist. Diese Parameter werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht in der Übersichtsgrafik dargestellt, jedoch nachfolgend beschrieben.

⁶ [Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft – Einblicke und Aussichten](#). BDE, bvse, BDSV, ITAD, PlasticsEurope, VDM, VDMA, VHI und VKU 2018, Daten basierend auf [Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015](#). Consultic 2016.

Für die chemische Industrie ist zirkuläre Wirtschaft ein ganzheitlicher Ansatz, der weit über die stoffliche Verwertung von Abfällen (Recycling) hinausgeht. Von zentraler Bedeutung ist die Steigerung der Effizienz bei gleichzeitiger Minimierung des Ressourcenbedarfs über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg. Bei der Produktion anfallende Nebenprodukte werden wenn möglich wieder direkt in der Produktion eingesetzt. Auch können Produkte mehrfach verwendet werden und werden dadurch gar nicht erst zu Abfall. Am Lebensende schließlich ermöglicht der in den Produkten enthaltene Kohlenstoff die Nutzung unterschiedlicher Kreisläufe: Die stoffliche Verwertung von Abfällen (Recycling), die rohstoffliche Verwertung und schließlich die energetische Verwertung, bei der durch Verbrennung Wärme und CO₂ gewonnen werden, die als Energie und Rohstoff wieder in der Produktion genutzt werden können. Die Bioökonomie stellt einen weiteren Kreislauf dar: Pflanzen nehmen CO₂ auf und wandeln es in Biomasse um, die als nachwachsender Rohstoff genutzt werden kann. Für die Kreislaufführung von Kohlenstoff gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, die nachfolgend vorgestellt werden. Dabei ist wichtig: Es gibt es keine „Ideallösung“, die Chemie braucht alle Optionen.

WIEDERVERWENDUNG

Hierunter ist die mehrfache Nutzung von Produkten zu verstehen, ohne dass diese zu Abfall werden. In der chemischen Industrie werden beispielsweise industrielle Verpackungen wie Fässer, Paletten oder Kunststoffbehälter nach Möglichkeit mehrfach im Sinne einer Kreislaufwirtschaft verwendet. So verhindert beispielsweise die "Rekonditionierung" (Wiederinstandsetzung) von Verpackungen, dass diese überhaupt zu Abfall werden. Dieser Ansatz wird, wo immer es möglich ist, intensiv verfolgt. Das umfangreiche, fortlaufend aktualisierte „VCI Handbuch für Verpackungen“ bietet hierfür zahlreiche Lösungsansätze.

WERKSTOFFLICHE VERWERTUNG

Werkstoffliche Verwertung (im allgemeinen Sprachgebrauch meist als „Recycling“ bezeichnet) ist die mechanische Aufbereitung von Werkstoffen, etwa von gebrauchten Kunststoffen. Die chemische Struktur bleibt dabei unverändert. Die Altteile werden zerkleinert, gereinigt und nach Sorten getrennt. Die möglichst saubere Trennung ist eine wesentliche Voraussetzung für eine hochwertige werkstoffliche Verwertung. Bei zunehmender Vermischung unterschiedlicher Kunststoffe und anhaftender Verschmutzungen reduziert sich die Eignung für die werkstoffliche Verwertung. Energie- bzw. Ökobilanzuntersuchungen belegen, dass das werkstoffliche Recycling von Kunststoffabfällen anderen Verwertungswegen immer dann überlegen ist, wenn dabei Materialqualitäten erzeugt werden können, die Neuware 1:1 ersetzen. Gerade im Verpackungs- und Baubereich sorgen auch freiwillige Maßnahmen der Industrie mit dafür, sortenreine Abfallströme zu generieren und diese einer werkstofflichen Verwertung zuzuführen, so etwa die Fenster-Recycling-Initiative Rewindo oder das Rücknahmekonzept für Ertekkunststoffe ERDE.

Der in der Hierarchie der Abfallgesetzgebung bevorzugte Weg der Verwertung ist die werkstoffliche Verwertung, die jedoch wirtschaftliche und technische Grenzen hat.

Sobald Werkstoffe nicht mehr sauber und sortenrein erfasst werden können, steigen der technische Aufwand und die Kosten für werkstoffliche Verwertung exponentiell an.

ROHSTOFFLICHE VERWERTUNG

Für Kunststoffabfälle kann jedoch – neben der energetischen Verwertung, s. u. – auch eine rohstoffliche Verwertung in Frage kommen. Die rohstoffliche Verwertung bezeichnet Verfahren, in denen Abfälle durch verschiedene Prozesse verwertet und zu Rohstoffen für die chemische Industrie umgesetzt werden können. Eine Option ist die Depolymerisation, also die Spaltung der Polymerketten zu den entsprechenden Monomeren. Die andere Option ist die thermisch oder katalytisch gesteuerte Spaltung der Moleküle in petrochemische Grundstoffe. Die Zielprozesse sind hier vor allem das Cracking, neben der Pyrolyse oder der Vergasung zu Synthesegas. Vorteilhaft ist hier die universelle Anwendbarkeit auf komplexere und nicht depolymerisierbare Kunststoffsysteme.

Die Produkte können in beiden Fällen zur Herstellung neuer Kunststoffe oder auch für andere Zwecke eingesetzt werden. Diese Prozesse sind aus technischer Sicht noch nicht ausgereift und erfordern Forschung, Entwicklung und sehr hohe Investitionen, in die Anlagentechnik, sowie einen hohen Energiebedarf zur Verarbeitung und Aufreinigung der Abfallfraktionen, so dass es nur wenige Anlagen gibt, die ökologisch und ökonomisch tragfähig sind. Unter gegenwärtigen Randbedingungen ist eine rohstoffliche Verwertung, die Rohstoffe in die chemische Produktion zurückführt, daher noch im Entwicklungsstadium. In anderen Sektoren findet sie bereits statt.⁷

Perspektivisch kann die rohstoffliche Verwertung jedoch zu einer wichtigen Option für die stoffliche Kreislaufführung von Kohlenstoff werden. Fördermittel für Forschung und Entwicklung können dazu beitragen, die noch bestehenden technischen Schwierigkeiten schneller zu überwinden und das stoffliche Verwerten nachhaltiger zu gestalten.

ENERGETISCHE VERWERTUNG

Die energetische Verwertung ist insbesondere für vermischte und für verschmutzte organische Abfallfraktionen geeignet. Energetische Verwertung ist die Rückgewinnung der im Abfall in Form von Kohlenstoff enthaltenen Energie durch Verbrennung bei gleichzeitiger Nutzung dieser Energie zur Erzeugung von Strom und/oder Dampf bzw. Bereitstellung von Prozesswärme.

Die dabei erzeugte Energie wird auf effiziente Weise sowohl für die industrielle als auch für die öffentliche Energieversorgung verwendet. Da die chemische Industrie große Mengen an Wärme und Strom benötigt, kann die Energie direkt in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden. Die industrielle energetische Verwertung

⁷ Ein Beispiel für rohstoffliche Verwertung, die aktuell bereits stattfindet, jedoch keine Rohstoffe in die chemische Produktion zurückführt, ist die Nutzung von spezifizierten kunststoffreichen Abfallströmen in Hochöfen, wo diese Ströme in situ zu Synthesegas umgewandelt werden und als Reduktionsmittel anstelle von Koks, Kohle oder Öl Eisenerz und andere oxidierte Metalle in reine Metalle umzuwandeln.

zeichnet sich – insbesondere in Industrieparks und an Verbundstandorten – dadurch aus, dass sie ohne lange Transportvorgänge unmittelbar vor Ort erfolgt.

Die Abfallverbrennung ermöglicht nicht nur die Kreislaufführung von Energie (bei Energieauskopplung) und CO₂ (s. u.), ihr kommt eine weitere, wichtige Aufgabe in der Kreislaufwirtschaft zu: Sie ermöglicht die Ausschleusung von Schad- und Störstoffen aus den Stoffkreisläufen. Durch die Hochtemperaturverbrennung in Sonderabfallverbrennungsanlagen werden alle organischen Stoffe sicher zerstört. Anorganische Schadstoffe werden durch Bindung in der Schlacke bzw. den Filterstäuben sicher dem Stoffkreislauf entzogen. Die entstehenden Rückstände (Staub und Schlacke) werden zum Teil stofflich verwertet (als Inertmaterial etwa für den Straßenbau) oder deponiert. Die Deponierung bleibt für Abfallströme, die nicht weiter verwertbar sind – wie Verbrennungsrückstände – eine unverzichtbare Entsorgungsoption. Sie ist die notwendige Schadstoffsene für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft.

STOFFLICHE CO₂-NUTZUNG

Neben Energie entsteht als weiteres Produkt der Verbrennung von Abfällen CO₂. Dieses kann aus dem Abgasstrom abgetrennt und dann als Rohstoff genutzt werden. Als Endprodukt der Verbrennung enthält CO₂ zwar Kohlenstoff, aber nur noch wenig Energie. Um CO₂ wieder in energiereiche Kohlenwasserstoffe umzuwandeln, die für die Chemieproduktion genutzt werden können, muss Wasserstoff (H₂) hinzugefügt werden. Wasserstoff wird heute großtechnisch aus fossilen Rohstoffen, vor allem Erdgas, erzeugt. Würde solcher Wasserstoff für eine Synthese mit CO₂ verwendet, würden die CO₂-Emissionen aus der Wasserstofferzeugung die durch die stoffliche Nutzung des CO₂ vermiedenen Emissionen aufwiegen oder übersteigen. Daher kommt nur Wasserstoff in Frage, der unter Einsatz von erneuerbaren Energiequellen weitgehend CO₂-frei erzeugt wurde. Technisch geschieht dies z. B. über die Elektrolyse von Wasser mittels erneuerbaren Stroms. Um so in großem Umfang CO₂ als Chemierohstoff nutzen zu können, sind enorme Mengen an erneuerbar erzeugtem Strom nötig. Eine überschlägige Rechnung zeigt einen Bedarf von 650 TWh Strom aus erneuerbaren Quellen, wollte man den heutigen Kohlenstoffbedarf der organischen Chemieproduktion in Deutschland vollständig aus CO₂ und erneuerbaren Wasserstoff zu decken⁸. Diese Menge übersteigt den derzeitigen gesamten Stromverbrauch in Deutschland⁹. Nicht nur muss diese Menge zur Verfügung stehen, vielmehr muss der Strom auch kostengünstig sein, um eine wirtschaftliche Produktion im Vergleich zur Herstellung von Basischemikalien auf petrochemischen Weg überhaupt zu ermöglichen.

⁸ 20 Mio. t C-haltige Rohstoffe entsprechen ca. 18 Mio t C. Reaktion: $4 \text{ H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O}$ (Power-to-X). Bedarf Wasserstoff: 70 Mio t CO₂ entspricht 13 Mio t H₂, Reaktion: $2 \text{ H}_2\text{O} = 2 \text{ H}_2 + \text{O}_2$ (Wasser-Elektrolyse). Strombedarf H₂O-Elektrolyse: 4,5 kWh/Nm³ H₂ = 50 kWh/kg H₂. Strombedarf CH₄-Erzeugung: 13 Mio t H₂ x 50 MWh/t H₂ = 650 TWh. VCI-Abschätzungen und Berechnungen, stöchiometrische Betrachtung ohne Berücksichtigung von Wirkungsgraden.

⁹ Endenergieverbrauch Strom 2016 lt. Energiebilanz: 517 TWh

Alternativ besteht die Möglichkeit der Umsetzung von CO₂ mit energiereichen Chemikalien wie z. B. Epoxiden. Hierbei besteht die Möglichkeit, einen Teil der Energie, die ansonsten für Polymerisationsreaktionen genutzt wird, für die Aktivierung des CO₂ zu verwenden, weitere Energiezufuhr ist in diesem Fall nicht notwendig.

Als Quelle für CO₂ ist neben Punktquellen auch die Abscheidung aus der Luft (Direct Air Capture) denkbar. Dieses Verfahren erfordert jedoch einen hohen Energie- und Materialeinsatz.

BIOÖKONOMIE

Pflanzen können das in der Luft enthaltene CO₂ wesentlich einfacher „einsammeln“ und zusätzlich in Kohlenwasserstoffstrukturen umwandeln. Die Rolle der Pflanzen im Kohlenstoffkreislauf der Natur wurde bereits eingangs beschrieben. Über die Photosynthese setzen sie CO₂ und Sonnenlicht zu Kohlenstoff (Biomasse) und Sauerstoff um. Aus der Biomasse der Pflanzen gewonnene nachwachsende Rohstoffe wie etwa Öl, Zucker, Stärke, Harze oder Gerbstoffe werden seit langem, zum Teil seit Anbeginn der chemischen Industrie, als Kohlenstoffquelle genutzt. Auch mit Blick in die Zukunft hat die Bioökonomie ein hohes Innovationspotenzial für die chemisch-pharmazeutische Industrie, insbesondere im Bereich der industriellen Biotechnologie. Zu beachten ist allerdings, dass die Nutzung nachwachsender Rohstoffe nicht zwangsläufig nachhaltig ist. Ein wichtiges Kriterium für die Bewertung der Nachhaltigkeit von nachwachsenden Rohstoffen ist die Erzeugung der Biomasse auf den nicht unbegrenzt erweiterbaren Ackerflächen. Der Anbau von Rohstoffpflanzen darf insbesondere nicht zu Lasten der Erzeugung von Nahrungs- oder Futtermitteln gehen. Auch müssen soziale Auswirkungen beachtet werden und es muss sichergestellt sein, dass für eine Ausweitung der Anbauflächen keine schützenswerten Ökosysteme zerstört werden.

Werden diese Anforderungen erfüllt, ist der Kohlenstoffkreislauf über die Bioökonomie eine hervorragende Möglichkeit – wie auch die direkte stoffliche Nutzung von CO₂ und die energetische Verwertung – Kohlenstoffkreisläufe auch dort zu schließen, wo dies über eine stoffliche Kreislaufführung nicht möglich ist. Zahlreiche Produktgruppen der chemischen Industrie, wie etwa Lacke und Farben, Wasch- und Reinigungsmittel oder Schmierstoffe sind keine Werkstoffe, das heißt sie können nicht einmal theoretisch stofflich im Kreis geführt werden. Wohl aber kann der in diesen Produkten enthaltene Kohlenstoff im Kreis geführt werden. Damit ist für diese Produkte ein „Recycling“ durch die Nutzung nachwachsender Rohstoffe, durch die stoffliche Nutzung von CO₂ sowie die Rückführung von Energie in die Produktion möglich.

Mit Blick auf die aktuelle Diskussion, insbesondere auf europäischer Ebene geführte Diskussion über das Verhältnis von Bioökonomie und Circular Economy gilt daher: Circular Economy und Bioökonomie sind kein Widerspruch, vielmehr ist die Bioökonomie über den Kohlenstoffkreislauf ein elementarer Bestandteil der Circular Economy.

Vom Idealkonzept zur wirtschaftlichen Realität

Es wurde gezeigt, dass die werkstoffliche Verwertung nicht die einzige Möglichkeit zur Kreislaufführung von Kohlenstoff ist. Physische Knappheiten für eine Substitution fossiler Rohstoffe werden dabei voraussichtlich nicht die Treiber sein. Aufgrund der vielfältigen Bindungen, die Kohlenstoff eingehen kann, sind unterschiedliche Kreislaufführungen denkbar, die auch eine Zusammenarbeit verschiedener Wirtschaftssektoren ermöglichen – etwa zwischen chemischer Industrie, Abfallwirtschaft und Energiewirtschaft. Dabei handelt es sich um Optionen, deren Chancen und Grenzen jeweils beachtet werden müssen. Manche der beschriebenen Kreisläufe werden heute schon genutzt, bei anderen bedarf der Weg zu einer überwiegenden oder gar vollständigen Kreislaufführung von Kohlenstoff noch enormer Anstrengungen. Aus technischer Sicht stehen die erforderlichen Technologien heute zumindest in fortgeschrittenem Entwicklungs-Stadium zu Verfügung. Marktfähige Produkte¹⁰ sind jedoch vielfach noch nicht in Sicht.

Voraussetzungen für den Auf- und Ausbau der Kreisläufe sind daher:

- **Hohe Investitionen in Anlagentechnik und Infrastruktur:** Die DECHEMA hat in einer Studie den jährlichen Investitionsbedarf für die europäische Chemie auf 17-27 Mrd. € je nach Szenario abgeschätzt¹¹. Unternehmen werden derartige Investitionen nur tätigen können, wenn es dafür einen „business case“ gibt, sprich, wenn für das eingesetzte Kapital eine ausreichende Rendite (Return on Investment) erwarten werden kann.
- **Marktfähige Produktionskosten und Produktpreise als Grundlage für die zu tätigen Investitionen:** Im Unterschied etwa zur stark regulierten Abfallwirtschaft bewegt sich die chemische Industrie in einem freien globalen Markt, was den Verkauf ihrer Produkte betrifft. Produkte können nur verkauft werden, wenn sie nicht teurer sind als der Marktpreis, der von den weltweit günstigsten Anbietern bestimmt wird und keinen Unterschied macht, ob die Produkte aus Primärrohstoffen oder ganz bzw. teilweise aus den verschiedenen Kreisläufen erzeugt werden. Die DECHEMA-Studie hat bei Annahme recht günstiger Randbedingungen Produktpreise für Basischemikalien auf Basis CO₂/H₂ ermittelt, die im Jahr 2050 um den Faktor 2-5 über denen der fossil-basierten Vergleichsprodukte liegen.¹²
- **Innovation durch Forschung und Entwicklung als Grundlage für marktfähige Produktionskosten und Produkte:** Auch wenn die erforderlichen Technologien prinzipiell zur Verfügung stehen, sind teilweise noch erhebliche Fortschritte erforderlich, damit ihre Nutzung auch wirtschaftlich darstellbar wird. Hierfür ist die Förderung von Forschung und Entwicklung der entscheidende Hebel.

¹⁰ Bei Rezyklaten zählt dazu auch die Akzeptanz im Markt und bei Verbrauchern

¹¹ [Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry](#), DECHEMA 2017.

¹² ebenda

- **Regulierung mit Vorsicht und Augenmaß:** Durch das Schließen von Kreisläufen entstehen Schnittstellen bislang getrennter Regulierungsgebiete, z. B. zwischen Abfallpolitik und Chemikalien- sowie Produktpolitik, zwischen Klimapolitik, Energiepolitik, Rohstoffpolitik oder zwischen dem Geltungsbereich des EU-Emissionshandels und außerhalb liegender Sektoren. Dadurch können Anpassungen der Regulierung erforderlich werden. Allerdings erhöht sich dadurch die Komplexität ebenso wie die Gefahr von Fehlsteuerungen.

Es gilt dabei, den **Nutzen und die Sicherheit der Produkte für die Gesellschaft sowie den Produktionsstandort Europa mit seinen Arbeitsplätzen** ebenso im Blick zu behalten wie die **Einbindung der chemischen Industrie in internationale Märkte und Lieferketten**.

Der Versuch, Kreisläufe um ihrer selbst willen zu forcieren wäre kontraproduktiv. Dies gilt in besonderer Weise für regulatorische Rahmenbedingungen, die allein auf Deutschland oder Europa beschränkt bleiben. Eine weltweite Umsetzung, die gleiche Wettbewerbsbedingungen sicherstellt, könnte dagegen als Katalysator für den Aufbau von Kohlenstoffkreisläufen dienen.

Vom Produktdesign bis zur Abfallverwertung gilt: Vorgaben, die einseitig auf Stärkung des werkstofflichen Kreislaufs abzielen, können kontraproduktiv für die Entwicklung innovativer Materialien sein. Ressourcenschonung und Klimaschutz müssen ebenso berücksichtigt werden wie der Bedarf der Kunden hinsichtlich Kosten, Qualität und Nutzen. Zielkonflikte sind im Sinne der Nachhaltigkeit (ökonomisch, ökologisch, sozial) zu lösen.

Fazit

- Chemieprodukte, die auf Kohlenstoff basieren, werden auch in Zukunft Kohlenstoff enthalten. Als Beitrag zur nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen und zum Klimaschutz gewinnt die Kreislaufführung des Kohlenstoffs an Bedeutung.
- Die Potenziale für eine Wiederverwendung und die werkstoffliche Verwertung von Abfällen sind bei kohlenstoffhaltigen Produkten begrenzt. Dafür gibt es weitere Möglichkeiten für Kohlenstoffkreisläufe wie die rohstoffliche oder die energetische Verwertung von Abfällen. Letztere kann über die stoffliche Nutzung von CO₂ und die Bioökonomie ebenfalls zum Schließen des Kohlenstoffkreislaufs beitragen.
- Ein ganzheitlicher Ansatz für die Kreislaufführung von Kohlenstoff ist wichtig. Dies bedeutet, je nach Abfallstrom den zweckmäßigsten Verwertungsweg zu nutzen und darauf zu achten, dass eine Kreislaufführung ökonomisch und ökologisch sinnvoll ist – dies gilt insbesondere mit Blick auf Ressourceneffizienz, die Nutzenphase im Produktlebenszyklus und eventuelle Zielkonflikte.
- Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit sowohl innerhalb Deutschlands als auch im internationalen Vergleich sind unabdingbare Voraussetzungen für den Aufbau und eine verstärkte Nutzung von Kohlenstoffkreisläufen. Hierfür bedarf es Innovation und weiteren technischen Fortschritts in nahezu allen Bereichen der

Wertschöpfungskette. Marktfähige Produkte zu erreichen ist dabei ebenso eine Herausforderung wie das Tätigen der erforderlichen Investitionen.

- Im Bereich der Regulierung können an den neu entstehenden Schnittstellen Anpassungen erforderlich werden. Diese gilt es mit Vorsicht und Augenmaß anzugehen, um eventuelle Doppelregulierungen oder Rechtsinkonsistenzen zu vermeiden. Innovative, neue Wege, zum Beispiel in der rohstofflichen Verwertung, dürfen nicht verbaut werden.

Ansprechpartner: Tilman Benzing
Telefon: +49 69 2556-1414
E-Mail: tbenzing@vci.de
Internet: www.vci.de

Verband der Chemischen Industrie e.V.
Mainzer Landstraße 55, 60329 Frankfurt

- Registernummer des EU-Transparenzregisters: 15423437054-40
- Der VCI ist in der „öffentlichen Liste über die Registrierung von Verbänden und deren Vertretern“ des Deutschen Bundestags registriert.

Der VCI vertritt die wirtschaftspolitischen Interessen von rund 1.700 deutschen Chemieunternehmen und deutschen Tochterunternehmen ausländischer Konzerne gegenüber Politik, Behörden, anderen Bereichen der Wirtschaft, der Wissenschaft und den Medien. Er steht für mehr als 90 Prozent der deutschen Chemie. Die Branche setzte 2017 rund 196 Milliarden Euro um und beschäftigte über 453.000 Mitarbeiter.