



DECHEMA

Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.

STATUSPAPIER

Circular Economy

**Die Perspektive von chemischer Technik
und Biotechnologie**





Inhalt

Was ist „Circular Economy“?	4
Vorwort: Die Sicht der DECHEMA auf die Circular Economy	5
1. Was ist „Circular Economy“?	7
1.1 Definition der Circular Economy	7
1.2 Historische Entwicklung	7
2. Prinzipien der Circular Economy	8
2.1 Ebenen der Kreislaufschließung und Interaktion von Sektoren	8
2.2 Prinzipien erfolgreicher Kreislaufschließungen	10
3. Der Kohlenstoff-Kreislauf	11
3.1 Kohlenstoffhaltige Industrieprodukte	11
3.2 Konzepte zur Kreislaufschließung	12
4. Verfahrenstechnik für die Circular Economy	14
4.1 Circular Design	14
4.1.1 Circular Design	15
4.1.2 Anlagen für die Circular Economy	16
4.2 Verfahrenstechnik für Circular Value Recovery: Re-Use, repair, recycle	17
4.2.1 Sammelsysteme: Track & Trace für Wertstoffe	17
4.2.2 Rückgewinnung von Materialien aus Abfallströmen	18
4.2.3 Mechanische Aufbereitung: Zerkleinern, Klassieren, Feststofftrennung	18
4.2.4 Mechanische Aufbereitung: Schmelzen	20
4.2.5 Physikalisch-chemische Aufbereitung: Lösung und Fällung	21
4.2.6 Chemische Aufbereitung: Funktionales Recycling	23
4.2.7 Chemische Aufbereitung: Pyrolyse	25
4.2.8 Chemische Aufbereitung: Thermo-chemische Vergasung	28
4.2.9 Die Rolle des Wassers in den zirkulären Verfahren	30
4.3 Verfahrenstechnik für Circular Support	31
4.3.1 Effiziente Steuerung von Rohstoffen und Prozessen: Bilanzierung und Digitalisierung	31
4.3.2 Systemische Ansätze	32
4.3.3 Ansätze der Bioökonomie	33
5. Circular Economy messbar machen	35
5.1 Der Hintergrund: Indikatoren und Bewertungsmethoden	35
5.2 Die Bottom-up-Perspektive: Lebenszyklusanalyse / Life Cycle Assessment (LCA)	36
5.3 Die Top-down-Perspektive: Materialflussanalysen (MFA)	37
5.4 Anwendung von Indikatoren in der Circular Economy	38



Inhalt

6. Gesellschaftlicher Rahmen und Rolle der Kommunikation	40
6.1 Umgang mit knappen Ressourcen	40
6.2 Verlässliche Rahmenbedingungen	40
6.3 Industriepolitik und internationale Vernetzung	41
6.4 Kommunikation	42
7. Handlungsempfehlungen und Ausblick	43
8. Anhang	45
8.1 Darstellung bestehender Initiativen / Papiere zum Thema „Circular Economy“	45
8.2 Papiere und Publikationen zur Bioökonomie	46
8.3 Forschungsinitiativen und Ansätze zur Vernetzung von Aktivitäten im Bereich Kohlenstoffkreisläufe	47
8.4 Papiere der DECHEMA-Gremien (seit 2015)	47
9. Literatur	48
10. Autor:innen und Gremien	51

Impressum

HERAUSGEBER:



Gesellschaft für Chemische
Technik und Biotechnologie e.V.
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main
Tel.: +49 69 7564-0
E-Mail: info@dechema.de

Verantwortlich im Sinne des Presserechts

DECHEMA e.V.
Dr. Kathrin Rübberdt
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main

Erschienen im Juni 2024

Bildnachweis

Titelseite: © AdobeStock_40647159 /
Eigene Darstellung

Executive Summary

Ziel des vorliegenden Statuspapiers ist es, technische Optionen für die Circular Economy aufzuzeigen, diese aus technisch-wissenschaftlicher Sicht und im Hinblick auf ihren Beitrag zu den Zielen der Circular Economy zu bewerten, Lücken in Forschung und Entwicklung aufzuzeigen und nach Möglichkeit ein Gesamtbild für die technische Umsetzung zu zeichnen.

Der Begriff „Circular Economy“ hat sich im letzten Jahrzehnt etabliert für ein ökonomisches Modell, das die gesamte Wirtschaft und Gesellschaft umfasst und durch Maßnahmen entlang des gesamten Lebenszyklus von Rohstoffen, Materialien und Produkten zum nachhaltigen Wirtschaften beitragen soll. Zu diesen Maßnahmen gehören der sparsame Umgang („reduce“) mit Ressourcen, die Verlängerung der Nutzungsdauer von Produkten („reuse“) und die Wiedergewinnung von Komponenten, Materialien oder elementaren Stoffen („recycle“).

Eine besondere Rolle kommt dabei dem Kohlenstoffkreislauf zu, der zum einen eine große Vielzahl an Produkten und Einsatzmöglichkeiten abbildet, zum anderen die Verbindung zu biologischen Systemen und zur Bioökonomie sowie zum Energiesektor und zum Klima darstellt. Entsprechend vielfältig sind die Möglichkeiten zur Kreislaufschließung.

In der europäischen Taxonomie lassen sich die verfahrenstechnischen Beiträge verschiedenen Bereichen zuordnen: Circular design & production, Circular use, Circular value recovery, Circular support. Aspekte von Circular design & production sind z.B. der Einsatz von Fügetechniken oder die Konzeption modularer Anlagen, die flexibel mit unterschiedlichen Stoffströmen umgehen können. Ein weiterer wichtiger Beitrag ist die Gestaltung von Materialien, z.B. die Vermeidung von Verbundwerkstoffen. Im Bereich Circular value recovery kommen praktisch alle Methoden der Verfahrenstechnik zum Einsatz, angefangen bei der Wiedergewinnung von Polymeren oder Metallen durch Schmelzen oder Lösung und Fällung. Die Trennung und Rückgewinnung auf der Ebene kleiner Moleküle oder der Elemente kann z.B. durch Pyrolyse-Techniken erfolgen.

Circular Economy muss aber auch den Einsatz weiterer Ressourcen berücksichtigen. Wasser spielt eine wesentliche Rolle, z.B. als Lösungsmittel oder Reaktionsmedium, und die Schließung des Wasserkreislaufs ist bei vielen Verfahren ein wesentlicher Baustein für ihre Nachhaltigkeit. Im Rahmen dieses Papiers nur gestreift wird die Bioökonomie, die im Kohlenstoffkreislauf unverzichtbar ist. Dazu gehört nicht nur die Schließung des Zyklus über Biomasse, sondern auch der Einsatz biotechnologischer Schritte in verschiedenen Prozessen.

Angesichts der zahlreichen Möglichkeiten zur Schließung von Kreisläufen ist eine vergleichende Bewertung für die Auswahl des jeweils geeignetsten Verfahrens notwendig. Dazu existieren mehrere Ansätze, die die Nachhaltigkeit ganzheitlich bewerten.

So viele Optionen technische Lösungen auch eröffnen mögen, der Schlüssel zur Umsetzung einer Circular Economy liegt nicht allein in Wissenschaft und Technologie. Es bedarf darüber hinaus regulatorischer Rahmenseetzungen und eines gesellschaftlichen Aushandlungsprozesses, um Prioritäten zu formulieren und alle Stakeholder zur Mitwirkung zu motivieren.

Forschungsbedarf besteht in praktisch allen Bereichen der Circular Economy, von der Entwicklung von Werkzeugen zur systemischen Bewertung bis zur Optimierung einzelner, auch vermeintlich ausgereifter Verfahrensschritte. Damit diese Forschungen auch praktische Früchte tragen, sind neben Wissenschaft und Industrie auch Interessensgruppen, Politik, Verbraucher und letztlich die gesamte Gesellschaft zum Handeln aufgerufen.

Vorwort: Die Sicht der DECHEMA auf die Circular Economy

Die „Circular Economy“ ist mehr als die klassische Kreislaufwirtschaft: sie ist ein Konzept für die gesamte Wirtschaft und Gesellschaft. Von der Industrie verlangt dieses Wirtschaftskonzept ein nachhaltiges Rohstoff- und Produktionsmanagement unter Berücksichtigung der planetaren Grenzen. Die nachhaltige Versorgung mit Rohstoffen ist nicht nur für den Erhalt der bestehenden Produktion von Bedeutung, auch Zukunftsfelder wie Elektromobilität, erneuerbare Energien sowie Infrastruktur für die Digitalisierung in verschiedenen Bereichen erfordern eine Vielzahl an teilweise kritischen Rohstoffen. Die Umsetzung einer Circular Economy ist aber auch wichtig, um die nationalen und internationalen Klimaschutz- und Nachhaltigkeitsziele zu erreichen.

Ziel des vorliegenden Statuspapiers ist es, technische Optionen für die Circular Economy aufzuzeigen, diese aus technisch-wissenschaftlicher Sicht und im Hinblick auf ihren Beitrag zu den Zielen der Circular Economy zu bewerten, auf Lücken in Forschung und Entwicklung hinzuweisen und nach Möglichkeit ein Gesamtbild für die technische Umsetzung zu zeichnen.

Dabei unternimmt das Papier den Versuch, sich der Circular Economy aus der Perspektive der technischen Herausforderungen unabhängig vom einzelnen Rohstoff- oder Produktkreislauf zu nähern, um unterschiedliche Handlungsmöglichkeiten aufzuzeigen und Forschungsbedarfe übergreifend darzustellen. Beispielhafte Anwendungen dienen dabei als Illustration.

Die Vision der DECHEMA für eine Circular Economy umfasst die möglichst weitgehende Schließung aller industriellen Stoffkreisläufe unter Berücksichtigung weiterer Sektoren wie z.B. der Energie- und Wasserwirtschaft. So vielfältig diese Stoffkreisläufe sind, lassen sich doch bestimmte Grundprinzipien erkennen, die teils übergreifende, teils spezifische technische Lösungen erfordern.

Als disziplinenübergreifende wissenschaftlich-technische Fachgesellschaft ist die DECHEMA dazu prädestiniert, sowohl einzelne Prozesse als auch deren Wechselwirkungen in diese Betrachtung einzubeziehen. Dabei sieht sie sich einer technologieoffenen Herangehensweise verpflichtet.



Abbildung 1: Beim Tutzing-Symposium 2022 diskutierten die Teilnehmenden intensiv über alle Aspekte der Circular Economy (Quelle: DECHEMA e.V.).

Aspekte der Circular Economy werden seit mehreren Jahren in den Gremien der DECHEMA praktisch in ihrer gesamten Breite behandelt. Dazu wurden Aktivitäten gestartet oder Papiere erstellt, die den Beitrag einzelner Disziplinen zur Circular Economy darstellen sowie Herausforderungen und Lösungen aufzeigen.

Um auch die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Technologien und Sektoren zu berücksichtigen, wurde bei einem Strategieworkshop im Jahr 2019 „Circular Economy“ als gremienübergreifendes Querschnittsthema definiert. Sowohl innerhalb einzelner Gremien als auch übergreifend – vor allem beim Tutzing-Symposium 2022 – wurde seither das Themenfeld bei der DECHEMA systematisch weiterbearbeitet.

Die Themen und die Produkt- sowie Rohstoffkreisläufe, die in diesem Papier näher beschrieben werden, basieren auf diesen übergreifenden Diskussionen. Die Auswahl erfolgte in dem Wissen, dass nicht alle Themen, die für die Circular Economy relevant sind, und auch nicht alle Rohstoffe in diesem Statuspapier behandelt werden können, da dies den Rahmen des Papiers sprengen würde.

Aufgrund der hohen Komplexität kann die Circular Economy nur in einem gemeinsamen Kraftakt angegangen und erfolgreich umgesetzt werden. Circular Economy und die Maßnahmen zu einem nachhaltigen Rohstoffmanagement befinden sich immer in einem Spannungsfeld. So müssen ökologische, ökonomische und gesellschaftliche Zielsetzungen sowie regulatorische und regionale Randbedingungen berücksichtigt werden, die einen Einfluss auf die Wahl der geeigneten Maßnahmen haben.

Bei der Transformation zu einer Circular Economy sind Zielkonflikte und Konkurrenzen absehbar, etwa wenn es um den Zugang zu knappen Ressourcen wie derzeit z.B. grünen Wasserstoff geht. Der DECHEMA ist bewusst, dass es dazu genauso wie in anderen großen gesellschaftlichen Handlungsfeldern gesellschaftlicher Aushandlungsprozesse und Priorisierungen bedarf. Aspekte wie Regulatorien oder Kommunikation werden

in einem abschließenden Kapitel dieses Papiers kurz angesprochen. Der gesellschaftliche Diskurs zur Transformation und den damit einhergehenden Konflikten, aber auch Chancen, muss jedoch an anderer Stelle stattfinden. Das vorliegende Statuspapier liefert valide Sachinformationen, die diesen Diskurs unterstützen können.

1. Was ist „Circular Economy“?

1. DEFINITION DER CIRCULAR ECONOMY

Der Begriff „Circular Economy“ hat sich im letzten Jahrzehnt etabliert für ein ökonomisches Modell, das die gesamte Wirtschaft und Gesellschaft umfasst und durch Maßnahmen im gesamten Lebenszyklus von Rohstoffen, Materialien und Produkten zum nachhaltigen Wirtschaften beitragen soll. Dieses Modell ist heute eine wesentliche Grundlage der Politik der EU und eng verknüpft mit den Zielsetzungen des Green Deals zu Klimaschutz und der Verringerung des Verbrauchs natürlicher Ressourcen. Die EU beschreibt die Circular Economy wie folgt:

„Ein Wirtschaftssystem, bei dem der Wert von Produkten, Materialien und anderen Ressourcen in der Wirtschaft so lange wie möglich erhalten bleibt und ihre effiziente Nutzung in Produktion und Verbrauch verbessert wird, wodurch die Auswirkungen ihrer Nutzung auf die Umwelt reduziert und das Abfallaufkommen sowie die Freisetzung gefährlicher Stoffe in allen Phasen ihres Lebenszyklus minimiert werden, auch durch Anwendung der Abfallhierarchie.“¹

Dies schließt Maßnahmen wie Wiederverwendung, Recycling und eine nachhaltige Gestaltung von Produkten zur Verlängerung ihrer Lebensdauer ein. Dieses Leitbild der Circular Economy liegt auch der deutschen Politik zu Grunde, so der aktuellen Entwicklung einer nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie.²

Um den Unterschied der Circular Economy als ökonomisches Modell zur „klassischen“ Kreislaufwirtschaft mit Fokus auf Abfallmanagement zu betonen, wird als deutsche Bezeichnung der Circular Economy häufig der Terminus „Zirkuläre Wirtschaft“ verwendet.

2. HISTORISCHE ENTWICKLUNG

Das Konzept „Circular Economy“ hat im Verlauf der letzten Jahrzehnte eine kontinuierliche Entwicklung durchlaufen. Der Fokus verlagerte sich dabei von einer reinen Abfallwirtschaft zu einem ganzheitlichen Ansatz für nachhaltiges Ressourcenmanagement. Das wachsende Bewusstsein für Umweltprobleme und die Dringlichkeit nachhaltiger Praktiken führten auch in der Wirtschaft zu einem Paradigmenwechsel. So konnte sich „Circular Economy“ von einem Nischenkonzept zu

einem integralen Bestandteil von Umwelt- und Nachhaltigkeitsstrategien auf nationaler und internationaler Ebene entwickeln.

Die Europäische Union hat die Idee der „Circular Economy“ aufgegriffen und in ihre Agenda für nachhaltige Entwicklung integriert. Auf europäischer Ebene wird sie als Instrument betrachtet, um die Ziele des Klimaschutzes, der Ressourceneffizienz, des Umweltschutzes und einer nachhaltigen Entwicklung zu fördern.

In der deutschen Gesetzgebung wurde der Begriff „Kreislaufwirtschaft“ erstmals im Abfallgesetz von 1994 erwähnt. Dabei standen vor allem Abfallvermeidung und Abfallverwertung im Fokus. Ziel war es, den linearen Ansatz der Entsorgung zu überwinden und Rohstoffe in einem geschlossenen Kreislauf zu führen.

Das aktuelle Kreislaufwirtschaftsgesetz spiegelt die neuesten Entwicklungen wider und betont die Notwendigkeit einer nachhaltigen und umweltfreundlichen Ressourcennutzung. Die Definition umfasst die Förderung von Ressourceneffizienz, die Stärkung des Recyclings und die Reduzierung schädlicher Umweltauswirkungen. Erstmals wird die Verantwortung der Akteure in der gesamten Produktionskette, von der Herstellung bis zur Entsorgung, hervorgehoben, und es wird eine umfassende Sichtweise auf den gesamten Lebenszyklus von Produkten gefordert.³

In der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie werden die Ziele der Ressourcenschonung und des Klimaschutzes explizit erwähnt: „Zirkuläres Wirtschaften soll der Schonung natürlicher Ressourcen, dem Schutz der Umwelt und der menschlichen Gesundheit sowie der Rohstoffsicherung dienen. Aufgrund eines erheblichen Potenzials zur Minderung der Emissionen von Treibhausgasen kann und soll zirkuläres Wirtschaften auch zum Klimaschutz beitragen.“⁴ Maßnahmen der Circular Economy müssen sich daher auch an diesen Zielen messen lassen.

¹ (Europäisches Parlament, 2023)

² (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 2023)

³ (Stiehl and Hirth, 2012)

⁴ (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 2023)

2. Prinzipien der Circular Economy

2.1. EBENEN DER KREISLAUFSCHLISSUNG UND INTERAKTION VON SEKTOREN

Entsprechend des Charakters der Circular Economy als ökonomisches Modell umfassen ihre Maßnahmen die gesamte Wirtschaft und Gesellschaft in Produktion und Konsumption. Die große Breite möglicher Maßnahmen wird oft in sogenannten „R-Strategien“ strukturiert (3R reduce, re-use, recycle) bzw. weiter ausdifferenziert im 9R- bzw. 10R-Schema.⁵

Im Zuge der Entwicklung der EU-Taxonomie wurden vier sogenannte “high-level categories of substantial contributions to Circular Economy (along the circular economy loop)” definiert:

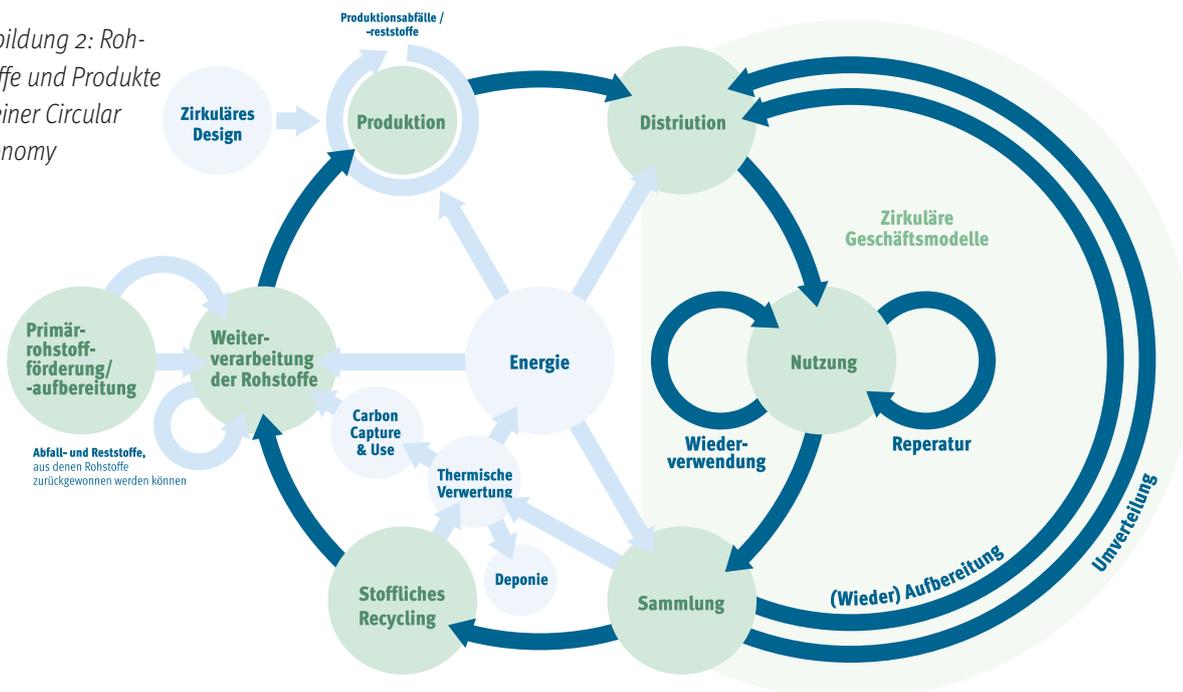
- » Circular design & production,
- » Circular use,
- » Circular value recovery,
- » Circular support.⁶

Diese Kategorien gliedern sich in zwei Bereiche. Sie umfassen einerseits Maßnahmen des Recyclings, d.h. der Schließung von Material- und Rohstoffkreisläufen als Weiterentwicklung der Abfall-/Entsorgungswirtschaft zur „Circular Economy“. In den anderen Bereich fallen alle anderen Maßnahmen der Circular Economy in der Wirtschaft insgesamt, also im Vorfeld der Entstehung von Abfällen, z.B. De-

sign von Produkten, Verlängerung der Nutzungsdauer etc. Hier bieten sich eine Vielzahl von Handlungsmöglichkeiten, an denen unterschiedliche Akteure beteiligt sind. So können Konsumenten an Stelle des Kaufs von Produkten Leih- oder Leasingmodelle nutzen; beim Design von Produkten kann auf die Minimierung des Materialbedarfs geachtet werden, genauso wie auf die spätere Langlebigkeit und Reparierbarkeit. Quantitative Untersuchungen an verschiedenen Produktklassen zeigen, dass eine Verlängerung der Nutzungszeit zu einer großen Reduktion von Ressourcenverbrauch und Emissionen führen kann. Um zu entscheiden, ob ein langlebiges Produkt vorteilhafter ist, bedarf es jedoch einer individuellen Lebenszyklusanalyse. Ist ein neues Produkt aufgrund technologischer Fortschritte im Einsatz sehr ressourcenschonend, kann der Ersatz sinnvoll sein.⁷ Dominiert der Herstellungsaufwand die Gesamtbilanz, ist es sinnvoller, das Produkt weiter zu nutzen und auf die Neuherstellung zu verzichten.⁸

Hat ein Produkt das Ende seiner Nutzungsdauer erreicht, können je nach Produktklasse, Zustand und technoökonomischen Randbedingungen unterschiedliche Strategien den Kreislauf teilweise oder vollständig schließen. Rohstoffe können auf unterschiedlichsten Größenskalen wiedergewonnen werden, von der atomaren Ebene über einfache oder komplexere Moleküle bis hin zu Komponenten oder Bauteilen. Die Größenskala der wiedergewonne-

Abbildung 2: Rohstoffe und Produkte in einer Circular Economy



⁵ (Kirchherr et al., 2017)

⁶ (European Commission. Directorate General for Research and Innovation., 2020)

⁷ (Hummen and Desing, 2021)

⁸ (Bakker et al., 2014)



Abbildung 3: Eine sortenreine Sortierung ist die Voraussetzung für das Recycling von Kunststoffen unter Erhalt der molekularen Strukturen (Quelle: Adobe Stock)

nen Rohstoffe spielt eine grundlegende Rolle für den gesamten Prozess und seine energetische, ökologische und ökonomische Bilanz.

Lässt sich ein Gesamtprodukt nicht weiter nutzen, können u.U. einzelne Komponenten weiterverwendet werden. Aktuelle Forschungsprojekte beschäftigen sich mit der Rückgewinnung von Elektronik-Komponenten, die auf irreversible Weise in Produkte integriert wurden, grundsätzlich aber in neuen Produkten wiederverwendet werden könnten. Beim Recycling von Lithium-Ionen-Batterien soll das neue Konzept des „direkten Recyclings“ das Aktivmaterial, in dem Lithium-Ionen eingelagert werden, direkt als Partikel aus Alt-Batterien zurückgewinnen.⁹ Diese Materialien können durch geeignete Behandlung dann reaktiviert und in neuen Batterien eingesetzt werden.

In anderen Fällen können molekulare Strukturen ganz oder teilweise erhalten bleiben, etwa bei Glas oder Polymeren. Andere Polymere lassen sich zu Ölen verarbeiten, in denen viele, aber nicht alle chemischen Bindungen gebrochen wurden. Papier wird auf der Ebene von Fasern recycelt, ähnliches ist möglich bei Textilien oder Faser-Verbunden. Die Länge der zurückgewonnenen Fasern verkürzt sich durch das Recycling und verringert ihre Qualität als Rohstoff.

Chemische Elemente sind in den hier relevanten Fällen die kleinstmöglichen, unveränderlichen Bausteine, die zurückgewonnen werden können. So ist das stoffliche Rückgewinnen elementarer Metalle auf dem Weg über Ionen ein gut etablierter Zweig der Recycling-Industrie. Doch schon aus thermodynamischen Gründen führt dieser Weg zu größeren Energieaufwänden als die Rückgewinnung größerer Einheiten oder der elementaren Metalle. Neben Rohstoff-

sind auch Energie- und Wasserströme essenziell für die Circular Economy. Energie treibt die Kreisläufe an und wird – trotz einzelner Schritte, bei denen Energie z.B. durch Verbrennung freigesetzt wird – für jede Kreislaufschließung benötigt. Damit die Circular Economy der Anforderung von Nachhaltigkeit und Klimaneutralität gerecht wird, muss die eingesetzte Energie „grün“ sein, sprich aus regenerativen Quellen stammen.

Wasser wird in zahlreichen Prozessen nicht nur als Rohstoff und Kühlmittel verwendet, sondern auch als Reinigungs- und Lösungsmittel benötigt. Der individuelle Wasserbedarf für viele Verfahren der Circular Economy ist hoch; notwendig ist also auch eine Schließung der beteiligten Wasserströme, ggf. über Sektorengrenzen hinweg, sowie die Rückgewinnung von Wertstoffen aus entstehenden Abwässern.

Eine vollständige Kreislaufschließung wird in der Praxis in vielen Fällen nicht erreichbar sein – sei es, weil die intendierte Nutzung des Produkts zu einer Dissipation der Rohstoffe führt oder unerwünschte Hilfsstoffe entfernt werden müssen, um Recyclingströme von guter Qualität zu erhalten, sei es aus ökonomischen Erwägungen.¹⁰ In der Praxis wird deshalb die Zuführung von Primärrohstoffen in einem gewissen Umfang notwendig sein. Gleichzeitig sollte ein besonderes Augenmerk darauf liegen, Verluste von Rohstoffen aus dem Kreislauf zu vermeiden, Verfahren und Konzepte zur Wiedergewinnung fein verteilter Rohstoffe zu entwickeln oder Materialien so zu substituieren, dass ihre Freisetzung keine unwiederbringlichen Verluste oder ökologischen Probleme nach sich zieht. Ein Beispiel wären bioabbaubare Polymere für Produkte, bei denen es nutzungsbedingt zu Abrieb und damit einer unkontrollierbaren weiträumigen Freisetzung kommt.

⁹ (Königsreuther, 2023)

¹⁰ (Friege and Kümmerer, 2022)

2.1 PRINZIPIEN ERFOLGREICHER KREISLAUFSCHLIESSUNGEN

Branchenübergreifende Prozesse für das Recycling inklusive der Stofftrennung stehen noch am Anfang. In einigen Bereichen wie Glas, Papier und Stahl existieren aber bereits brancheninterne Recyclinglösungen, die zwar noch nicht vollständig geschlossen sind, aber einen großen Anteil der Stoffkreisläufe in der Volkswirtschaft bilden.

Tabelle 1: Einsatz von Recyclingmaterialien in Deutschland (2014 – 2017)

Quellen: VDP – Verband Deutscher Papierfabriken (Papier), statista (Glas), Wirtschaftsvereinigung Stahl (Stahl)

in kt	Papier	Stahl			Glas
	Papier, Pappe, Karton (PPK)	Elektro-Stahl	Hochofen-Stahl	Gesamt	Behälterglas
Input Rohstoffe	26.448	13.700	33.061	46.761	4.251
davon Input Mineralien und Additive	3.775		27.631	27.631	1.651
davon Input Recycling-material	17.169	13.700	5.430	19.130	2.600
Output PPK, Stahl, Behälterglas	22.664	13.100	29.900	43.000	4.057
Anteil Recycling-material Altpapier, Schrotte, Glas	64,9 %	100 %	18 %	44,5 %	60 % (bei grünem Glas bis 90 %)
Anteil der Input Rohstoffe, die im Output enthalten ist	86 %	95,6 %	90 %	91,6 %	95 %
Rücklaufquote Recycling-material	75 %	47 %			84 %

Betrachtet man diese Kreisläufe, lassen sich einige Gemeinsamkeiten erkennen; so basieren sie alle auf der stofflichen Verwertung und dem mechanischen bzw. thermischen Recycling.

Einige Grundprinzipien sind auch für eine erfolgreiche Schließung anderer Kreisläufe relevant:

- » Je sortenreiner der Wertstoff gesammelt werden kann, desto geringer der Aufwand beim Recycling und desto höher die Qualität des Sekundärrohstoffs (Beispiel: getrennte Sammlung von Weiß-, Grün- und Braunglas). Das setzt voraus, dass
 - die Rohstoffe bereits möglichst sortenrein eingesetzt werden bzw. sich Fremdkomponenten (z.B. Deckel) gut entfernen lassen
 - entweder bereits bei der Sammlung auf eine getrennte Erfassung geachtet wird oder Sortieranlagen in der Lage sind, die verschiedenen Stoffströme sauber zu trennen
- » Bei Wertstoffen, die wenig sortenrein gesammelt werden können, ist der Reinigungsaufwand höher bzw. der Qualitätsverlust des gewonnenen Rezyklats größer.

» Je weiter verstreut Stoffströme anfallen (z.B. in Verbraucherprodukten im Gegensatz zu Produktionsnebenströmen), desto aufwändiger ist die Etablierung geeigneter Sammelsysteme und desto wichtiger ist eine möglichst klare Kennzeichnung der Produkte hinsichtlich der enthaltenen Materialien, um eine korrekte Trennung durch den Verbraucher zu erleichtern.

Doch selbst bei etablierten und seit Jahrzehnten eingesetzten Materialien hat die Einrichtung von Sammel- und Recycling-Systemen viel Zeit und Aufwand erfordert. Für neue Materialien bzw. neue Produkte, deren Zusammensetzung (wie im Fall von Batterien) sich derzeit noch stetig ändert und bei denen sich die Menge der rezyklierbaren Materialien innerhalb relativ kurzer Zeiträume stark ändert, bestehen weit größere Herausforderungen. Zu Beginn des Produktlebenszyklus sind noch keine Altmaterialien vorhanden, die für die Auslegung der Recyclingverfahren herangezogen werden können. Gleichzeitig besteht das Risiko, dass die Innovation schneller ist als der Aufbau der Recyc-



Abbildung 4: Glas gehört zu den Materialien mit sehr hohen Recyclingquoten. (Quelle: Adobe Stock)

lingkreisläufe und sich am Ende der Produktlebensdauer bereits neue Technologien entwickelt haben, so dass die zurückgewonnenen Rohstoffe aus den frühen Produktgenerationen für die neuen Produkte nicht

mehr benötigt werden. Gerade hier besteht eine neue Herausforderung für Forschung, Wirtschaft und Politik, langfristige Strategien für den Umgang mit spezifischen Rohstoffen und Materialien zu entwickeln.

3. Der Kohlenstoff-Kreislauf

Der Kohlenstoff-Kreislauf ist einer der wichtigsten Kreisläufe und verknüpft gleichzeitig mehrere Sektoren (Chemie, Energie, Verkehr, Gebäude/Wärme). Zusätzlich spielt er eine erhebliche Rolle für das Klima und die Biosphäre. Auf planetarer Ebene ist der Kohlenstoffkreislauf geschlossen.

Beim Einsatz kohlenstoffhaltiger Rohstoffe wird am Ende der Nutzungsperiode der Produkte, wenn alle weiteren Möglichkeiten der Kreislaufschließung ausgeschöpft sind, entweder direkt oder nach Verbrennung CO₂ freigesetzt. Diesen anthropogenen Eintrag von CO₂ in die Atmosphäre gilt es möglichst zu vermeiden oder, wo dies nicht möglich ist, das CO₂ wieder aus der Atmosphäre zu entfernen.

Mit dem novellierten Klimaschutzgesetz von 2024 möchte Deutschland bis 2045 treibhausgasneutral sein.¹¹ ¹² Die Schließung des Kohlenstoffkreislaufs könnte dazu einen wesentlichen Beitrag leisten. In Politik und Industrie wurde dafür der Begriff „Kohlenstoff-Management“ oder „Carbon Management“ geprägt.¹³

3.1. KOHLENSTOFFHALTIGE INDUSTRIEPRODUKTE

Die Vision der Circular Economy für Kohlenstoff muss die vielfältigen Anwendungsfelder kohlenstoffhaltiger Komponenten in der heutigen „fossilen Gesellschaft“ berücksichtigen. Sie lassen sich unterscheiden in:

- » Energieträger zur Bereitstellung von Wärme, elektrischer Energie, Antrieb für Mobilität oder Maschinen (Kraft- und Brennstoffe wie Benzin, Diesel, Kerosin, Heizöl, Heizgas, Erdgas, Kohle)
- » Stoffliche Nutzung als Rohstoff für die Herstellung von Produkten (Papier, Kunststoffe, Stahl, Chemieprodukte, Holz als Bau- und Werkstoff)
- » Hilfsstoff in der Industrie: z.B. Reduktionsmittel wie Kohlenstoff oder Methan in der Metallurgie oder bei der Wasserstoff-Erzeugung, Lösungsmittel in der Chemie

Dazu kommen Stoffströme der Land- und Forstwirtschaft sowie Futter- und Lebensmittelherstellung. Auch mineralische Baustoffe enthalten große Mengen Kohlenstoff in Form von Carbonaten. Mineralien können bei industrieller Nutzung sowohl Quelle (z.B. beim Klinker- oder Kalkbrennen) als auch Senke (bei der Karbonatisierung) von CO₂ darstellen.

¹¹ (Bundesregierung, 2024a)

¹² (Bundesregierung, n.d.)

¹³ (Bundesregierung, 2024b)

3.2. KONZEPTE ZUR KREISLAUFSCHLIESSUNG

Je nach Anwendungsfeld unterscheiden sich die denkbaren Konzepte zur Schließung des Kohlenstoffkreislaufs und die Dauer der Kohlenstoffspeicherung in den Zwischen- oder Endprodukten grundlegend. So ist bei zentralen Anwendungen die Schließung des Kohlenstoffkreislaufs durch Rückgewinnung und Nutzung des CO₂ innerhalb des industriellen Prozesses technisch realisierbar, während bei dezentraler Freisetzung, z.B. in der Mobilität, das CO₂ aus der Atmosphäre zurückgewonnen werden muss, um den Kohlenstoffkreislauf zu schließen.

Die technischen Ansätze zur Schließung des anthropo-

genen Kohlenstoffkreislaufs lassen sich für kohlenstoffhaltige Produkte in Anlehnung an ¹⁴ in folgende Kategorien zusammenfassen (Abbildung 5):

- » Direkte Wieder- und Weiterverwendung der Produkte
- » Mechanisch-thermisches Recycling, z.B. durch Wiederaufschmelzen, Aufreinigung, Formgebung (s.u.)
- » Chemisches Recycling durch Zerlegung kohlenstoffhaltiger Produkte in einzelne chemische Bausteine (s.u.)
- » Umsetzung der Produkte in Oxidations-, Fermentations- oder Calcinationsprozessen und Rückgewinnung des entstandenen CO₂ an Punktquellen oder aus der Atmosphäre
- » Rückgewinnung des CO₂ über Pflanzenwachstum und Nutzung der Biomasse als Rohstoff

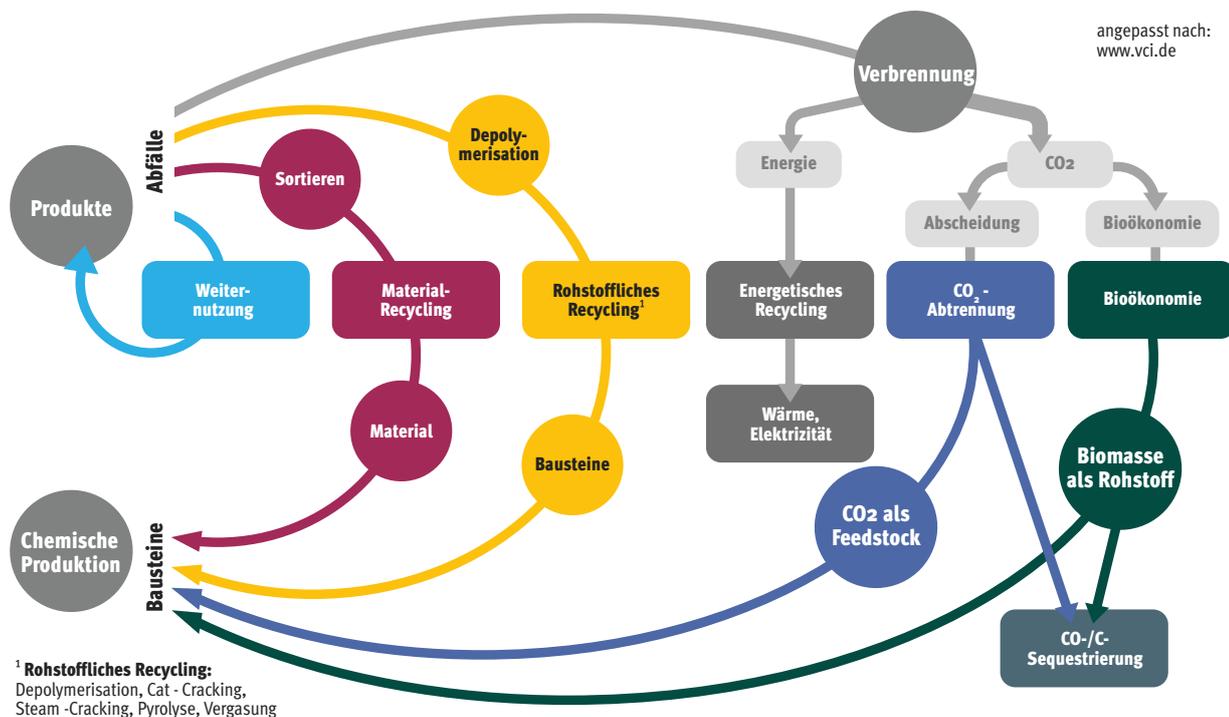


Abbildung 5: Kreisläufe für Kohlenstoff (angepasst nach <https://www.vci.de>)

Zur technischen Realisierung der verschiedenen Ansätze existieren bereits eine Vielzahl von Optionen in unterschiedlichen technischen Entwicklungsstadien. Um eine kommerzielle Umsetzung im großen Maßstab zu unterstützen, sind u.a. folgende Maßnahmen notwendig:

- » Verbesserung der Funktionalität der Produkte nach der Rezyklierung (Vermeidung von „Downcycling“)

- » Erhöhung der stofflichen, energetischen sowie damit einhergehenden ökonomisch-ökologischen Effizienz der Prozesse und deren anlagentechnischer Umsetzung
- » Erschließung des verfügbaren und mobilisierbaren Mengenpotenzials von Zwischenprodukten des Kreislaufs, respektive entlang von Kaskaden
- » Politische Weichenstellungen und Abbau daraus resultierender rechtlicher Hürden

¹⁴ (Schlotter et al., 2021)

Über die Mengenpotenziale kohlenstoffhaltiger Komponenten gibt es sehr gute Übersichten:

Tabelle 2: Abschätzung zu Mengenpotenzialen der Zwischenprodukte für die verschiedenen Kategorien von zukünftigen Kohlenstoff (C)-Quellen. ¹⁵ Der CO₂-Gehalt der Luft liegt bei ca. 420 ppm und die Gesamtmenge damit deutlich unter der in Ozeanen und Lithosphäre, aber weit über den anderen u.g. Quellen.

Quelle	Geschätztes Aufkommen	Bereits in Nutzung	Kohlenstoffgehalt	Kohlenstoff
Biogene Rohstoffe (gebundenes C)				
Nachwachsende Rohstoffe	2,58 Mio. ha	100 %		ca. 80-110 Mio. t
Holz	127,2 Mio m ²	100 %	45-50 %	
Reststoffe, Nebenprodukte, Abfälle	86-140 Mio t TM	65-84 %	(der Trockenmasse)	
Luft (CO₂)	Unbegrenzt , aber abh. von verfügbarer Energie, Fläche und teilweise Wasser			
Punktquellen (CO₂)				
Industrie	105.948.000 kt/a	teils	unterschiedlich	ca. ??? Mio. t
Biogas/ Biomethan	28.830.000 kt/a	i.d.R. nein	10-95%	
Biomethanol	71.000 kt/a	teils	97-98%	
Biomasse-HKW	6.380.000 kt/a	nein	< 20%	
Plastikabfälle für chemisches recycling (geundenes C)	3.500.000 kt/a	0,2 %	80 %	ca. 2,8 Mio. t

Die Zwischen- oder Endprodukte unterscheiden sich nicht nur in ihren Mengenpotenzialen, sondern auch sehr stark hinsichtlich des Energiebedarfs für ihre Umwandlung in Bausteine, die in den Produktions- und Nutzungskreislauf zurückgeführt werden können. In Abhängigkeit von den sonstigen Randbedingungen kommen die Autoren für die Bilanzierung von Material- und Energieflüssen deshalb zu unterschiedlichen Prognosen hinsichtlich der Stoffmengenströme und der für die Schließung des Kohlenstoffkreislaufs notwendigen Energie.¹⁶ Wie bei anderen Kreisläufen gilt für Reinstoffe die grobe Einschätzung: Je größer der Kreislauf, d.h. je mehr (energieintensive) Prozessschritte dieser enthält, desto höher der Aufwand. Im Fall der Kreislaufschließung über Biomasse schlägt er sich u.a. im Energie- und Wasserbedarf nieder, wobei über die Fotosynthese Sonnenlicht, also eine erneuerbare Energie, genutzt werden kann.

Allerdings bezieht sich diese Faustregel zum Energieaufwand nicht auf Stoffgemische oder verschmutzte Ströme; dort kann der Aufwand für Trennung und Reinigung deutlich höher sein als die Energie zum Wiederaufbau der Moleküle aus CO₂ oder Synthesegas.

Dazu kommt, dass Kohlenstoff sehr viel vielseitiger genutzt wird als die meisten anderen Elemente und sich nicht auf den technischen Einsatz beschränkt. Aus Pyrolyseöl oder Synthesegas, aber auch über Biomasse

sind eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Produkte zugänglich; auch das kann die Auswahl des Recyclingweges beeinflussen.

Neben der Kreislaufführung besteht auch die Möglichkeit, CO₂ abzutrennen und langfristig zu speichern („Sequestrierung“)¹⁰; dafür existieren verschiedene Konzepte (z.B. Speicherung von CO₂ in Form von Gas, in mineralisch gebundener Form oder als elementarer Kohlenstoff ^{17, 18}) und Demonstrationsprojekte. Die Entnahme von CO₂ aus der Luft durch technische Maßnahmen oder durch Pflanzen und die Speicherung des gewonnenen Kohlenstoffs bzw. CO₂ wird als „Negative Emission Technology (NET)“ bezeichnet. Die Sequestrierung von Kohlenstoff oder kohlenstoffhaltigen Molekülen kann die Kreislaufführung in geschlossenen Stoffkreisläufen ergänzen, kann sie aber nicht ersetzen. Nach Analysen des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ist die Sequestrierung von CO₂ oder Kohlenstoff für das Erreichen der Klimaneutralität notwendig, um unvermeidbare Emissionen sog. „hard-to-abate-emissions“, z.B. in der Landwirtschaft, Metallurgie, Zementherstellung, kompensieren zu können ³.

¹⁵ (Brosowski et al., 2021)

¹⁶ (Meys et al., 2021)

¹⁷ (Stoppel et al., 2024)

¹⁸ (Sánchez-Bastardo et al., 2021)

4. Verfahrenstechnik für die Circular Economy

Die Kreisläufe der Circular Economy sind vielfältig; deshalb ist auch die Bandbreite der Rückgewinnungsverfahren und technischen Lösungen breit gefächert. Gemeinsam ist ihnen, dass Verfahrenstechnik und teilweise auch Biotechnologie eine wesentliche Rolle für die praktische Umsetzung spielen. Außerdem teilen viele der Ansätze für die Kreislaufschließung verfahrenstechnische Grundprinzipien. Im Folgenden ist der Forschungsbedarf in den einzelnen Disziplinen sowohl übergreifend als auch mit Blick auf spezifische Kreisläufe dargestellt.¹⁹

Die Gliederung orientiert sich an der EU-Taxonomie²⁰ und deckt Verfahrenstechnik für die dort genannten

“high-level categories of substantial contributions to Circular Economy (along the circular economy loop)” Circular Design und Produktion, Circular Value Recovery und Circular Support ab.

Der Unterpunkt „Circular Use“ der EU-Taxonomie umfasst zum einen Modelle zur Verlängerung der Lebensdauer durch Reparatur, zum anderen neue Geschäftsmodelle wie „shared economy“ oder „Product as a service“, d.h. den Verkauf von Leistungen anstelle von Produkten (z.B. eine bestimmte Anzahl von Waschgängen statt einer Waschmaschine). Da „Circular Use“ wenig verfahrenstechnische Aspekte enthält, wird dieser Aspekt in diesem Papier ausgeklammert.

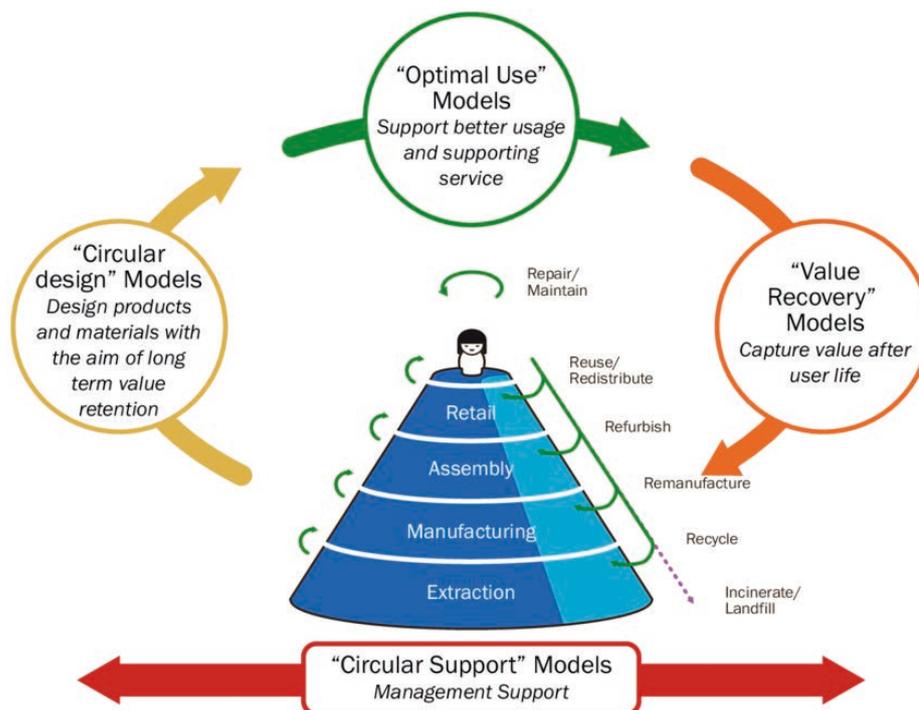


Abbildung 6: Kategorisierung von Beiträgen zur Umsetzung einer Circular Economy (Kategorien der EU-Taxonomie)²¹

4.1 VERFAHRENSTECHNIK FÜR CIRCULAR DESIGN UND PRODUKTION

Circular Design und Produktion umfassen die Gestaltung von Produkten und Anlagen, die durch eine hohe Ressourceneffizienz, Langlebigkeit, Funktionalität, Mo-

dularität oder leichte Reparierbarkeit sowie durch die Auswahl rezyklierbarer oder kompostierbarer Materialien die Circular Economy unterstützen. Dazu gehören aber auch Prozesse und Verfahren, die die Circular Economy ermöglichen, sowie die Entwicklung und Produktion neuer Materialien, die den Ansprüchen der

¹⁹ Im Rahmen dieses Papiers sind einzelne Stoff- oder Produktkreisläufe als Fallbeispiele aufgenommen, um zu zeigen, wie die verschiedenen Verfahrensschritte zusammenwirken. Für Details zu weiteren Stoffkreisläufen sei auf die weiterführende Literatur in Kapitel 8 verwiesen.

²⁰ (European Commission. Directorate General for Research and Innovation., 2020)

²¹ (European Commission. Directorate General for Research and Innovation., 2020)

Circular Economy genügen – sowohl hinsichtlich der Wiederverwertbarkeit als auch als Ersatz für bedenkliche Inhaltsstoffe.

4.1.1. CIRCULAR DESIGN

Im bisherigen Produktionsverhalten lassen sich einige Trends ausmachen: Die Produktionszyklen verkürzen sich durch immer schnellere Innovation, Produktion und technische sowie psychologische Obsoleszenz stark. Gleichzeitig nimmt die Komplexität der Produkte hinsichtlich der verwendeten Materialien und auch der Diversität der Verbindungen der Materialien untereinander weiter und schneller zu.

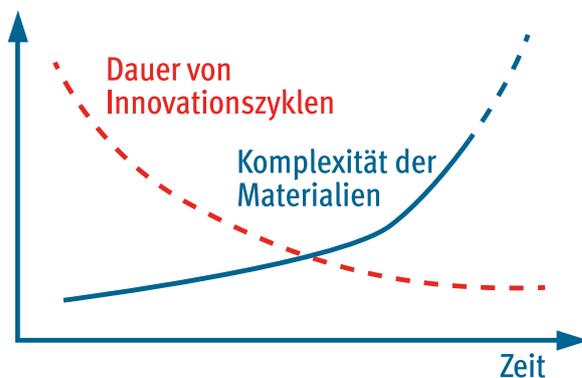


Abbildung 7: Gegenläufigkeit von Innovationszyklen und Komplexität der Materialien (Quelle: TU Dresden)

Ein Ziel der Circular Economy ist, die Produktions- und Produktzyklen wieder zu verlängern bzw. Innovation von diesen Trends der kreislaufhinderlichen Komplexität zu entkoppeln. Dafür wurde auf EU-Ebene intensiv an einer neuen Ökodesign-Verordnung²² gearbeitet, welche auf der bestehenden Ökodesign-Richtlinie aufbaut und das Ziel verfolgt, „nachhaltige Produkte in der EU zur Norm zu machen“. Dies soll u.a. dadurch erreicht werden, dass beim Design eines Produktes Aspekte wie Haltbarkeit, Wiederverwendbarkeit, Nachrüstbarkeit und Reparierbarkeit berücksichtigt werden.

Eine besondere Rolle spielt dabei z.B. die Fügetechnik. Während des Gebrauchs müssen die Verbindungen zwischen einzelnen Komponenten verlässlich sein und ggf. auch starker Beanspruchung standhalten. Gleichzeitig stehen feste Verklebungen oder Verschweißungen der Demontage im Weg. Forschung und Entwicklung arbeiten deshalb an Lösungen für “Debonding on Demand” (DoD). Die Klebeverbindungen sind dabei so konzipiert,

dass sie mit Hilfe geeigneter Trigger nach Gebrauch möglichst rückstandsfrei lösbar sind.²³

Design for Circularity ist nicht nur auf der Produkt-, sondern auch auf der Materialebene möglich. So können geeignete Additive in thermoplastischen Kunststoffen das Material stabilisieren und Vorschädigungen durch Oxidation oder Licht in der Nutzungsphase vermeiden. Damit kann nicht nur die Nutzungsdauer verlängert, sondern auch der Abbau von Polymerketten während der wiederholten Verarbeitung vermieden werden. Verbundwerkstoffe stellen Recycler oft vor große Herausforderungen. Im Fall von Multischichtfolien arbeiten Produktentwickler deshalb beispielsweise an Monomaterialien, die die gleichen Funktionalitäten bieten, aber leichter wieder verwertet werden können. Die Grundlage bilden häufig Massenkunststoffe wie Polyethylen, die mit einer sehr dünnen Barrierschicht versehen werden, die beim Recycling nicht stört.^{24, 25}

Ansätze wie diese reichen bis auf die Ebene des Moleküls und seiner Funktionalität: Das “Molekulare Design” befasst sich mit der theoretischen Vorhersage und praktischen Gestaltung von Molekülen mit spezifischen Eigenschaften und Funktionen, beispielsweise kontrolliert spaltbaren Verbindungsstellen oder Eigenschaften, die eine leichte Auftrennung aus Mischungen erlauben. Herausforderungen für neue chemische Bausteine bestehen jedoch unter anderem im starken „Lock-In“-Effekt der bestehenden Materialien, der dafür ausgelegten Prozesse und Infrastruktur sowie bisherigen Recycling-Verfahren, die solche neuen Vorteile nicht nutzen könnten.

Dazu kommt die lange Lebensdauer vieler Produkte, die sich – wie Batterien – außerdem ständig weiterentwickeln und in Bauweise und Zusammensetzung verändern. Die Entkopplung von Produktentwicklung und Recycling machen das Design for Circularity schwierig und setzen eine hohe Transparenz voraus. Die Standardisierung von Materialien, Komponenten oder ganzen Produkten kann dazu beitragen, eine zu große Diversifikation zu verhindern bzw. die Passfähigkeit zu bestehenden oder im Aufbau befindenden Recycling-Systemen sicherzustellen. Entsprechende Normungsbedarfe wurden im Rahmen der Normungsroadmap Circular Economy zusammengetragen.²⁶

Ein interessantes Konzept im Produktdesign setzt bei dem Gedanken an, dass eine Circular Economy immer im

²² (Vertretung in Deutschland, 2023)

²⁴ (Jovic et al., 2022)

²⁶ (DIN e.V. et al., 2023)

²³ (Gemeinschaftsausschuss Klebtechnik, 2024)

²⁵ (Gonçalves et al., 2024)

Widerstreit mit dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik steht. Mit Hilfe der statistischen Entropie wird evaluiert, welches Design zu einer minimalen Verdünnung bzw. Verteilung von Rohstoffen im Produkt, in Produktnebenströmen und im Recyclingprozess führt. Je mehr Materialien in einem Produkt vorhanden sind und je ähnlicher ihre Konzentration, desto höher ist die statistische Entropie und desto schwieriger ist das Recycling. Das Konzept ist in diversen Fallstudien beschrieben.^{27,28,29,30}

Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf

- » Klare Randbedingungen für die Einführung, Herstellung und das Recycling neuer Werkstoffe, um ggf. Lock-In-Effekte zu vermeiden
- » Roadmapping und Definition von Mindest-Fähigkeiten einer zukünftigen Recycling-Infrastruktur als Orientierungshilfe beim Produktdesign
- » Einpreisung von End-of-Life-Kosten in die verkauften Produkte
- » Transparenz über die Inhaltsstoffe jedes einzelnen Produkts, besonders bei schnellen Technologiewechseln
- » Standardisierung von Werkstoffen, Komponenten und/oder Produkten/ Produktklassen
- » Neudefinition von „Abfällen“ und end-of-waste-Eigenschaften im Rechts-/Regulierungsrahmen, um eine möglichst weitgehende Nutzung zu ermöglichen

Um den Wiedereinsatz und das Recycling eines Produkts von der Herstellung an zu unterstützen, ist beim Design und der Materialauswahl eine verwertungsfördernde Funktionalität neuer Werkstoffe und Produkte wichtig. Das beinhaltet

- » die De- und Wiedermontage-Fähigkeit von verwen-

deten Werkstoffen und Bauteilen, z.B. durch die Entwicklung geeigneter Füge-techniken wie Klebungen mit „Debonding-on-Demand“-Funktionalität.

- » die Entwicklung rezyklierbarer Monomaterialien, die reinstofflich Verbundmaterialien ersetzen können
- » die Optimierung von Legierungen, so dass diese sich besser recyceln lassen– beispielsweise durch eine Reduzierung der Komplexität in der Zusammensetzung der Legierungen³¹ sowie von Materialverbunden.³²

4.1.2. ANLAGEN FÜR DIE CIRCULAR ECONOMY

In der Vergangenheit wurden Anlagen der petrochemischen und chemischen Industrie häufig so groß wie möglich geplant. Hintergrund war das Streben nach der Maximierung von „Economies of Scale“, das sich in „World-Scale“-Anlagen verwirklichen ließ. Diese Entwicklung wurde durch das zentrale Vorkommen bzw. die zentrale Anlieferung von Rohstoffen (z.B. Ölquellen, Pipelines) begünstigt.

Die Circular Economy bringt in Teilen einen Paradigmenwechsel mit sich. Viele der Materialien und Rohstoffe für das Recycling fallen im Regelfall dezentral an; das Gleiche gilt auch für erneuerbare Rohstoffe wie z.B. Biomasse. Hier muss eine gute Balance gefunden werden zwischen der kritischen Untergröße von Anlagen aus Sicht von Technik und Wirtschaftlichkeit und dem Aufwand für Sammelsysteme und Logistik mit Blick auf Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit. Innerhalb der Wertschöpfungsketten muss geprüft werden, ob eine Aufteilung sinnvoll ist und beispielsweise einige frühe Schritte in kleineren Anlagen dezentral ausgeführt werden, um



Abbildung 8: Anlagen, die aus wiederverwendbaren Modulen aufgebaut werden, lassen sich flexibel an unterschiedliche Anforderungen anpassen.
(Quelle: DECHEMA e.V./ Hannibal)

²⁷ (Roithner et al., 2022)

²⁸ (Velazquez Martinez et al., 2021)

²⁹ (Nimmegeers and Billen, 2021)

³⁰ (Dahmus and Gutowski, 2007)

³¹ (Raabe, 2023)

³² (DERA Deutsche Rohstoffagentur, 2023)

dann gut transportfähige einheitliche Stoffströme zentral in größerskaligen Anlagen weiter zu verarbeiten.

Modulare Anlagen, z.B. für das Recycling von Stoffströmen, können dezentral aufgebaut und flexibel an veränderte Produktionsbedingungen angepasst werden und ermöglichen so eine effizientere Nutzung der Anlage. Modular aufgebaute Systeme können Synergieeffekte besser nutzen und vermeiden, dass Prozesse oder Anlagen mehrfach entwickelt und gebaut werden. Gleichzeitig ermöglichen sie eine schnellere Entscheidungsfindung und Prozessabwicklung, da sie ein größeres Parameterfenster und damit einen größeren operativen Bereich abdecken. So können sie auch schneller auf Veränderungen reagieren. Zudem wird bei dezentralen Systemen das Risiko auf mehrere Einheiten verteilt, was zu einer geringeren Fehleranfälligkeit des gesamten Systems führen kann. Bei der Umkonfigurierung der modularen Anlage hilft die modulare Automatisierung, die eine hohe Autonomie der einzelnen Module ermöglicht.³³ Durch die Wiederverwendung von modularen Einheiten kann die Flexibilität der Anlagenutzung erhöht werden.³⁴ Dies kann insbesondere beim Recycling gemischter Kunststoffarten von Vorteil sein, da hier die Anforderungen an die Anlage variieren können.

Mit digital vernetzbaren Lösungen für effiziente Automationssysteme können Unternehmen zu Wegbereitern von effizienten Kreislaufösungen werden. Durch „dezentrale Intelligenz“, d.h. der Verlagerung von Steuerung und Logik vom Schaltschrank direkt an die Maschine, können robuste Sensoren und modell-gestützte Automatisierung für das zuverlässige Erfassen, Verarbeiten und Übertragen relevanter Produktionsdaten und flexibler, wechselnden Randbedingungen angepasster Anlagensteuerung sorgen.

Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf

- » Entwicklung von Technologien in modularen Apparaten und Anlagen zur effizienten dezentralen Trennung, Wiederverwertung und Wiederaufbereitung von Abfallströmen
- » Entwicklung von standardisierten, modularen Einheiten, die flexibel kombiniert werden können, um den Bedarf verschiedener Anwendungen zu erfüllen.
- » Erforschung von Technologien, die es ermöglichen, einzelne Module nahtlos in bestehende Systeme zu integrieren.
- » Forschung zu dezentralen Steuerungssystemen, die eine optimale Leistung und Ressourcennutzung ge-

währleisten. Dabei ist auch die Optimierung des Gesamtsystems, welche nicht gleich der Summe der einzelnen Optima ist, eine wesentliche Aufgabe.

- » Implementierung von vernetzten Systemen und IoT (Internet of Things)-Technologien, um eine effiziente Kommunikation zwischen den Modulen und eine Fernüberwachung und Steuerung des Gesamtsystems zu ermöglichen.

4.2. VERFAHRENSTECHNIK FÜR CIRCULAR VALUE RECOVERY: RE-USE, REPAIR, RECYCLE

Unter „Circular Value Recovery“ fasst die EU-Taxonomie die Sammlung und Logistik von Neben- und Abfallströmen, die Rückgewinnung von Rohstoffen und Materialien aus den Abfallströmen, die Wertschöpfung aus Biomasse-Rest- und Nebenströmen (s. dazu Kapitel 4.3.3 „Ansätze der Bioökonomie“) und die Wiedernutzung von Abwasser.

4.2.1. SAMMELSYSTEME: TRACK & TRACE FÜR WERTSTOFFE

Die Kreislaufführung auf größeren Skalen, also auf der Ebene von Komponenten oder Werkstoffen, kann nur dann gelingen, wenn ausreichend Information zur Beschaffenheit der Komponenten verfügbar ist. In diesem Zusammenhang werden deshalb Ansätze eines sog. digitalen „Produktpasses“ diskutiert und in ersten Vorhaben untersucht. Materialien und Produkte sollen zukünftig eindeutig identifizierbar sein und mit einer digitalen Datenbank, die Auskunft über Herkunft, Genese etc. gibt, verknüpft werden. Auch die neuen Ökodesign-Verordnung³⁵ unterstreicht die Bedeutung des „digitalen Produktpass“ für die Schließung von Kreisläufen.

Dafür sind geschickte Ansätze der Markierung von Komponenten gefragt. Dies kann herausfordernd werden, wenn auf kleinster Subkomponentenebene oder gar Grundmaterialebene – im Sinne einer eindeutigen Identifizierbarkeit - markiert werden soll. Obgleich sich Barcodes und RFIDs (Radio Frequency Identifications) auf größerer Skala, z.B. für einzelne Produkte oder Bauteile, bewährt haben, sind sie zur Markierung von Materialkomponenten in der Regel nicht praktikabel. Dort wird beispielsweise auf partikuläre Markieradditive gesetzt. Eine weiterreichende Vision sind sog. kommunizierende Partikel³⁶. Sie stellen ein Objekt nicht nur

³³ [new.abb.com/control-systems/de/modulare-automation](https://www.new.abb.com/control-systems/de/modulare-automation)

³⁴ www.hsu-hh.de/aut/modellierung-automatisierung-integration-und-optimierung-von-modular-aufgebauten-elektrolyse-anlagen-emodule

³⁵ (Vertretung in Deutschland, 2023)

mit einem Identifikationsmerkmal aus, sondern können zudem auch Informationen über seine Historie „sammeln“, was eine Zustandsbeurteilung und damit z.B. eine Entscheidung bzgl. der Recyclingfähigkeit ermöglicht.

Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf

- » Erweiterung der Analyse, Sortierung und Trennung von Kunststoffen über Hauptpolymere hinaus in weitere Unterklassen
- » Analyse, Sortierung und Trennung von metallischen Werkstoffen/ Legierungen auf unterschiedlichen Materialebenen
- » Entwicklung von Künstlicher Intelligenz und Robotik für die Sortierung
- » Einsatz von Tracern in Werkstoffen, die die Erkennung und Unterscheidung der Abfallfraktionen erleichtern.

4.2.2. RÜCKGEWINNUNG VON MATERIALIEN AUS ABFALLSTRÖMEN

Für die Rückgewinnung von Wertstoffen aus Abfallströmen kommen mehrere Ebenen in Betracht: Von mechanischen und weiteren stofflichen, d.h. physikalischen, Verfahren der Trennung, Reinigung und Wiederverwertung (z.B. durch Schmelzen oder Lösen) über die chemische Trennung auf unterschiedlichen Molekülgrößen bis hin zu gasförmigen Molekülen oder Atomen sind eine Vielzahl von Kreislaufschließungen möglich. Oft steigt der Aufwand mit der Zahl der Prozessschritte und des nötigen Energieaufwandes, je kleiner die „Bausteine“ werden; gleichzeitig ergeben sich dadurch mehr Möglichkeiten zur Aufreinigung und Trennung und somit für den Wiedereinsatz in neuen Produkten.

Aufgrund einer großen Produkt- und Materialvielfalt sowie kurzer Innovationszyklen variiert auch die Zusammensetzung von Abfallströmen immer stärker. Um diesem Fakt Rechnung zu tragen, müssen Recyclingverfahren ebenfalls komplexen Ansprüchen genügen und parallel zu den Produktionsverfahren entwickelt werden.

Handlungsempfehlungen

- » Eine schnelle, umfassende Bewertung von Kreislaufoptionen nach ihren Energie-, Wasser- und Hilfsstoffbedarfen, aber auch Emissionen sollten schon in frühen Entwicklungsphasen zur Verfügung stehen und beispielsweise durch entsprechend flexible digitale Methoden und Modelle unterstützt werden.
- » Branchenübergreifend sind neue gekoppelte Verfah-

ren weiterzuentwickeln, d.h. stoffliche Recycling-Verfahren sollten mit energetischen Verfahren gekoppelt werden, z.B. über die Koppelglieder CO₂ oder H₂.

- » Ähnlich dem Produktionszyklus ist die Ausrichtung auf ein „On Demand Recycling“ zu forcieren. Neben dem „Process to Order“ bei der Fertigung sind kleine, schnell adaptierbare und flexible Recyclingmaßnahmen zu installieren, welche die Materialien und Produkte nach dem Ende der Nutzung auch chargenmäßig aufnehmen können. Dies muss den Aufbau einer Recyclingkette aus modularisierten Verfahren beinhalten.

4.2.3. MECHANISCHE AUFBEREITUNG: ZERKLEINERN, KLASSIEREN, FESTSTOFFTRENNUNG

Typische Anwendungen: Batterien, Elektrogeräte, gemischte Kunststoffabfälle

Viele der anfallenden Abfallströme müssen nach der Sammlung und zugehörigen Logistik für die chemische Weiterverarbeitung vorbereitet werden. Nach einer ggf. erfolgenden Demontage sind typische verfahrenstechnische Methoden das Zerkleinern / Shreddern, um Werkstoffverbunde aufzuschließen, sowie das Klassieren, um geeignete enge Partikelfractionen der physikalischen Trennung zuzuführen. Die physikalische Trennung bedarf eines Trennmerkmals, also eines Unterschieds in den physikalischen Eigenschaften, bspw. Magnetisierbarkeit, Feststoffdichte, Oberflächenladung, Benetzbarkeit oder optische / spektroskopische Eigenschaften. Die Umsetzung der physikalischen Trennprozesse erzeugt spezifische Konzentrate, die chemischen bzw. metallurgischen Trennverfahren zugeführt werden, bei denen die chemischen Elemente als marktfähige Produkte zurückgewonnen werden können.

Teilströme mit geringen Wertpotential, bspw. die sog. Shredderleichtfraktion im KFZ-Recycling, werden auch einer thermischen Verwertung als Ersatzbrennstoff zugeführt. Perspektivisch kann für solche Materialien auch der Kohlenstoffkreislauf geschlossen werden.

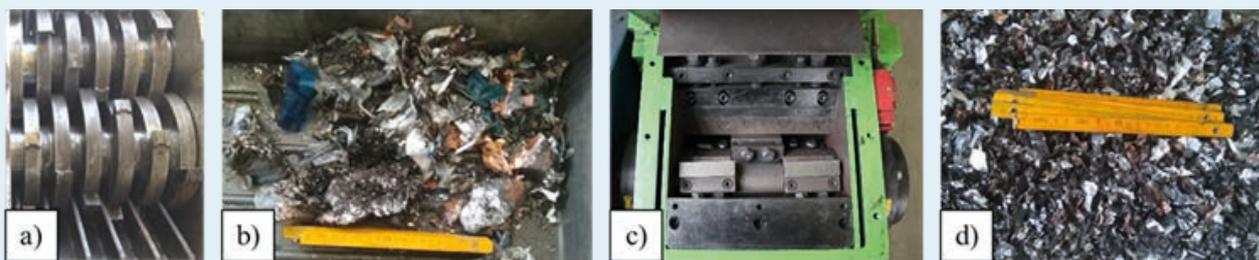


Abbildung 9 zeigt die für den ersten (a) und zweiten (c) Zerkleinerungsschritt angewandten Rotorscheren im Pilotmaßstab und deren Zerkleinerungsprodukte (b und d) bei einem Austragsrost von 20 mm (Quelle: TU Bergakademie Freiberg)

Fallbeispiel: Lithium-Ionen-Batterien

Der wichtigste neue Batterietyp, der in den letzten zwei Jahrzehnten auf den Markt gekommen ist, sind Lithium-Ionen-Batterien (LIB). Ein LIB-System besteht aus miteinander verbundenen Einzelzellen. Sie enthalten jeweils eine positive Elektrode (Kathode), eine negative Elektrode (Anode) und einen polymeren Separator. Die Kathode aus Aluminiumfolie (Al) ist mit Lithiummetalloxid beschichtet, das eine Mischung aus Nickel (Ni), Kobalt (Co), Aluminium (Al), Mangan (Mn) oder Eisen (Fe) und Phosphat (P) enthält. Die Anode besteht aus Kupferfolie, die in der Regel mit Graphit beschichtet ist.

Die Elektroden sind in der Zelle von einer organischen Elektrolytmischung umgeben, die Lithiumsalze enthält. Bei der Entladung wandern die Lithiumionen durch den Elektrolyten von der Anode zur Kathode, werden dort in das Kathodenmaterial eingelagert und erzeugen dabei elektrischen Strom. Beim Aufladen kehrt sich dieser Prozess um und die Li-Ionen werden in das Anodenmaterial eingelagert. Im entladenen Zustand ist das mobile Lithium also im Kathodenmaterial konzentriert. Der polymere Separator verhindert den direkten Kontakt zwischen den Elektroden, um die Entstehung von Kurzschlüssen zu vermeiden. Der gesamte Aufbau ist von einem mechanisch stabilen Gehäuse umgeben, das entweder aus robusten Stahl- oder Aluminiumblechen (zylindrische Zellen, prismatische Zellen) oder aus einer Aluminiumverbundfolie (pouch-Zelle) besteht. Bei der letzteren Variante werden die Zellen durch das Gehäuse des Batteriepacks, wiederum eine Stahl- oder Aluminiumblechkonstruktion, mechanisch geschützt. Die Zusammensetzung der Batterien variiert zwischen den verschiedenen Ausführungen und Herstellern.³⁷

Je nach Größe der Batteriesysteme und Demontagetiefe ist das Ausgangsmaterial für das Recycling ein Batteriepack oder einzelne Module. Die Zerkleinerung kann in ein oder zwei Schritten erfolgen. Der eingeführte mechanische Recyclingprozess für LIB setzt sich aus zwei Zerkleinerungsstufen

zusammen, an die sich jeweils mechanische Trennschritte zur Erzeugung stofflicher Konzentrate anschließen.

Typischerweise werden die LIB-Zellen in Rotorscheren zerkleinert.³⁸ Sie sind als Einwellen- oder Mehrwellenshredder ausgeführt und verfügen über einen Auslassrost. Der Austragsrost bestimmt die obere Partikelgröße des Shredderprodukts und damit auch den Aufschlussgrad des Werkstoffverbundes Batteriezelle. Dabei sollte eine maximale Austragsrostweite von 30 mm verwendet werden, um einen ausreichenden Aufschlussgrad des Werkstoffverbundes für die nachfolgenden mechanischen Trennschritte zu erreichen.³⁹

Um die hochflüchtigen Elektrolytbestandteile zu entfernen, können die zerkleinerten LIB bei verschiedenen Temperaturen von 22-120°C getrocknet werden. Trotz der Temperaturen oberhalb der Raumtemperatur wird dieses Recyclingverfahren als kalte Recyclingroute bezeichnet.⁴⁰

Nach dem Trocknen wird das zerkleinerte Material, das noch die schwerflüchtigen Bestandteile des Elektrolyten enthält, klassiert, um die freigesetzte Beschichtung der Elektrodenfolien zu erhalten (Schwarzmasse 1). Es hängt von der Prozessgestaltung ab, welche Trenngrenze (1 mm, 800 µm oder darunter) bei der Klassierung genutzt wird, da dies ist immer ein Kompromiss zwischen Ausbeute und Produktqualität ist.⁴¹ Aus dem verbleibenden Metall-Kunststoff-Gemisch werden durch zweistufige Dichtentrennung im Sieb drei Fraktionen erzeugt: Separatorfolie, Batteriegehäuse und die Elektrodenfolien.⁴²

Die Elektrodenfolien werden im ersten Shredder- und Trocknungsprozess nicht vollständig entschichtet, daher müssen sie weiter behandelt werden, um die verbleibende Beschichtung zurückzugewinnen. Indem das Elektrodengemisch einer Prallbeanspruchung, bspw. in einer Hammermühle⁴³ oder Turborotormühle⁴⁴ unterzogen wird, werden die Metallfolien vollständig entschichtet und gleichzeitig zu kugelförmigeren

³⁷ (Wilke et al., 2023a)

³⁸ (Diekmann et al., 2018)

³⁹ (Wuschke et al., 2019)

⁴⁰ (Sommerville et al., 2021)

⁴¹ (Wilke et al., 2023b; Werner et al., 2022)

⁴² (Kaas et al., 2022)

⁴³ (Wuschke, 2018)

⁴⁴ (Lyon et al., 2022)

Partikeln umgeformt. Eine weitere Siebklassierung bei 500 µm oder 315 µm gewinnt die restliche Beschichtung zurück (Schwarzmasse 2). Die verkugelten Elektrodenfolien können über Zick-Zack-Sichter in ein Aluminium- und Kupferkonzentrat überführt werden. Alternativ kann eine Wirbelstromabscheidung eingesetzt werden.⁴⁵

Die Gesamtschwarzmasse besteht aus beiden gewonnenen Schwarzmassen, aus denen hydrometallurgisch die Bestandteile des Kathodenmaterials zurückgewonnen werden. Es gibt auch Ansätze, die Flotation zur Rückgewinnung von Graphit einzusetzen.⁴⁶ Die Flotation erfordert eine weitergehende Entfernung der Rückstände des schwerflüchtigen organischen Elektrolyten, da letztere die Benetzungseigenschaften der Partikeloberflächen beeinflussen. Dies erfolgt durch eine weitere thermische Behandlung. Es sind auch Ansätze bekannt, Graphit und Kathodenmaterial durch Dichtentrennung (Hydrozyklon, Falcon-Separator) oder durch Magnetscheidung zu trennen und aufzureinigen.

Li-Ionen-Batterien stehen exemplarisch für Produkte, bei denen die Innovationsgeschwindigkeit so hoch ist, dass der Aufbau von Recyclingsystemen in vielerlei Hinsicht nicht Schritt halten kann.

Das betrifft zum einen die Zelle selbst, in die aktuell immer weitere Materialien eingebracht werden, bspw. Silizium in der Anode sowie mit Füllstoff verstärkte Membranen oder Membranbeschichtungen mit Silizium oder Aluminium. Aber auch das Gesamtsystem Lithium-Ionen-Batterien ändert sich kontinuierlich. Zum einen ist eine Integration von elektronischen Bauteilen an die Zelle zu beobachten. Zum anderen ergibt sich durch die Konzepte wie Cell-to-Pack, einer neuartigen Struktur von Batteriesystemen, die sich durch die direkte Integration der Batteriezelle in das Batteriepack auszeichnet und auf den Einsatz von Batteriemodulen verzichten⁴⁷, die

Problematik, dass die Zellen in einen Schaum eingebettet werden. Hierdurch erhöht sich der organische Anteil im Gesamtsystem signifikant.

Das Design spielt auch eine wichtige Rolle, um die Möglichkeiten des Wiedereinsatzes und des Recyclings von Batterien zu erweitern und die Demontage weiter zu automatisieren.

Eine große Herausforderung bei Batterien sind elektrochemische Schädigungen innerhalb der Zellen, die nicht nur bei einem unsachgemäßen Entladevorgang am Ende der Lebenszeit entstehen, sondern auch durch die Verschaltung von vielen Zellen in einem Modul in der Betriebsphase bewirkt werden können. Diese Schädigungen wirken sich auf das Verarbeitungsverhalten in der mechanischen Prozesskette aus und führen hier zu einem erhöhten Anteil an Verunreinigungen in der Schwarzmasse⁴⁸ bei gleichzeitig geringerer Ausbeute.

Handlungsempfehlungen

- » Die immer feiner werdenden technischen Strukturen erfordern im Recycling physikalische Trennverfahren, die im Partikelgrößenbereich < 10 µm effizient arbeiten.
- » Die komplexen Strukturen der Eingangsstoffe müssen zukünftig besser quantifiziert und beschrieben werden, um die Materialeigenschaften in Prozessgesetzen und Regelungskonzepten berücksichtigen zu können. Hier können Daten-basierte KI-Ansätze eine Lösung sein.
- » Arbeits- und Emissionsschutz wird für die Recyclingbranche wichtiger, da Partikelgröße und Inhaltsstoffe in den technischen Strukturen ein erhöhtes Gefährdungspotential aufweisen.
- » Die gesetzlichen Rahmenbedingungen, u.a. das Critical Raw Materials Act, schaffen einen starken Bedarf an Recyclingkapazitäten, dem ganzheitlich durch Investitionen, Aus- und spezifische Weiterbildung begegnet werden muss.

4.2.4. MECHANISCHE AUFBEREITUNG: SCHMELZEN

Das mechanische Recycling ist eine großtechnisch etablierte Technologie, bei der Abfälle überwiegend mit mechanischen Verfahren rezykliert werden, ohne die chemische Struktur des Werkstoffs wesentlich zu verändern. Typische Anwendungen sind das Recycling von Glas, Metallen und thermoplastischen Kunststoffen.

Je nach Reinheit der Abfallströme kann beim mechanischen Recycling ein Sekundärrohstoff gewonnen wer-

den, der sehr nah am primären Rohstoff ist (z.B. Glas) und unmittelbar wieder in neuen Produkten eingesetzt werden kann. Andere Stoffströme (z.B. Kunststoffe, Schrott) sind nach der mechanischen Aufbereitung oft von minderer Qualität und werden deshalb mit Primärrohstoff gemischt („compoundiert“), um eine gute Produktqualität zu gewährleisten.

Bei Kunststoffen werden Abfälle gesammelt, sortiert, zerkleinert, gewaschen, über Extrusionsverfahren eingeschmolzen und regranuliert. Als Sekundärrohstoff fällt Rezyklat an. Mechanisches Recycling für Kunst-

⁴⁵ (Gaur and Elwert, 2017)

⁴⁶ (Vanderbruggen et al., 2022)

⁴⁷ (Gerlitz et al., 2021)

⁴⁸ (Kaas et al., 2023)



stoffe lässt sich nur auf Thermoplaste anwenden und stößt zudem dort an seine Grenzen, wo es um gemischte Abfallströme wie Elektro- und Elektronikabfälle sowie Shredderleichtfraktionen aus der Automobilindustrie oder Bauabfälle geht. Zwar lassen sich einige unerwünschte Inhaltsstoffe durch Feinfiltration in der Schmelze oder Desodorierung entfernen, aber dies gilt vor allem für kleinvolumige Additive.

Der Wiedereinsatz von mechanischen Rezyklaten im Food-Bereich ist problematisch. Herausforderungen für den Wiedereinsatz bestehen auch in Fällen, in denen unerwünschte Füllstoffe oder Additive entfernt werden müssen, beispielsweise weil es sich um früher verwendete, heute aber aus Sicherheitsgründen verbotene Zuschlagstoffe handelt (wie bromhaltige niedermolekulare Flammschutzmittel).

Für das mechanische Recycling stellen insbesondere Verbunde aus mehreren Kunststoffarten eine Herausforderung dar. Auch schwarz eingefärbte Kunststoffe können das mechanische Recycling erschweren, da die Polymere bei der etablierten Nahinfrarot-Sortierung nicht erkannt werden. Zudem kann es bei mehrfachem mechanischem Recycling zu einem Teilabbau der Polymerketten kommen (Abnahme des Molekulargewichts), was zu Qualitäts- und Funktionalitätseinbußen führen kann.⁴⁹

Daher eignen sich insbesondere sortenreine, nicht verunreinigte Kunststoffe für das mechanische Recycling. Etablierte Routen bestehen hier z.B. für PET-Flaschen sowie für bestimmte Polyethylenfraktionen (z.B. Folien als Industrieverpackung). Für solche Materialien stellt das mechanische Recycling eine bevorzugte Option dar. Für viele andere Kunststoffabfälle sind jedoch andere Recyclingpfade notwendig, die entsprechende Trennungen, Fraktionierungen und Aufreinigungen ermöglichen - damit aber auch einen höheren verfahrenstechnischen und energetischen Aufwand erfordern.

Im Bereich der Metalle umfasst die Pyrometallurgie Prozesse, die bei hohen Temperaturen durchgeführt werden – darunter Sintern, Metallrösten, Verhüttung, Gießen, Metallraffination, Legieren, und (andere) thermische Verfahren.

Aufgrund der Metallurgie sind Metalle wie Eisen bzw. der daraus hergestellte Stahl, Kupfer oder Aluminium

gut für das Recycling durch Einschmelzen geeignet. Die Metalle werden bei hohen Temperaturen (z.B. Eisen bei 1.538 °C) geschmolzen. In der flüssigen Phase können die chemische Zusammensetzung und Reinheit eingestellt werden.

Handlungsempfehlungen

- » Einsatz fortgeschrittener Verfahren zur Aufarbeitung von Schmelzen, bspw. durch In-Prozess-Extraktion, Abscheidung/Adsorption/Filtration, Entfernung von Additiven, Farb- und Schadstoffen
- » In-line-Analytik zur Verfolgung der Qualität und Steuerung von Prozessbedingungen und Eingangskontrolle.
- » Steigerung der Energieeffizienz bei Schmelzprozessen
- » Einsatz CO₂-neutraler Energieträger für die Schmelze

4.2.5. PHYSIKALISCH-CHEMISCHE AUFBEREITUNG: LÖSUNG UND FÄLLUNG

Die Lösung und Fällung von Reststoffen ermöglichen die Trennung und Reinigung von Wertstoffen aus gemischten oder verunreinigten Fraktionen. Aus metallhaltigen Gemischen lassen sich einzelne Komponenten gezielt, z.B. durch Einstellung des pH-Werts, stufenweise fällen. Auch Salze wie Phosphate oder einige Polymere können über Lösung und Fällung gewonnen bzw. gereinigt werden.

Lösemittel-basierte Verfahren eignen sich besser als Schmelzen, um Verunreinigungen zu entfernen oder Zusatzstoffe und Verunreinigungen aus dem Recyclingprozess auszuschleusen. So können z.B. Additive und Füllstoffe aus Kunststoffabfällen unter Erhalt der Polymerketten abgetrennt und so Materialien gewonnen werden, die qualitativ als Basispolymere eingesetzt werden können.

Das aufzubereitende Material wird dafür in einem geeigneten Lösungsmittel (selektiv) gelöst und anschließend (selektiv) gefällt.

Bei Lösungs-/Fällungsverfahren werden erhebliche Mengen an Lösemitteln eingesetzt. Besonders bei der Verwendung von organischen Lösungsmitteln müssen diese aus ökologischen und ökonomischen Gründen im Kreis gefahren werden. Für diese Kreislaufschließung ist eine Lösungsmittelaufreinigung notwendig, die zwar energetisch aufwändig sein kann, aber den Vorteil bietet,

⁴⁹ (PlasticsEurope e.V., 2022)

⁵⁰ (Beckmann et al., 2022)

Abbildung 10:
Kläranlagen Quellen für
die Rückgewinnung von
Phosphat
(Quelle: DECHEMA e.V.)



unerwünschte Verunreinigungen des End-of-life-Materials abzureichern.

Bei Polymeren kann die Fällung entweder durch Zugabe eines geeigneten Anti-Lösemittels oder durch eine Temperaturveränderung der Lösung herbeigeführt werden. Das gefällte Polymer wird abgetrennt, bspw. durch Filtration. Hierdurch werden Verunreinigungen entfernt und ein möglicher Materialmix aufgelöst. Das gefällte Polymer wird von Lösemittel getrocknet. Die Methode lässt sich für eine Reihe von Polymeren anwenden, was auch die wachsende Zahl kommerzieller Projekte (unter anderem für Polystyrol-Schäume mit bromierten Flammschutzmitteln (PolyStyreneLoop), Polypropylen (PureCycle), Polycarbonat (Trinseo) oder Polyamid/Polyethylen-Multischichtfolien (APK)) zeigt.

Auch Phosphat lässt sich durch Lösung und Fällung recyceln. Rückgewinnungsverfahren auf Kläranlagen erzeugen immer Fällungsprodukte wie z.B. Calcium-, Magnesiumammonium-, Eisen- und Aluminiumphosphat sowie Gemische mit unterschiedlichen Anteilen dieser Produkte. Die Fällungsprodukte enthalten in der Regel Verunreinigungen (Schwermetalle, Organik etc.) und müssen weiter aufbereitet werden, um verwertbare Produkte wie z.B. Düngemittel und Phosphorsäure zu erhalten.

Aus Klärschlammasche lässt sich Phosphat durch Lösung mittels Mineralsäuren rückgewinnen, wie z.B. Salz-, Schwefel-, Salpeter- aber auch Phosphorsäure. Diese Verfahren sind auch auf andere Feststoffe wie z.B. Tiermehl und Knochenmehl übertragbar. Die gelösten Phosphationen werden entweder mittels Membranverfahren (z.B. Nanofiltration, Dialyse, Elektrodialyse) abgetrennt und/

oder durch Zugabe von Fällungschemikalien gefällt. Eine Herausforderung ist, wieder in Lösung gebrachte (Schwer) Metallionen selektiv zu entfernen und sie dann ggfs. wieder als Wertstoffe einzusetzen, z.B. Gips. Die gleiche Herausforderung gilt für Nebenprodukte, deren Zusammensetzung insbesondere von den verwendeten Säuren und zugegebenen Fällungschemikalien abhängt und deren Qualität darüber entscheidet, ob sie als Reststoffe entsorgt oder als Roh-/Wertstoffe verwertet werden können.

Die Hydrometallurgie befasst sich mit wässrigen Lösungen zur Gewinnung von Metallen aus Erzen oder sekundären Stoffströmen / Abwässern, im Gegensatz zur Pyrometallurgie.

Zunächst erfolgt bei der hydrometallurgischen Behandlung der metallhaltigen Substanzen die Laugung (leaching), meist mit Hilfe von Säuren. Zu den hydrometallurgischen Verfahren, die zur Extraktion von Metallen verwendet werden, gehören auch die (Atmosphären-)Druck- oder Biolaugung⁵¹, aber auch Verfahren zur Laugung mit unkonventionellen Lösemitteln.

Danach folgt die Rückgewinnung der Metalle durch Lösungsmittelextraktion mit flüchtigen organischen Lösungsmitteln und die chemische Fällung der Metalle⁵². In der Iono- und Solvometallurgie werden Metalle aus nicht- oder niedrigwässrigen Lösungen gewonnen. Es kommen entweder organische oder anorganische Lösungsmittel zum Einsatz. Bei der Ionometallurgie werden nichtwässrige ionische Lösungsmittel wie ionische Flüssigkeiten und tief eutektische Lösungsmittel verwendet, während die „klassische“ Solvometallurgie organische Lösungsmittel verwendet.

⁵¹ (DECHEMA, 2013)

⁵² (Chen et al., 2022)

Insbesondere Solventextraktion (auch Flüssig-Flüssig-Extraktion genannt), ionenselektive Abscheidung (z.B. Elektrowinning) sowie Membranverfahren gewinnen zunehmend an Bedeutung. Bei den Membranverfahren erfolgt der Übergang der zu extrahierenden Metalle aus der wässrigen in die organische Phase an der Membran. Membranverfahren sind insbesondere bei Metallen, die in geringen Konzentrationen in der wässrigen Lösung vorliegen, vorteilhaft.⁵³

Im Bereich der Hydrometallurgie arbeitet man an der Reduzierung des Frischwasserverbrauchs und der Abwassermengen, sowie an der Reduzierung der benötigten Chemikalienmengen. Dies kann etwa durch intelligent gesteuerte Gegenstromprozesse und den Ersatz bestimmter Chemikalien durch umweltfreundlichere Alternativen erreicht werden.⁵⁴

Hydrometallurgische Verfahren sind (im Vergleich zu pyrometallurgischen) oftmals besser geeignet zur Gewinnung von Metallen, die in geringen Konzentrationen vorliegen, und ermöglichen eine präzisere Kontrolle über Nebenprodukte.

Die Bedeutung der hydrometallurgischen Extraktion könnte in naher Zukunft tendenziell zunehmen, da die Qualität der verfügbaren Erze, d.h. die Konzentration der Metalle in den Erzen, aus welchen sie gewonnen werden, allmählich abnimmt, was tendenziell für die Anwendung von Hydrometallurgie anstelle von Pyrometallurgie spricht. Zudem gewinnt die Extraktion von Metallen aus gemischten Post-Consumer-Schrotten und Tailings, d.h. den Rückständen aus der Aufbereitung von Erzen, tendenziell an Bedeutung⁵⁵

Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf

- » Simulative Vorhersage von Lösungsvorgängen und dem Verhalten von Wertstoffen, Verunreinigungen und Nebenkomponenten
- » Optimierung der verwendeten Lösemittel oder Prozessmedien im Hinblick auf optimale Umweltverträglichkeit und Sicherheit, Gewinnung aus erneuerbaren Rohstoffen und Minimierung der Verluste im Prozess
- » Entwicklung neuer Verfahrenskonzepte, die eine wirtschaftliche Umsetzung mit hohen Raum-Zeit-Ausbeuten erlauben; kontinuierliche Verfahrensführung
- » Entwicklung neuer, energieeffizienter Trennverfahren zur Wiederaufbereitung der Lösemittel und Prozessmedien, bspw. mit Membranverfahren statt Destillation.

4.2.6. CHEMISCHE AUFBEREITUNG: FUNKTIONALES RECYCLING

Anwendungsgebiet: Polymere, Metalllegierungen

Beim funktionalen Recycling werden nicht einzelne Elemente, sondern komplexere Verbindungen recycelt. Das gilt beispielsweise für die Monomere von Kunststoffen, aber auch für anorganische Materialien in Elektroden oder Magneten oder für Legierungen. Sie werden nur so weit aufgetrennt, wie es für die Reinigung und das Recycling notwendig ist.

Als „Solvolyse“ bezeichnet man die Spaltung eines Polymers in seine monomeren (oder Monomer-ähnlichen) Bestandteile durch die Reaktion mit einem Lösemittel. Einer der Kunststoffe, für die chemisches Recycling durch Solvolyse schon sehr weit entwickelt ist, ist PET (Polyethylenterephthalat). An diesem Beispiel lassen sich verschiedene Solvolyse-Techniken schematisch vergleichen, die sich unter anderem durch das eingesetzte Lösungsmittel unterscheiden (Abbildung 11):

- » Hydrolyse zu Terephthalsäure oder Terephthalat⁵⁶: Hydrolysen finden vorwiegend alkalisch statt, was in Verbindung mit nachzuschaltenden Neutralisationsprozessen zu salzhaltigen Prozesswässern führt.
- » Methanolyse zur Gewinnung von Dimethylterephthalat (DMT) und Ethylenglykol
- » Glycolyse mit Ethylenglykol als Reaktionsmedium zur Gewinnung von Bis-HET

Alle diese verschiedenen Produkte können entweder direkt zur Re-Polymerisation verwendet werden oder weiter zu den Monomeren Terephthalsäure (TPA) und Ethylenglykol (EG) reagieren.

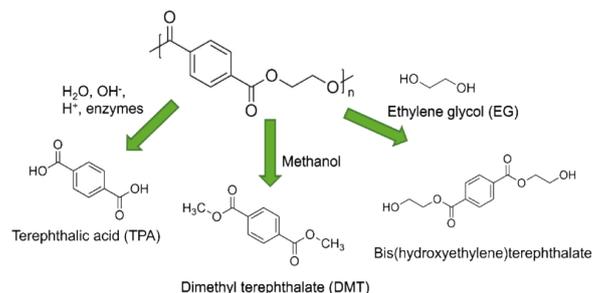


Abbildung 11: Verschiedene Depolymerisationswege für PET durch Solvolysen: Hydrolyse, Methanolyse und Glycolyse, die jeweils die oben gezeigten Produkte liefern, sowie als zweites Monomer-Produkt Ethylenglykol für alle Wege.
Quelle: (Mangold et al, 2022)

⁵³ (Fraunhofer IKTS, n.d.)

⁵⁴ (GERRI, 2021)

⁵⁵ (Raabe, 2023)

⁵⁶ (Biermann et al, 2021; Geyer et al., 2016)

Mittlerweile sind für viele weitere Kunststoffe aus Kondensations-Polymeren oder Polyaddukten wie Polyurethan spezifische Verfahren zur Gewinnung der Monomere oder Intermediärbausteine in Entwicklung, so auch für Polyurethane⁵⁷, Polyamid-6 aus Textilien⁵⁸ oder Polycarbonat⁵⁹.

Der entscheidende Vorteil einer Solvolyse ist wie im Falle von PET, dass (im Gegensatz zur hochviskosen Polymer-schmelze) die niedermolekularen Monomere durch gängige Methoden der chemischen Technologie, wie Adsorption, Membranfiltration, Kristallisation, Destillation etc. sehr gut aufgereinigt werden können. Darüber hinaus kann auch das Zielpolymer oft aus einem Verbund oder Gemisch selektiv depolymerisiert werden. Manche Polymere sind auch einer enzymatischen Solvolyse zugänglich, die Bindungen sehr gezielt und unter milden Bedingungen aufspalten kann⁶⁰, aber wiederum eine Aufarbeitung aus verdünnten, meist salzhaltigen wässrigen Lösungen erfordert.

In allen Fällen besteht ein hohes Potenzial, durch chemische Aufreinigung, bspw. Destillation der Monomere, Neuwaren-gleiche Qualitäten erzeugen zu können. Der Aufwand für die Aufreinigung und damit meist auch die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens hängt direkt von der Selektivität der Verfahren ab, die sich durch geeignete Reaktionstechnik beeinflussen lassen, und von der Reinheit des Eingangsstromes. Die Wirtschaftlichkeit hängt auch von der Raum-Zeit-Ausbeute ab und bevorzugt daher ziemlich sortenreine, an Zielpolymer angereicherte Eingangsströme für eine Solvolyse.

Unter die Kategorie Depolymerisation fallen auch bestimmte thermische Verfahren unter Sauerstoffausschluss ohne Einsatz eines Reaktionspartners: thermodynamisch

gesehen werden Polymerisationsreaktionen gemäß des chemischen Gleichgewichts durch die Temperatur und die freie Reaktionsenthalpie beeinflusst. Bei einer bestimmten Temperatur T_c („ceiling temperature“) ist aus thermodynamischer Sicht die Polymerisationsreaktion genauso möglich wie die Depolymerisation zurück zum Monomer. Bei höheren Temperaturen verschiebt sich das Gleichgewicht immer mehr zum Monomer. Bei den Massenkunststoffen Polyethylen oder Polypropylen ist die Polymerisation jedoch so stark exotherm, dass die ceiling-Temperatur zu hoch liegt. Noch vor ihrem Erreichen setzen andere statistische Kettenabbauprozesse ein, und es bildet sich ein Kohlenwasserstoffgemisch (siehe Kapitel 4.2.7).

Andere Additionspolymere wie Polymethylmethacrylat (PMMA) oder Polystyrol (PS) können jedoch in einem thermochemischen Prozess relativ sauber depolymerisiert werden. PMMA spaltet sich unter Sauerstoffausschluss bei 400-500°C in sein Monomer MMA zurück. Auch ein kommerzieller Prozess für die thermische Depolymerisation von Polystyrol wurde bereits entwickelt.

Forschungsbedarf

- » Ziel der Forschung in diesem Gebiet ist, durch niedrige Temperatur und ggfs. Katalysatoren die Rückspaltung möglichst selektiv gestalten, um Monomere oder Intermediärbausteine zu erhalten⁶¹
- » Entwicklung von effizienten technischen Lösungen für die Gewinnung und hochqualitative Verwertung von Nebenprodukten, die bei einer selektiven Depolymerisation des Zielpolymers anfallen, sowie von Salzen aus Prozesswässern sowie Realisierung der Kreislauf-führung von Prozesswässern.



Abbildung 12:
Chemisches Recycling von
Polyurethanen, CIRCULAR
FOAM-Projekt (Quelle:
Covestro Deutschland AG)

⁵⁷ (Lövenich, n.d.)

⁵⁸ (BASF, 2024)

⁵⁹ (NexantECA, 2021)

⁶⁰ (Thiyagarajan et al., 2022)

» Der Aufwand für die (chemische) Aufreinigung der Monomere und damit meist auch die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens hängt direkt von der Reinheit des Eingangstromes ab sowie von der Selektivität der Verfahren, die sich durch geeignete Reaktionstechnik beeinflussen lassen. Da die potenziell hohe Zahl an Nebenkomponenten und deren wechselnde Zusammensetzung besondere Herausforderungen an die Auslegung der Trennverfahren und Aufarbeitung stellen, ist hier weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf gegeben.

4.2.7. CHEMISCHE AUFBEREITUNG: PYROLYSE

Anwendungsgebiete: Kunststoffe, Biomasse, Elektroschrott

Bei der Pyrolyse von Kunststoffen werden die Polymerketten unter Ausschluss von Sauerstoff durch hohe Temperaturen zu kurzkettigen Fragmenten gespalten.^{62, 63, 64} Dabei fällt üblicherweise ein komplexes Gemisch verschiedener Fragmente an, dessen Zusammensetzung und Eigenschaften von den eingesetzten Kunststoffabfallfraktionen und dem Pyrolyseverfahren bzw. Pyrolysebedingungen abhängen.

Das chemische Recycling durch Pyrolyse eignet sich auch für sonst schwer verarbeitbare Stoffströme, z.B. verunreinigte und gemischte Kunststoffabfälle, Verbundmaterialien oder höher funktionalisierte Komposite, die nicht für mechanisches Recycling oder Solvolyse geeignet sind. Auch bestimmte Biomassefraktionen können als Einsatzstoff in Frage kommen. Dabei entstehen je nach Abfallart und -zusammensetzung sowie

dem Pyrolyseprozess an sich Pyrolyseöle unterschiedlicher Qualität. Grundsätzlich können Pyrolyseöle aus geeignete Abfallfraktionen, die arm an heteroatomhaltigen Polymeren sind, alternativ zu fossilen Einsätzen, wie z.B. Naphtha, im Steamcracker eingesetzt werden. Durch nachgelagerte Polymerisation kann dann prinzipiell wieder ein Kunststoffmaterial gewonnen werden, das mit Neuwarenqualität höchsten Anforderungen entspricht.

In der Realität scheitert die Erhöhung des Anteils dieser Pyrolyseöle als Einsatzstoff allerdings noch an den hohen Preisen und geringen verfügbaren Volumina, aber auch an den hohen Anforderungen eines Steamcrackers und der nicht ausreichenden Qualität der marktüblichen Pyrolyseöle, die weitere aufwändige Maßnahmen wie Reinigung und Konditionierung erfordern. Die Kunststoffabfälle, insbesondere aus Leichtverpackungsfraktionen, sind komplex zusammengesetzt und enthalten anhaftende Verunreinigungen. Die resultierenden Pyrolyseöle können deshalb derzeit nur in sehr geringen Mengen (üblicherweise deutlich <10 Gew.-% Anteil der Gesamteinsatzmenge) im Steamcracker eingesetzt werden. Probleme bereiten insbesondere Verunreinigungen mit Halogen- (Chlor, aber auch Brom und Fluor), Silizium- und Heteroatomverbindungen (z.B. Sauerstoff, Stickstoff, Phosphor, Schwefel) sowie Metallen, die zu Leistungseinbußen, Störungen oder gar Schädigungen des Betriebs eines Steamcrackers und der Kontamination seiner Produkte führen können⁶⁵. Quellen sind beispielsweise Chlor aus Polyvinylchlorid oder Brom aus Flammschutzmitteln in den Abfällen. Silizium wird typischerweise aus Kunststofffüllstoffen eingetragen, Metalle wie Eisen oder Kalzium



Abbildung 13:
Pyrolyseöle können im Idealfall als Feedstock im Cracker eingesetzt werden.
(Quelle: BASF SE)

aus der Zugabe von säurebindenden Substanzen zum Pyrolyseprozess.

Zudem weichen typische Pyrolyseöle nicht nur durch einen sehr weiten Siedebereich von konventionellen Einsatzstoffen ab (vgl. Abbildung 14), sondern auch durch eine andere chemische Zusammensetzung und Spezies (z.B. lineare und verzweigte α -Olefine aus PE bzw. PP-Abfällen), die in konventionellen Rohstoffen weitestgehend unbekannt sind. Daraus resultiert eine andersartige Spaltgaszusammensetzung mit entsprechender Auswirkung auf den Trennteil - der Auftrennung in die

Produkte - eines Steamcrackers. Erschwerend kommt hinzu, dass klassische Modelle die Spaltgaszusammensetzung von Plastikabfall-Pyrolyseölen nur unzureichend vorhersagen können und damit Optimierungen von Auslegung und/oder Betrieb eines Steamcrackers nur eingeschränkt möglich sind.

Viele Pyrolyseöle zeigen gute Ausbeutestrukturen als Einsatzstoffe für einen Steamcracker. Die Ausbeute an Wertprodukten lässt sich durch eine Aufwertung (Upgrading) der Pyrolyseöle aber noch erhöhen. Bei der Entwicklung und Implementierung eines solchen

Tabelle 3: Überblick zu einigen kritischen Einflussgrößen, deren Quellen und möglichen Auswirkungen auf den Steamcracker.^{66,67,68}

Parameter	Mögliche Quelle der Verunreinigung (sofern zutreffend)	Beurteilung zulässiger Grenzwerte	Einfluss auf den Betrieb
H/C		Grenzwert: H/C >> 1.5 mol/mol	
N	Aus Polymeren (z.B. PUR, PA), anorganischen und organischen Rückständen oder Additiven	Grenzwert abhängig vom Anlagentyp: < 0.01 wt.-% (Naphtha) < 0.2 wt.-% (Gas Oil)	Korrosion (NH ₄ Cl), instabiler Betrieb (Prozesswasser), Katalysatordeaktivierung im Reinigungs- und Zerlegungsteil
O	Aus Polymeren (z.B. PET, EVOH), organischen Rückstände und Additiven	Grenzwert: < 0.01 wt.-% (organisch gebunden) Nicht so strikt wie für Cl. Abhängig von O-Spezies und Cracker-konfiguration.	Erhöhtes Fouling, kürzere Standzeit Hydrierkatalysatoren aufgrund höherer CO-Konzentration im Spaltgas und Akkumulation von Oxygenaten
S	Aus organischen Rückständen	Grenzwert: < 500 wt-ppm	Nur geringfügige Auswirkung.
Cl und andere Halogenide	Cl: Cl-haltige Kunststoffe wie PVC Br: Flammschutzmittel	Cl und Halogenide (e.g., F and Br): oftmals deutlich höher als zulässig für einen Crackereinsatz. Grenzwert: Cl < 1(-5) wt.-ppm	Korrosion, Bildung von Ablagerungen, Bildung von halogenhaltigen Verbindungen insbesondere d/s des Spaltofens, Katalysatorschädigung im Reinigungs- und Zerlegungsteil, Produktkontamination
Si	Typischerweise aus Füllstoffen	Strikter Grenzwert	Fouling und Katalysatorvergiftung
Alkali / Salze (Na, Ca, Mg etc.)	Rückstände in den Abfällen. Bestimmte Metalle wie Eisen oder Calcium können auch aus der Zugabe von Zuschlagsstoffen zur Pyrolyse resultieren.	Strikter Grenzwert für Na	Korrosion, Verkokung, Fouling Na: Schädigung der Coils ("Hot corrosion")
Übergangs- & Schwermetalle (Fe, Pb, V, etc.)			Korrosion, Verkokung, Fouling, Katalysatordeaktivierung
Summe Metalle	Diverse Quellen (z.B. Farbstoffe, Flammschutzmittel, beschichtete Folien, Katalysatoren etc.)	< 2000 (- 6000) wt.-ppb	
Siedebereich		Final Boiling Point (FBP) < 550 – 580 °C max. (Abhängig vom Ofentyp)	Vollständige Feedverdampfung muss gewährleistet werden.

⁶⁶ (Kusenberget al., 2022)

⁶⁷ (Delhomme-Neudecker et al., 2024)

⁶⁸ (Delhomme et al., 2024)

Upgradings müssen zwingend wesentliche Aspekte zu Energie- und Wasserstoffbedarf, Auswirkungen auf die CO₂-Bilanz sowie Investitions- und Betriebskosten berücksichtigt werden. Heutzutage existierende Lösungen greifen zumeist auf etablierte Lösungen aus dem Bereich konventioneller Einsätze, auch aus der Raffinerietechnik, zurück, die für die speziellen Anforderungen der Pyrolyseöle nur bedingt geeignet sind.

Doch nicht nur für organische Materialien, auch für Metalle ist die Pyrolyse ein möglicher Rückgewinnungsweg. Ausgangspunkt sind hier z.B. kunststoffhaltige Schredderreste aus Elektroschrott, die Wertstoffe wie Indium, Gallium, Palladium, Silber, aber auch seltene Erden enthalten. Werden diese unter Sauerstoffabschluss auf 500 bis 600 °C erhitzt und der entstehende Dampf abgekühlt, bilden sich Pyrolyseöl und Pyrolysekoks. Insbesondere im Pyrolysekoks sind entsprechende Anteile der begehrten Metalle akkumuliert und können über etablierte Verhüttungsprozesse zurückgewonnen werden.⁶⁹ Auch die Hochtemperaturpyrolyse von Leiterplatten über Plasma oder in Widerstandsöfen liefert schlackenreiche kohlenstoffhaltige Rückstände, in denen Seltene Erden konzentriert sind.⁷⁰

Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf

» Analytik für Pyrolyseöle: chemische Zusammensetzung (Hauptkomponenten sowie Spuren und Verunreinigungen) mittels geeigneter Analytik

- » Um ökonomisch tragfähige Lösungen bereitzustellen, ist noch erheblicher Entwicklungs- und Optimierungsbedarf bezüglich des Upgradings von Pyrolyseölen erforderlich.
- » Verständnis der physikalisch-chemischen Eigenschaften des Pyrolyseöls (z.B. Dichte, Viskosität, Siedeverlauf etc.) in Kombination mit einem grundlegenden und detaillierten Verständnis der Auswirkung auf bzw. dem Verhalten im Steamcracker
- » Spezifikationen von Steamcrackereinsatz und Pyrolyseölqualität müssen weiter aufeinander abgestimmt werden
- » Elektrifizierung der Hochtemperaturverfahren, um CO₂-Emissionen durch den Einsatz erneuerbarer Energie vermeiden zu können. Hierzu gehört insbesondere eine lastdienliche Betriebsweise, um auf schwankende Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Quellen reagieren zu können.

4.2.8. CHEMISCHE AUFBEREITUNG: THERMO-CHEMISCHE VERGASUNG

Vergasung: Kohlenstoffhaltige Restströme (Kunststoffe, Biomasse)

Bei einer Umsetzung mit wenig Sauerstoff bei hohen Temperaturen ist alternativ eine Gasifizierung zu Synthesegas, also Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂), möglich. Aus diesem Synthesegas können durch Fischer-Tropsch-Synthese wieder Kohlenwasserstoffe

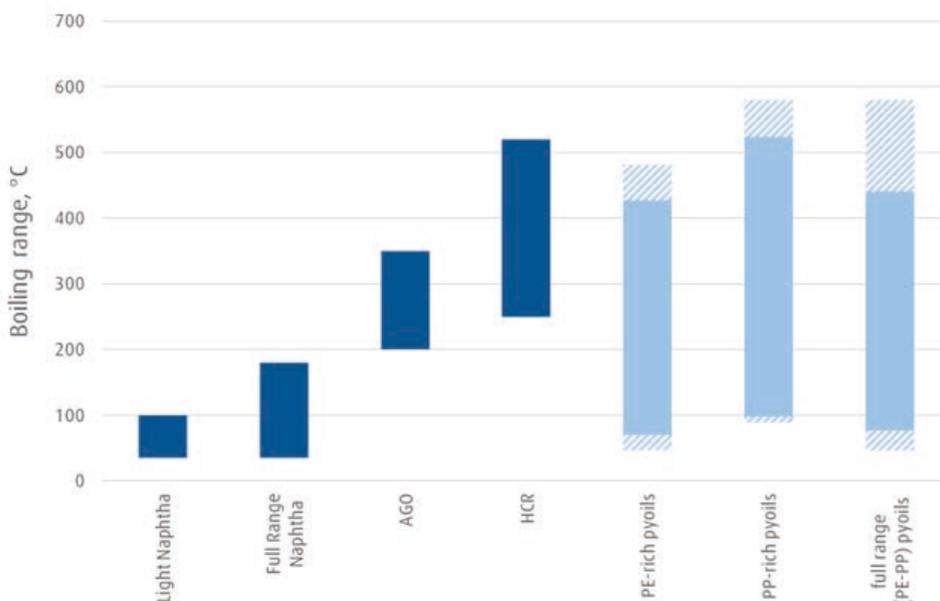


Abbildung 14: Siedebereich von Pyrolyseölen im Vergleich zu konventionellen Einsatzstoffen (Quelle: Linde GmbH – Linde Engineering)

als Feedstock für petrochemische Verfahren wie das Steamcracking gewonnen werden. Auch der Weg über Methanol und dessen Weiterverarbeitung zu Olefin (Methanol to Olefins, MTO) ist möglich.

Für Pyrolyseöl mit hohem Gehalt an Schadstoffen und Störkomponenten, die typischerweise aus Mischkunststofffraktionen resultieren, ist eine weitere Verarbeitung zu Synthesegas in einem Flugstromvergaser möglich. Dabei werden Störstoffe als mineralische Schlacke abgeschieden und das entstehende Generatorgas über etablierte Gasreinigungs-Technologien auf die notwendige Synthesegasqualität aufbereitet. Die Flugstromvergasung kann ein breites Einsatzstoffspektrum zuverlässig verarbeiten. Allerdings fehlt es an Brennerkonzepten für die effiziente Umsetzung unterschiedlicher Pyrolyseöl-Spezifikationen.

Der Weg über Synthesegas ist energieaufwändig, dafür ist die mögliche Bandbreite an Feedstock und Verarbeitbarkeit von sonst nicht zugänglichen Ölen oder Fraktionen hier am größten.

Der direkte Einsatz von Mischkunststoffen in einer Gasifizierung wie einer Wirbelschichtvergasung wäre als Alternative zur Verbrennung ebenfalls eine sehr attraktive Route für gemischte, verunreinigte und stark mit heteroatomhaltigen Polymeren durchsetzte Kunststoffabfälle. Allerdings sind einige technische Hürden noch ungelöst, und ein stabiler Betrieb ist bisher noch nicht auf der erforderlichen Anlagen-Skalierung gezeigt worden. Das produzierte Gas ist systembedingt von minderer Qualität.

Obwohl noch erheblicher Entwicklungsbedarf besteht, werden bereits erste kommerzielle Ansätze in der gemischten Nutzung von Abfällen mit Biomasse verfolgt, beispielsweise mit Projekten in Kanada, USA und Spanien⁷¹. Solche Technologien könnten aus Sicht der chemischen Industrie durch die duale Nutzung von Kunststoffabfall und biogenen Abfällen eine interessante Möglichkeit zum Ersatz fossilen Kohlenstoffs eröffnen.

Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf

- » Entwicklungsbedarf zu Gasifizierungstechnologie, die mit der erhöhten Heterogenität (in der momentanen Zusammensetzung eines Eingangsstromes genauso wie in der zeitlichen Fluktuation) umgehen kann
- » Robuste, energieeffiziente Aufarbeitung des Synthesegases

- » Steuerung und Anpassung des C/H-Verhältnisses unter systemischer Optimierung des Energiebedarfs und der Emissionen

Rückgewinnung von CO₂ durch Carbon Capture aus Punktquellen oder Direct Air Capture

Bei zentralen Anwendungen ist die Schließung des Kohlenstoffkreislaufs durch Rückgewinnung und Nutzung des CO₂ innerhalb des industriellen Prozesses technisch realisierbar, während bei dezentraler Freisetzung, z.B. in der Mobilität, das CO₂ aus der Atmosphäre zurückgewonnen werden muss, um den Kohlenstoffkreislauf zu schließen. Lange galt die stoffliche Nutzung von CO₂ als „Dream Reaction“; um das reaktionsträge CO₂-Molekül zu aktivieren, ist sehr viel Energie notwendig. Inzwischen ist die Carbon Capture & Usage (CCU) dank enormer Fortschritte in der Katalyse und im Kontext der Wasserstoff-Wirtschaft kein Traum mehr; erste Verfahren nutzen CO₂ für Produkte im industriellen Maßstab, zahlreiche weitere Verwertungspfade sind in der Entwicklung.⁷²

Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf

- » Systemforschung zur Entwicklung ganzheitlicher Ansätze zur Schließung von Kohlenstoffkreisläufen, Erreichung netto-negativer Emissionen, Verringerung des Energieeinsatzes
- » Entwicklung von Schlüsseltechnologien für die Schließung des Kohlenstoff-Kreislaufs (Sortierverfahren, Verfahren zur effizienten Verwertung von Rest- und Abfallstoffen, Behandlung der Folgeprodukte, energieeffiziente Verwertung von CO₂, Konzepte für den effizienten Transport von CO₂)
- » Effiziente Technologien für die Abtrennung von CO₂ aus der Atmosphäre
- » Verfahren für sichere Endlagerung von Kohlenstoff und CO₂ z.B. durch Mineralisierung
- » Technologien zur Verringerung und Vermeidung von CO₂-Emissionen mit Fokus auf Industrieprozessen mit sog. schwer vermeidbaren Emissionen (hard-to-abate), wie z.B. Zement- und Glasherstellung, Metallurgie, Abfallverbrennung
- » Regulatorische Einordnung von CCU im Rahmen von Emissionshandel/ Carbon-Management-Strategien

⁶⁹ (Fraunhofer, n.d.)

⁷⁰ (Khanna et al., 2018)

⁷¹ <https://enerkem.com/>

FALLBEISPIEL: KUNSTSTOFFABFÄLLE

Einer der wichtigsten kohlenstoffhaltigen Stoffströme sind Kunststoffe. Die globalen Produktionsmengen verschiedener Kunststoffe steigen allgemein stark an. So wurden im Jahr 2020 weltweit ca. 367 Millionen Tonnen an Kunststoffen produziert.⁷³ Sie liefern Materiallösungen für zahlreiche Anwendungen, darunter langlebige wie z.B. Leichtbauwerkstoffe in Autos und Flugzeugen, oder Isoliermaterialien, die den Energieverbrauch und damit den CO₂-Ausstoß verringern. Kunststoffverpackungen schützen Produkte vor Umwelteinflüssen und verlängern deren Lebensdauer. Sie tragen damit zur Senkung der Preise und Verringerung der Lebensmittelverschwendung bei. Verglichen mit den anderen üblichen Verpackungsmaterialien, wie Glas oder Metallen, benötigen Polymere aufgrund ihrer niedrigen Verarbeitungstemperaturen und Dichte weniger Energie für die Herstellung und den Transport.

Die größten Kunststoff-Mengen werden in vergleichsweise kurzlebigen Anwendungen eingesetzt. Ca. 40 % der in Europa produzierten Kunststoffe werden zu Verpackungen mit einer Lebensdauer von maximal einigen Monaten verarbeitet.⁷⁴ Gleichzeitig steigt aber auch die Menge an Kunststoffen, die sich in der Nutzungsphase befinden (in zum Teil sehr langlebigen Anwendungen wie Bau oder Fahrzeuge), die erst mit einer deutlichen Verzögerung als Abfall enden.

Somit resultieren aus den stetig steigenden Kunststoffmengen auch große Abfallmengen, die jedoch wegen der teilweise langen Nutzungsdauer deutlich unter der Neuproduktion und damit auch dem aktuellen Rohstoffbedarf liegen. Selbst bei einer 100%igen Recyclingquote ließe sich der Bedarf im wachsenden Markt nicht allein daraus decken.

In der EU-Abfallhierarchie⁷⁵ genießt das Recycling nach Vermeidung und Wiederverwendung Priorität gegenüber der thermischen Verwertung oder Entsorgung (Deponierung). Für das Kunststoffrecycling bietet sich eine Reihe von Verfahren an, um End-of-Life-Polymere (oder daraus hergestellte Stoffe) an unterschiedliche Stufen der Wertschöpfungskette zurückzuführen. Sie lassen sich in physikalische und chemische Methoden unterteilen, die je nach Art des Polymers genutzt werden können.

Alle Polymere bestehen aus Makromolekülen, die ihrerseits aus primären Bausteinen (Monomeren) gebildet werden. Werden die Makromoleküle untereinander durch physikalische Kräfte oder Verschlaufungen zusammengehalten, handelt es sich um Thermoplaste. Sie lassen sich schmelzen oder in geeigneten Lösungsmitteln lösen und damit werkstofflich wiederverwenden. Für die anderen Polymer-Grundtypen Elastomere und Duromere gilt das nicht, denn ihre Ketten sind chemisch untereinander vernetzt; sie müssen chemisch recycelt werden.



Abbildung 15: Kunststoffrecyklate

⁷² <https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/p2x>

⁷³ <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>

⁷⁴ Conversio Market & Strategy GmbH based on the input of the Plastics Europe Market Research Group (PEMRG),

⁷⁵ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52017DC0034>

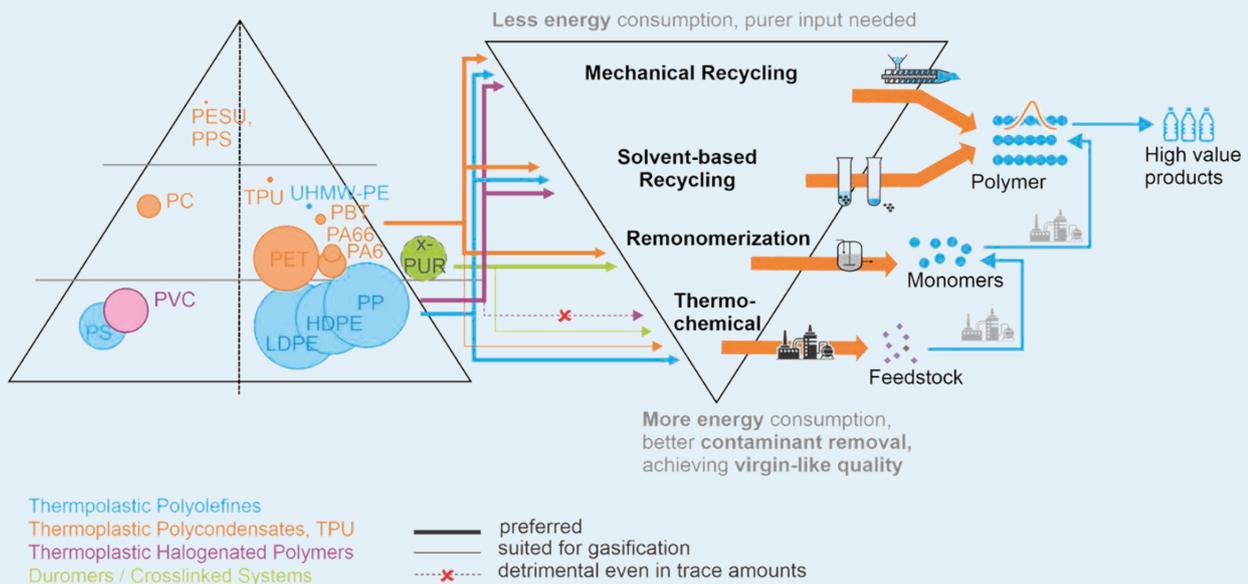


Abbildung 16: Recyclingverfahren für verschiedene Kunststoffarten (Quelle: Quelle: Mangold, H. and von Vacano, B. (2022), *The Frontier of Plastics Recycling: Rethinking Waste as a Resource for High-Value Applications*)
 Die Größe der Kreise gibt die Produktionsmengen an. Die Positionierung in der linken „Polymerpyramide“ entspricht den Polymer-Materialpreisen (höher weiter oben), sowie links für amorphe, rechts für kristalline Polymere.)

Der spezifische Energieaufwand steigt in erster Näherung an, je kleiner die chemische Einheit ist, in welche die Kunststoffe im Recyclingprozess zerlegt werden. Gleichzeitig erhöht sich die Flexibilität in der Produktion und die Möglichkeit, Verunreinigungen und Gemische durch die weiteren Stufen der chemischen Prozes-

sierung zu entfernen und Neuwaren-gleiche Qualitäten erzeugen zu können. Die verschiedenen Verfahren ergänzen sich daher komplementär, um auch unterschiedlichste Kunststoffströme möglichst weitgehend zu recyceln.

4.2.9 DIE ROLLE DES WASSERS IN DEN ZIRKULÄREN VERFAHREN

Die Nutzung von Wasser als Rohstoff, Lösungsmittel, Transport- oder Kühlmedium wird in der Prozessindustrie seit langem in Kreisläufen realisiert, z. B. in Kühl-, Dampf-/Kondensat- oder Spülkreisläufen. Mit dem Übergang zur Circular Economy werden sich die Verfahren der (Ab)wasserbehandlung aber insgesamt wandeln, von einer Wasserreinigung mit dem Ziel der Entfernung von Inhaltsstoffen hin zu einer Fokussierung auf die Nutzung der Inhaltsstoffe (vgl. z.B. Abbildung 17), des Wassers und der darin enthaltenen Wärmeenergie.

Gleichzeitig ist bereits jetzt abzusehen, dass die Umstellung der Produktion in der Prozessindustrie auf eine Circular Economy signifikante Auswirkungen auf Wasserbedarfe und das industrielle Wassermanagement haben werden.⁷⁶ Aus chemischen Recyclingverfahren

oder Prozessen auf Basis nachwachsender Rohstoffe und biotechnologischen Verfahren fallen wässrige Restströme an, die durch hohe Volumenströme und hohe organische und Salz-Frachten gekennzeichnet sind.

So basieren chemische Recyclingverfahren häufig auf hydrolytischen Kernprozessen, bei denen der pH-Wert sowohl im Löseprozess als auch in den nachfolgenden Trenn- und Aufarbeitungsschritten eingestellt wird. Daraus resultiert ein signifikanter Salzeintrag in die wässrigen Restströme, der von hohen organischen Stoffeinträgen begleitet wird. Für die Aufbereitung von Biomasse zur stofflichen Nutzung kommen häufig hydrothermale Verfahren zum Einsatz, bei denen die Rohstoffe mit Hilfe von Wasserdampf unter Druck vorbehandelt werden und entsprechend größere Mengen Prozesswasser anfallen. Biotechnologische Verfahren finden häufig in wässriger Phase statt, mit Stoffeinträ-

⁷⁶ („Auswirkungen der Circular Economy in der Prozessindustrie auf das industrielle Wassermanagement - Diskussionspapier,“ 2022)



Abbildung 17:
NaCl-Recycling aus
Prozesswasser für die
Chlorerzeugung (Quelle:
Covestro Deutschland AG)

gen aus der Fermentation, durch Nebenkomponenten der Rohstoffe oder im downstream processing. Diese Herausforderungen können die ökonomische und ökologische Realisierbarkeit des Gesamtprozesses beeinflussen.⁷⁷

Auch für Prozesse, für die Wasserstoff benötigt wird (z.B. zur Schließung des Kohlenstoffkreislaufs über Power-to-X oder als Reduktionsmittel im chemischen Recycling oder bei der Stahlherstellung), spielt Wasser eine wesentliche Rolle. „Grüner“ Wasserstoff wird durch Wasser-Elektrolyse mit erneuerbarem Strom gewonnen. Damit ist die Verfügbarkeit von ausreichenden Mengen an sauberem Wasser eine wesentliche Voraussetzung für die Umsetzung der Circular Economy, gleichzeitig führt dies aber auch zu Zielkonflikten, wenn in Regionen mit einer hohen Verfügbarkeit an erneuerbarer Energie Wasserknappheit herrscht.⁷⁸

Insgesamt ergeben sich daraus erhebliche Herausforderungen für die Deckung regionaler Wasserbedarfe, die Abwasserbehandlung und das Schließen von Wasserkreisläufen. In der Skalierung einer Circular Economy kann dies disruptive Auswirkungen auf das industrielle Wassermanagement haben, so dass dieses von Anfang an mit zu entwickeln ist.

4.3. VERFAHRENSTECHNIK FÜR CIRCULAR SUPPORT

Unter “Circular Support” versteht die EU-Taxonomie die Entwicklung von Werkzeugen, Anwendungen und Dienstleistungen, die die Umsetzung von Strategien zur Circular Economy ermöglichen.

4.3.1. EFFIZIENTE STEUERUNG VON ROHSTOFFEN UND PROZESSEN: BILANZIERUNG UND DIGITALISIERUNG

Für Unternehmen oder Produkte stellt sich die Frage nach dem Anteil zirkulären Inhalts ganz unmittelbar, wenn es um die Zuordnung von (Mehr)Kosten der Herstellung geht. Je stärker die Kreislaufführung über grundlegende Bausteine geführt wird, beispielweise Metalloxide oder kohlenstoffbasierte chemische Grundstoffe aus erneuerbaren Quellen oder Recycling, desto wahrscheinlicher ist die Nutzung in großtechnischen Anlagen zusammen mit primären Rohstoffen. Systemisch aus Kreislaufsicht betrachtet macht eine solche gemischte Beschickung keinen Unterschied. Es kann jedoch eine Zuschreibung der Kreislaufeigenschaft auf Produktebene notwendig sein, um die einhergehenden Mehrkosten der Kreislauf-Transformation verpreisen

und die Transformation finanzieren zu können, wenn bestehende Infrastruktur genutzt wird. Dies kann durch Ansätze einer transparenten Allokation über Massenbilanzierung (“mass balance”) erfolgen. Eine Analogie dazu ist der Vertrieb von “grünem” Strom über die identische Infrastruktur wie konventionell erzeugte Elektrizität.

Digitalisierung kann dazu beitragen, Rohstoffströme nachzuverfolgen und ihre Logistik zu optimieren, die Transparenz, Effizienz und Sicherheit der chemischen Prozesse zu erhöhen und das komplexe Gesamtsystem der Circular Economy besser zu steuern.⁷⁹ Eine durchgängige Datenstruktur, die von allen Teilnehmern der Circular Economy genutzt werden kann, ist die wesentliche Basis dafür.

Speziell in der Verfahrenstechnik sind die digitale Repräsentation der Prozesse und zugehörige Daten notwendig, um den Erfolg von kreislauforientierten Stoffströmen und Geschäftsmodellen zu messen und zu bewerten. Durch den Einsatz von Methoden der künstlichen Intelligenz können Produktionsprozesse optimiert und Ressourcen effizienter genutzt werden.⁸⁰ Dazu gehören eine verbesserte Analytik zur Rohstoffsartierung, die Steuerung komplexer Prozesse auf Basis von trainierten Daten aus erfolgreichen Prozessen sowie eine

verbesserte Logistik. Die Automatisierung spielt dabei eine wichtige Rolle für die Optimierung von Energie- und Materialströmen.

4.3.2. SYSTEMISCHE ANSÄTZE

Angesichts der Komplexität des Systems „Circular Economy“ und der Zielkonflikte, die aus der Berücksichtigung der Säulen Ökologie, Ökonomie und soziale Faktoren entstehen, ist die Beurteilung unterschiedlicher Handlungsoptionen nicht einfach. Zudem bestehen an zahlreichen Stellen Wechselwirkungen zwischen den Kreisläufen und Entscheidungen zugunsten einer Option schränken, z.B. aufgrund von knappen Ressourcen wie erneuerbarer Energie, den Entscheidungsraum an anderer Stelle ein. Entscheidungshilfen können Ontologien und Modellierungs-Tools bieten, die bisher jedoch häufig nur einen Stoffkreislauf berücksichtigen.^{81, 82, 83}

Wichtige Koppelglieder in der Circular Economy sind die Elemente Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff und deren Verbindungen. Durch die Energiezu- und -abfuhr sowie Stoffwandlung und Synthesen bei Produktion, Nutzung und Recycling bilden sie den Übergang zwischen den Sektoren. Deshalb sind sie neben z.B. den Fasern beim Papier, den Eisenverbindungen oder Glaschmelzen zusätzliche Zielgrößen der Prozesse. Die Ele-

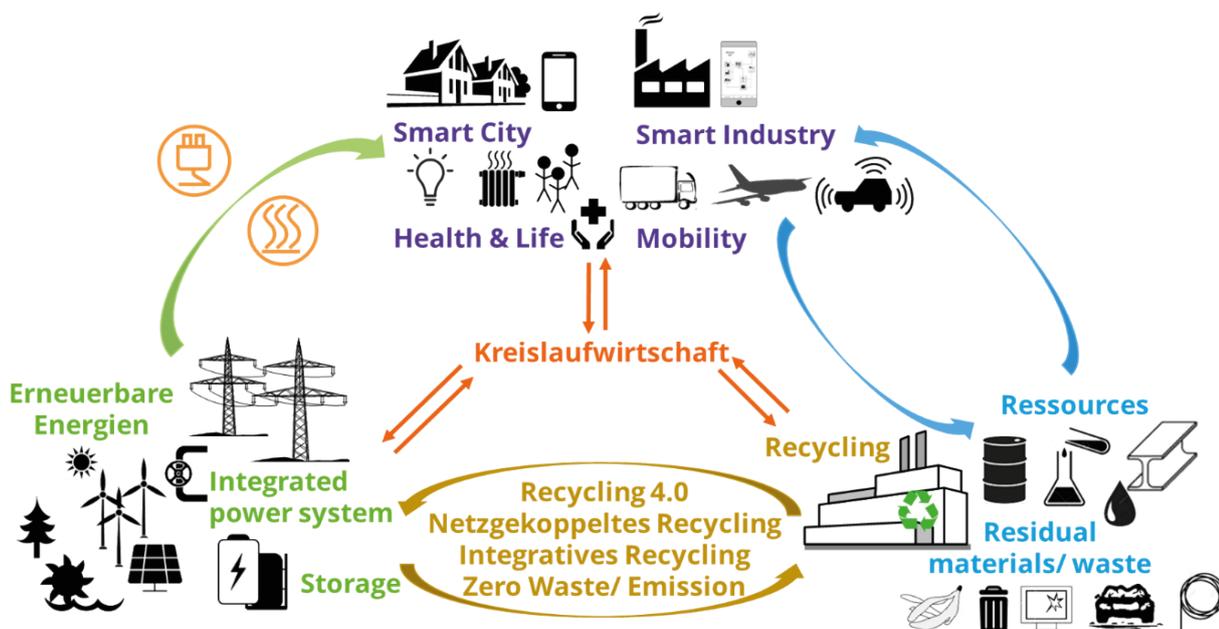


Abbildung 18: Sektorenkopplung - Rohstoff- und Energieverbund (Quelle: TU Dresden)

⁷⁹ (Bazzanella et al., 2016)

⁸⁰ (Draese, 2023)

⁸¹ (Pacheco-López et al., 2023)

⁸² (Cieno et al., 2023)

⁸³ (Lase et al., 2023)



mente und deren Verbindungen (CO₂, H₂, CH₄, CH₃OH u.w.) koppeln die Sektoren mehrdimensional.

Energie wird sowohl für Herstellungs- als auch Rückgewinnungsprozesse benötigt. Mit Energie lassen sich Stoffe umwandeln und bei der Stoffumwandlung wird nutzbare Energie frei. Damit bilden Stoff und Energie im Sinne der Circular Economy einen Verbund (Abbildung 18).

Handlungsempfehlungen

- » *Systemorientierte Perspektive*: Ein verbessertes Verständnis der Systemintegration und der Vernetzungsmöglichkeiten aller Technologieoptionen ist notwendig. Dabei werden Sektor-interne und -übergreifende Lösungsansätze analysiert und bewertet. Das betrifft die Planungsphase mit standardisierten Lösungsmöglichkeiten wie auch die damit verbundene Ausführungsphase und anschließende Betriebsphase. Orthogonal dazu können verschiedene Lösungsmöglichkeiten auf verschiedene Felder der Circular Economy angewendet werden, wie das digitale Management der Abfallströme⁸⁴, das Schließen von Stoffkreisläufen für verschiedene Materialien und Anwendungen sowie die Integration der regenerativen Energieversorgung mit zeitlich und örtlich fluktuierendem Angebot.
- » *Ökonomische Ansätze zum Marktdesign und Marktsteuerung, die Nachhaltigkeitskriterien berücksichtigen*, bieten basierend auf technologiefokussierten Analysen Steuerungsinstrumente zur adäquaten Anreizsetzung im Systemkontext. Hier können durch Steuern und Abgaben sowie durch finanzielle Unterstützung neue Technologien weiterentwickelt und auf verschiedene Anwendungen optimiert werden. Für die verschiedenen Anwendungsfelder können Standardlösungen wie auch angepasste Lösungen erfolgreich entwickelt werden. Insbesondere kommt der Automatisierung eine wichtige Rolle zu.
- » *Für die Ermittlung und Dokumentation geeigneter Indikatoren für Nachhaltigkeitskriterien* (Kapitel 5) sind einheitliche Standards nebst Metasystemen erforderlich, die nicht nur die Methodik inklusive etwaiger Berechnungsvorschriften für die Ermittlung der mit den Kriterien verbundenen Parameter regelt, sondern auch den Umgang mit anwendungsübergreifenden Informationen bzw. Daten, z.B. zu Ressourcen, Produkten, Dienstleistungen.
- » *Energieversorgung durch regenerative Quellen mit Schwankungen und dezentraler Verfügbarkeit*:
 1. Integration erneuerbarer Energiequellen wie

Solarenergie, Windenergie und Biomasse zur Bereitstellung nachhaltiger Energie für dezentrale Anlagen.

2. Entwicklung von Speichertechnologien, um die intermittierende Natur erneuerbarer Energiequellen auszugleichen. Auch Zwischenprodukte und die Bereitstellung von Rohstoffen aus der Circular Economy kann zur Speicherung regenerativ erzeugter Energie verwendet werden.
- » Untersuchung der Wirtschaftlichkeit dezentraler, modularer Anlagen im Vergleich zu zentralisierten Systemen.
 - » Analyse von neuen Geschäftsmodellen und finanziellen Werkzeugen, die Anreize für Investitionen in nachhaltige, dezentrale Technologien schaffen und den Betrieb von Recyclinganlagen wirtschaftlich gestalten.
 - » Integration von Kreislaufströmen, um den Ressourcenverbrauch zu minimieren und Abfall zu reduzieren.
 - » Implementierung von fortschrittlichen Technologien und deren Vernetzung zur Überwachung und Steuerung von Materialströmen.
 - » Qualitative und quantitative Bewertung der Auswirkungen der Circular Economy auf Infrastrukturprozesse wie das industrielle Wassermanagement, daraus abgeleitet Entwicklung übergreifender technologischer Ansätze und Verfahren mit Fokus auf deren Kreislaufschließung und Rückgewinnung (Stoffe, Energie).

4.3.3. ANSÄTZE DER BIOÖKONOMIE

Circular Economy ist nicht denkbar ohne die Einbeziehung bzw. die Anbindung der Bioökonomie. Biologische Systeme wie Pflanzen oder Algen sind das entscheidende Glied für die Schließung des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs, weil sie CO₂ mit Hilfe erneuerbarer Energie aus dem Sonnenlicht in Biomasse und damit potenzielle Rohstoffe umwandeln. Aber auch biobasierte Prozesse, die mit Hilfe von Organismen oder Enzymen Stoffe umwandeln und dabei häufig unter mildereren Bedingungen arbeiten als „klassische“ chemische Prozesse, können wichtige Beiträge für Kreislaufschließungen leisten. Gemäß der Nationalen Bioökonomiestrategie (s. Kapitel 8.2.) hat die Bioökonomie das Ziel, „Ökonomie und Ökologie für ein nachhaltiges Wirtschaften zu verbinden. In diesem Zusammenhang umfasst sie ...die Erzeugung, Erschließung und Nutzung

biologischer Ressourcen, Prozesse und Systeme, um Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in allen wirtschaftlichen Sektoren im Rahmen eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems bereitzustellen.“

Aktivitäten im Bereich der Bioökonomie sind vielfältig und umfassen sowohl Forschung und Entwicklung als auch die Umsetzung erfolgversprechender Ansätze in die Praxis. Bioökonomische Ansätze befassen sich beispielsweise mit drängenden Fragen zur Inwertsetzung von Rohstoffen aus der Land- und Forstwirtschaft wie auch Reststoffen aus Abfall, Abwasser und Abgasen. Gleichzeitig leistet Biomasse einen Beitrag für eine nachhaltige Energieversorgung. Stroh, Kleie und Haushaltsabfälle werden zu Bioethanol oder Biogas umgesetzt; hochwertiger Kompost entsteht als Nebenprodukt, das in die Erzeugung von Nutzpflanzen zurückgeführt wird. Kreislaufschließung erfolgt auch durch die Einarbeitung landwirtschaftlicher Nebenströme in Futtermittel, neuartige Lebensmittel und als Medienbestandteile für Bioprozesse.

Dieser kleine Ausschnitt aus dem Tätigkeitsfeld der Bioökonomie illustriert, dass die Schließung stofflicher Kreisläufe und die nachhaltige Verfahrens- und Produktentwicklung zentrale Elemente der Forschungs- und Translationsaktivitäten sind.

Am augenfälligsten wird das beim Kohlenstoffkreislauf. Die Bindung von CO₂ in Biomasse wie Pflanzen, Algen oder Mikroorganismen spielt eine wesentliche Rolle. Gelingt es, die entstehende Biomasse wertschöpfend zu nutzen – sowohl einzelne Inhaltsstoffe als auch die Gesamtbioasse – ist damit ein wesentlicher Beitrag für eine Circular Economy geleistet.

Ziel ist in vielen Fällen, fossile Kohlenstoffquellen durch biobasierte Rohstoffe zu ersetzen. Das gilt z.B. bei biobasierten Kunststoffen, aber auch bei zahlreichen fermentativ hergestellten Produkten wie Pharmazeutika, Bestandteilen von Ölen, Farben und Lacken und vielen weiteren Stoffen. Das Konzept der „Bioraffinerie“ setzt darauf, die komplexen erdölbasierten Produktionspfade vollständig durch biobasierte Routen zu ersetzen und Grund- sowie Feinchemikalien in großem Maßstab herzustellen. Eines der jüngsten Beispiele ist das in Entwicklung befindliche Verfahren zur Herstellung von biobasiertem Anilin, einer wichtigen Grundchemikalie für die Herstellung von z. B. Kunststoffen. Dabei werden pflanzliche Kohlenhydrate durch Fermentation in ein Zwischenprodukt umgewandelt, welches dann in einem weiteren Schritt zu Anilin umgesetzt wird.

Neben dem dominierenden Kohlenstoffkreislauf stehen aber auch andere Kreisläufe, beispielsweise für Stickstoff, Phosphor oder auch für seltene Elemente, im Mittelpunkt des Interesses. Wasser ermöglicht die Prozesse der Bioökonomie, gleichzeitig ergeben sich Herausforderungen aus den Bedarfen und technologisch bei Reinigung und Kreislaufführung.

Arbeiten zur Kreislaufschließung werden vielfältig vorangetrieben und sind bereits Gegenstand einer Reihe strategischer Stellungnahmen. Neben denen auf europäischer Ebene (z.B. die EU Bioeconomy Strategy nebst Progress Reports) seien beispielhaft die „Roadmap Bioraffinerien“ des Bundes (05/2012), die „Nationale Bioökonomiestrategie“ des Bundes (06/2020) und die „Handlungsempfehlungen des Bioökonomierates“ (03/2023) genannt. Daneben verfolgen viele Bundeslän-



*Abbildung 19:
Pilotanlage zur
Herstellung von Anilin
aus nachwachsenden
Rohstoffen (Quelle:
Covestro Deutschland AG)*

der teils übergreifende Bioökonomie-Strategien, von denen die Landesstrategie „Nachhaltige Bioökonomie (s. Kapitel 8.2.) für Baden-Württemberg“ (06/2019) als erste verabschiedet wurde.

Bioökonomische Beiträge sind für sehr viele der in die-

sem Papier genannten Bereiche von Bedeutung aufgrund der Vielfalt von relevanten technologischen Ansätzen, die von Fragen der Biologie (z.B. Pflanzenbiotechnologie oder Entwicklung von mikrobiellen Produktionsstämmen) über die Prozess- und Reaktionstechnik und die Verknüpfung mit chemischen Verfahren bis hin zur Gestaltung von

5. Circular Economy messbar machen

Das Konzept der Circular Economy zielt, wie eingangs beschrieben, auf ein nachhaltiges Ressourcenmanagement unter besonderer Berücksichtigung von Klimaschutz und Rohstoffsicherheit. Die Forderung „Circular Economy messbar machen“ bedeutet insofern, dass sich Maßnahmen der Circular Economy auch bezüglich ihres Beitrags zur Erfüllung dieser Zielsetzungen messen lassen müssen. Der Begriff „messen“ ist hier jedoch nicht gleichzusetzen mit seiner Bedeutung im naturwissenschaftlichen Umfeld, in dem er für die chemisch-analytische oder physikalisch-analytische Gewinnung von Messdaten steht. Die „Messbarkeit“ von Maßnahmen der Circular Economy setzt zwar auch voraus, dass zu bestimmten Sachverhalten Messdaten vorliegen. Für die Einschätzung des Beitrags oder der Wirkung von Maßnahmen müssen jedoch viele Daten und Informationen in Zusammenhang gesetzt und bewertet werden. Dazu sind Methoden vorhanden, die teils in einfacher, aber standardisierter Weise Informationen zusammenführen, teils aber auch auf komplexen Modellierungsansätzen zur Abbildung systemarer Zusammenhänge beruhen. Das Ergebnis dieser Methoden sind „Messgrößen“ der Circular Economy: Indikatoren für einzelne Aspekte des nachhaltigen Ressourcenmanagements, die Maßnahmen oder Objekte bewerten und der Entscheidungsunterstützung dienen können. Dazu ist als Hintergrund ein grundlegendes Verständnis für den Charakter von Indikatoren und unterschiedlichen Bewertungsmethoden erforderlich.

Fallbeispiel: „Messbarkeit“ von CO₂-Emissionen

Hört man die Aussage „Deutschland hat im Jahr 20xx die Menge von X Tonnen CO₂ emittiert“, so kann man sicher sein, dass diese Zahl nicht durch direkte Messungen ermittelt wurde. Vielmehr wird sie nach einem von den

Vereinten Nationen vorgegebenen Verfahren berechnet. Einfach gesagt beruht dieses Rechenverfahren auf empirisch ermittelten Faktoren („Emissionsfaktoren“): Diese geben an, welche Menge an CO₂ durch eine Einheit einer bestimmten wirtschaftlichen Aktivität emittiert wird, beispielsweise durch die Produktion einer Tonne Zement im Zementwerk oder durch den Transport von Gütern mit LKW über eine bestimmte Distanz. Diese Emissionsfaktoren werden dann mit den statistischen Angaben zum Umfang der entsprechenden Aktivität multipliziert, also z.B. mit der Angabe, wieviel Tonnen Zement in einem bestimmten Jahr in Deutschland insgesamt produziert wurden, oder mit den insgesamt gefahrenen Transportkilometern für LKW. Die Summe der Ergebnisse für alle betrachteten Aktivitäten ergibt die Gesamtemission von Deutschland.

5.1. DER HINTERGRUND: INDIKATOREN UND BEWERTUNGSMETHODEN

Indikatoren sind Stellvertretergrößen für komplexe Objekte oder Sachverhalte. Sie werden in vielen Bereichen für wissenschaftliche und praktische Zwecke verwendet, beispielsweise zur Verfolgung von zeitlichen Entwicklungen oder zur Ermittlung von Zielerreichungsgraden. Insofern spielen sie auch eine große Rolle für die Entwicklung und Überwachung von Strategien und Maßnahmen der Circular Economy. Trotz der Konzeption von Indikatoren als einfache Stellvertretergrößen führt ihre Vielfalt in Verbindung mit den unterschiedlichen Vorgehensweisen ihrer Ableitung selbst wieder zu einer hohen Komplexität. Wie bereits oben gesagt, werden Indikatoren nur in den seltensten Fällen direkt „gemessen“; vielmehr werden

sie zumeist aus vorhandenen Daten berechnet, wobei die Berechnung je nach Definition eines Indikators auf einem einfachen Algorithmus beruhen, aber auch auf Basis einer anspruchsvollen Modellbildung erfolgen kann. Ein Indikator und die damit verbundene Aussage können daher nur im Kontext der zu Grunde liegenden Berechnungsmethode bzw. des entsprechenden Modells verstanden und interpretiert werden. Eine ausführliche Darstellung des Themengebiets der Indikatorik mit einem Fokus auf den Bereichen Ressourceneffizienz und Circular Economy findet sich in⁸⁵.

Im Hinblick auf die Zielstellungen der Circular Economy stehen Indikatoren für verschiedene Aspekte der nachhaltigen Entwicklung, insbesondere die Schonung von Ressourcen und den Klimaschutz, häufig subsummiert unter der Bezeichnung „Nachhaltigkeitsbewertung“. Auch hierunter verbergen sich unterschiedliche methodische Ansätze (für eine Übersicht siehe z.B. ^{86, 87}), die sich, unabhängig von der Vielzahl verfügbarer Bezeichnungen, grundlegenden Typen zuordnen lassen. Darunter sind Methoden des Life Cycle Assessment (Lebenszyklusanalyse bzw. Ökobilanz, kurz LCA) und der Materialflussanalyse (auch als Stoffstromanalyse bezeichnet) häufig vertreten.

Aus diesen Methoden werden v.a. Indikatoren auf der Zielebene abgeleitet, z.B. zur Minderung von Treibhausgasen, aber auch auf der operativen Ebene, z.B. zu Recyclingquoten für bestimmte Stoffströme. Auch für eine ökonomische Umsetzung der Circular Economy sind transparente, vertrauenswürdige Indikatoren eine wesentliche Grundlage für die Erfüllung regulatorischer Vor-

gaben, Zuweisung ökonomischer Incentives oder auch Verpreisung der Aufwände entlang einer zirkulären Wertschöpfungskette.

5.2. DIE BOTTOM-UP-PERSPEKTIVE: LEBENSZYKLUSANALYSE / LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)

Das Life Cycle Assessment (deutsch Ökobilanz) basiert konzeptionell auf dem Lebenszyklus von Produkten „von der Wiege bis zur Bahre“, d.h. von der Rohstoffentnahme über die Herstellung, die Phase der Nutzung bis hin zur Phase der Entsorgung bzw. des Recyclings. Über (Konsum-)Produkte hinaus werden auch die Umweltwirkungen von Dienstleistungen, Produktionsprozessen oder Technologien untersucht. Systemgrenzen beschreiben die Aktivitäten, die in den betrachteten Lebenszyklusphasen berücksichtigt werden.

Die Methodik zur Erstellung eines LCA ist in internationalen Normen⁸⁸ beschrieben. Sie umfasst die Ermittlung von Stoff- und Energieströmen in einem Prozesskettenmodell und die Quantifizierung von deren potenziellen Wirkungen auf die Umwelt in sogenannten Wirkungskategorien, die für unterschiedliche Umweltprobleme wie Treibhauseffekt oder Eutrophierung (Überdüngung) stehen. Als Ergebnis einer LCA werden die Umweltwirkungen des Lebenszyklus quantitativ ausgewiesen als Wirkungsindikatoren für eine Einheit eines Produkts (z.B. ein Megajoule Kraftstoff oder eine Tonne Methanol) oder die durch ein Produkt bewirkte Funktion (z.B. den Transport einer Tonne Güter über 100 km). Diese „Bottom-up“-Perspektive, d.h. der relative Ansatz pro Produkt bzw. Funktion, ermöglicht



Abbildung 20: Life-Cycle-Analysen beruhen auf einer Vielzahl von Parametern (Quelle: Adobe Stock)

⁸⁵ (Schebek and et al., 2024)

⁸⁶ (Andes et al., 2019)

⁸⁷ (Kaltschmitt and Schebek, 2015)

es, Vergleiche zwischen der Umweltperformance unterschiedlicher Produkte, Technologien oder Dienstleistungen auf einer einheitlichen Vergleichseinheit durchzuführen. Umgekehrt bedeutet dies, dass das LCA nicht zu absoluten Ergebnissen z.B. für eine Volkswirtschaft führt bzw. dass diese zusätzlichen Annahmen und Modellierungsansätze erfordern.

Ein großer Vorteil des LCA ist, dass aufgrund der ganzheitlichen Betrachtung Problemverschiebungen zwischen einzelnen Lebenszyklusphasen und Umweltproblembereichen ausgewiesen werden können. Deshalb werden LCA und davon abgeleitete Methoden, wie z. B. Environmental-Footprint-Ansätze, heute sehr vielfältig in Wissenschaft, Industrie und Politik genutzt. Dabei hängt die jeweils angewandte Methode sowie damit verbundene Komplexität respektive Detailtiefe im Regelfall von der spezifischen Fragestellung ab. Umfängliche LCA gemäß ISO eignen sich beispielsweise im wissenschaftlichen oder unternehmensinternen Kontext für das detaillierte Verständnis von Prozessketten für Produkte und Dienstleistungen in spezifisch festgelegten Sachbilanzgrenzen und die Verbesserung einzelner Kettenelemente bezogen auf bestimmte Parameter. Wird die LCA ein verbindliches Element in der Gesetz- bzw. Richtlinienggebung, bedarf es hingegen für alle (Markt-)Akteure eines in der Praxis mit vertretbarem Zusatzaufwand umsetzbaren vereinfachten, robusten und transparenten Vorgehens, das in dann festgelegten Sachbilanzgrenzen und vorgegebenen Berechnungsformeln Vergleichbarkeit schafft. Ein Beispiel dafür ist die Festlegung ausgewählter Nachhaltigkeitsanforderungen und der Nachweis von Mindesttreibhausgasminderungen für erneuerbare Kraftstoffe in der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU (Renewable Energy Directive, kurz RED).⁸⁹

Ein weiteres Beispiel ist die Ermittlung von Treibhausgasemissionen von Unternehmen oder Organisationen gemäß dem sog. Greenhouse Gas (GHG) Protocol⁹⁰. In der Weiterentwicklung vergleichbarer Systeme für die Circular Economy ist ebenso eine Standardisierung von Methodik, Systemgrenzen und Datengrundlagen erforderlich, um Vergleichbarkeit herzustellen. Neben bereits etablierten regulatorischen Rahmen, wie der EU RED, sind auf EU-Ebene weitere Maßnahmen in Planung und Ausführung. Ein Beispiel hierbei ist die Überarbeitung der so genannten „Ecodesign Directive for Sustainable Products“ (kurz ESPR). Die ESPR soll Anreize dafür schaffen, dass produktbezogene Informationen in digitalen Produktpässen veröffentlicht werden. Diese digitalen Produktpässe sollen zum Beispiel den Energieverbrauch und den CO₂-

Fußabdruck der Produkte enthalten, die auf dem europäischen Markt in Umlauf gebracht werden. Damit sollen Verbraucher bewusste Entscheidungen auf Basis wissenschaftlicher Kennzahlen treffen können.

5.3. DIE TOP-DOWN-PERSPEKTIVE: MATERIALFLUSSANALYSEN (MFA)

Materialflussanalysen (MFA) blicken aus einer „top-down“ Perspektive auf Stoffströme innerhalb einer Volkswirtschaft, einzelner Wirtschaftssektoren oder innerhalb regionaler Grenzen. Der Fokus einer Studie liegt immer auf ausgewählten Stoff- bzw. Materialströmen. Dies können einzelne Elemente sein (z.B. Kohlenstoff oder kritische Rohstoffe wie Kobalt), aber auch Materialien wie Holz, Kunststoffe oder mineralische Baustoffe. Für MFA gibt es bislang noch keine internationale Standardisierung, weshalb unter diesem Namen unterschiedliche Modellierungsansätze verfolgt werden. Meist liegt einer MFA aber der methodische Ansatz von Massenbilanzen zu Grunde.

Dies hat den Vorteil, dass nicht nur Stoff- bzw. Materialströme, sondern auch die Veränderungen des „Lagers“ identifiziert werden können: mit dem Begriff „Lager“ ist hier der Bestand langlebiger Güter in der Nutzung einer Volkswirtschaft gemeint. Solche langlebigen Güter sind insbesondere Gebäude und Infrastruktureinrichtungen, aber beispielsweise auch technische Produkte wie Fahrzeuge. Letztgenanntes Element der Stoffstrommodellierung ist für die Circular Economy sehr relevant, um mittels dynamischer Materialflussanalysen (siehe dazu ⁹¹) diejenigen Mengen langlebiger materieller Güter und darin gebundener Materialien zu berücksichtigen, die zu einem zukünftigen Zeitpunkt in den Wirtschaftskreislauf fließen und für ein Recycling zur Verfügung stehen. Insgesamt werden MFA in der Circular Economy vor allem für die Analyse von Materialkreisläufen im Hinblick auf das Recycling genutzt.

Ihr wesentlicher Vorteil ist es, Aussagen zu absoluten Größen von Stoffströmen und -lagern in der Volkswirtschaft bereitzustellen. In der Circular Economy liegt ein solcher Materialstromansatz den Definitionen von Quoten für Materialkreisläufe zu Grunde, die als operative Indikatoren für das Recycling dienen (z.B. Recyclingquote oder Substitutionsquote). Der Nachteil solcher operativer Indikatoren ist, dass sie keinen direkten Aufschluss über die eigentlichen Zielstellungen der Reduktion von Ressourcenverbräuchen und Treibhausgasemissionen geben.

5.4. ANWENDUNG VON INDIKATOREN IN DER CIRCULAR ECONOMY

Die Anwendung von Indikatoren in der Circular Economy ist mit verschiedenen Herausforderungen verbunden, die zum einen immanent mit den Methoden verbunden sind und zum anderen mit spezifischen Aspekten der Circular Economy zusammenhängen, insbesondere mit der Bilanzierung von Materialkreisläufen. Ein immanentes Problem aller Methoden zur Nachhaltigkeitsbewertung ist die Auswahl und Anzahl von Indikatoren auf der Zielebene.

Die übergeordnete Zielsetzung der Circular Economy ist die Schonung natürlicher Ressourcen, die in unterschiedliche Einzelaspekte aufgeteilt, durch unterschiedliche Indikatoren dargestellt werden. Die Anzahl möglicher oder gewünschter Indikatoren vergrößert sich durch die Einbeziehung weiterer Zielsetzungen, z.B. Rückgewinnung kritischer Rohstoffe, volkswirtschaftliche Kosten oder gesellschaftliche Aspekte (wobei für die letztgenannten weitere Methoden über LCA und MFA hinaus einbezogen werden müssen)⁹². Eine große Anzahl von Indikatoren ist auf der einen Seite sinnvoll, um Zielkonflikte aufzuzeigen. Auf der anderen Seite muss für eine Entscheidungsfindung eine Prioritätensetzung zwischen diesen Indikatoren in Abhängigkeit von den betrachteten Materialströmen (z.B. Batterien, Metalle, Kunststoffe) erfolgen. Dies erfolgt nicht „automatisch“ in einer Bewertungsmethode, sondern erfordert auch eine gesellschaftliche bzw. politische Diskussion. So könnte beispielsweise die Frage gestellt werden, ob die Rückgewinnung eines kritischen Rohstoffes so prioritär gesehen wird, dass dafür auch ein höherer Energieeinsatz oder höhere Treibhausgas-Emissionen in einem bestimmten Umfang in Kauf genommen werden sollen. Eine Priorisierung von Zielen für verschiedene Materialströme der Circular Economy muss deshalb unter Umständen unterschiedlich vorgenommen werden.

Im politischen Diskurs zur Circular Economy haben heute vor allem zwei Zielsetzungen Priorität: der Klimaschutz und die Einsparung von Primärrohstoffen. Während das Life Cycle Assessment für den Bereich des Klimaschutzes auf den etablierten Wirkungsindikator des Global Warming Potential (GWP) zurückgreifen kann, ist die Frage eines Indikators für den Rohstoff-„Verbrauch“ komplexer, da bereits der Begriff „Verbrauch“ für viele Rohstoffe eigentlich nicht zutreffend ist: so bleiben insbesondere Metalle als Elemente erhalten und werden beim „Verbrauch“

nur vom Erz in Produkte bzw. Abfälle verteilt. In der Wirkungsabschätzung des LCA wird bisher vor allem die Entnahme von Rohstoffen aus der Umwelt als Basis für die Ermittlung der Umweltwirkungen angewandt. Jedoch liefern Methodenentwickler Denkanstöße oder Ansätze für neue Konzepte, denen im Zusammenhang mit abiotischen Rohstoffen das Konzept der Dissipation zu Grunde liegt. Um es als Indikator für die Wirkungsabschätzung nutzbar zu machen, müssten sowohl die Struktur der Elementarflüsse überarbeitet als auch die Wirkungsabschätzungsmethoden für die Bewertung der Ressourcennutzung angepasst werden. Auch eine genaue Definition, welche Rohstoffnutzung als „dissipativ“ anzusehen ist, ist für diese Umsetzung notwendig. Ein Überblick zu den aktuell vorliegenden Ansätzen und Methoden findet sich bei ⁹³. Insbesondere ist es nicht trivial, ein Wirkungsabschätzungsmodell zu entwickeln, das die Nutzung abiotischer und biotischer Ressourcen gleichermaßen abbildet. Dies wäre jedoch grundsätzlich wünschenswert, um Trade-offs bei der Nutzung biotischer und abiotischer Ressourcen auf eine einfache Art und Weise abbilden zu können.

Im Unterschied zu diesen allgemeinen methodischen Aspekten ist ein spezifischer Aspekt der Circular Economy die Bewertung der „Nachhaltigkeit“ von Materialkreisläufen, aus denen Sekundärrohstoffe zurück in die Wirtschaft fließen.

Diese Bewertung ist methodisch anspruchsvoll auf Grund spezifischer Charakteristika solcher Materialkreisläufe:

- » In der klassischen Kreislaufwirtschaft, aber auch als Bestandteil der Circular Economy, erfüllen Materialkreisläufe verschiedene Funktionen, mindestens:
 - » die umweltverträgliche Entsorgung,
 - » die Rückgewinnung von Materialien und/oder Energie und
 - » das Ersetzen fossiler Rohstoffquellen.
- » Zukünftige Wirtschaftssysteme werden diese Funktionalitäten noch erweitern. Beispiele sind die Schnittmenge mit der Bioökonomie als „Circular BioEconomy“ oder die Sektorkopplung bei Power-to-X-Verfahren zur Speicherung fluktuierender Energie und Bereitstellung von Ausgangsprodukten für nicht oder nur schwer elektrifizierbare Sektoren. Hier ist zu entscheiden, bezogen auf welche Funktionen (z.B. Bereitstellung von Material oder Bereitstellung von Energie) ein Vergleich mit alternativen Verfahren erfolgen kann/soll.

⁹² Aus Platzgründen wird hier nicht näher auf Bewertungsmethoden für ökonomische oder soziale Aspekte eingegangen. Übersichten finden sich z.B. in (Energie- und Umwelttechnik, 2016) und bei (Kaltschmitt and Schebek, 2015)

⁹³ (Berger, 2024)

- » Ein positiver Effekt von Materialkreisläufen im Hinblick auf die Einsparung von Rohstoffen und die Verminderung von Umweltbelastungen/THG-Emissionen tritt nur dann ein, wenn die Sekundärrohstoffe Primärrohstoffe substituieren. Doch in welcher Menge und Qualität können Sekundärrohstoffe in welcher Funktion tatsächlich eingesetzt werden? Ein spezieller Fall ist die Kaskadennutzung, in der die Materialien nacheinander in mehreren Kreisläufen unterschiedliche Nutzungen erfüllen.
- » Bei langlebigen Gütern ist der zeitliche Aspekt von Materialkreisläufen relevant: Materialien, die heute in Gebäuden, Windrädern oder Elektrofahrzeugen verbaut werden, stehen teils erst nach mehreren Jahrzehnten für eine Gewinnung von Sekundärrohstoffen bereit. Das bedeutet einerseits, dass für neue Technologien bzw. deren Komponenten am Anfang ihrer Nutzung kein Material für Sekundärrohstoffe zur Verfügung steht. Andererseits stellt sich bei schneller technologischer Entwicklung die Frage, ob die heute benutzten Materialien nach Ende ihrer Nutzungsdauer überhaupt noch in der gleichen Qualität oder Anwendung benötigt werden.
- » Ein weiteres Charakteristikum von Materialkreisläufen ist die Mitwirkung mehrerer Akteure: die Abfallbesitzer, die Entsorgungswirtschaft mit Sammlung, (Vor-)Sortierung und (mehrstufiger) Behandlung bis zum Sekundärrohstoff, sowie die Hersteller, die Sekundärrohstoffe abnehmen und im Idealfall ihre Produkte so gestalten, dass sie nach Ende des Gebrauchs wieder zu hochwertigen Rohstoffen aufbereitet werden können. „Lasten“ und „Nutzen“ in Materialkreisläufen sind aber ungleich verteilt. Während Sammlung, Aufbereitung und Recyclingaufwände durch Transport und Verarbeitung an verschiedenen Stellen in der Wertschöpfungskette anfallen, entsteht der Nutzen nur an einer Stelle: nämlich dort, wo Sekundärrohstoffe Primärrohstoffe ersetzen.
- » Denkt man diese Aspekte zu Ende, so verschwimmen insbesondere bei mehrfacher Kreislaufführung die Grenzen der „Kreislaufwirtschaft“ und die Definitionen von Cradle and Grave werden im Kontext von LCA-Betrachtungen in Frage gestellt. Hierfür sind geeignete Konzepte zur Festlegung der Systemgrenzen einer Bewertung zu entwickeln.
- » Zu klären ist auch, welche Mengen und welche Qualitäten von Sekundärrohstoffen tatsächlich im Markt erwartet werden können und welche Arten von Primärrohstoffen bzw. Materialien mit welcher Qualität in der Produktionskette tatsächlich ersetzt werden. Gerade hier bietet sich die Kombination der Methoden LCA und MFA an, die allerdings immer die spezifischen technischen und materialspezifischen Bedingungen des je-

weiligen Materialkreislaufs beachten muss, insbesondere für hochwertige Funktionsmaterialien wie z.B. in Batterien oder Textilien. Unbeantwortet ist bislang die Frage, wie eine eventuelle Einsparung von Ressourcen durch Substitution den unterschiedlichen Akteuren in Materialkreisläufen zuzuordnen ist. Im LCA stehen dafür verschiedene methodische Ansätze zur Verfügung, deren Wahl maßgeblich für das Ergebnis einer LCA-Studie ist.

Fallbeispiel: Bewertung von Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien

Die Einführung der Elektromobilität führt zum erheblichen Anstieg der Nachfrage nach Lithium, Cobalt und anderen Elementen als Bestandteil der erforderlichen leistungsstarken Batterien. Parallel dazu werden derzeit komplexe Recyclingverfahren entwickelt (vgl. dazu Fallbeispiel, Kapitel 4.2.3). Die Frage, in welchem Umfang ein Recyclingverfahren zur Sicherstellung von Rohstoffverfügbarkeit sowie Klimaschutz und anderen Umweltwirkungen beiträgt, kann mit den Methoden LCA und MFA auf zwei Ebenen beantwortet werden:

Die Systemgrenze des LCA umfasst die Prozesskette des Recyclings und die damit bereitgestellten Sekundärrohstoffe. Untersucht werden zum einen die Aufwendungen der Prozesskette, also Demontage, Zerkleinerung und die anschließend gewählte Recyclingroute, also pyrometallurgisch oder hydrometallurgisch. Diesen Aufwendungen wird die Einsparung gegenübergestellt, die entsteht, wenn die gewonnenen Sekundärrohstoffe (Bestandteile des Batteriegehäuses, Funktionsmaterialien bzw. die enthaltenen Elemente) primäre Rohstoffe ersetzen und damit die Umweltauswirkungen einsparen, die für deren Gewinnung entstehen würden. Die entsprechenden Netto-Einsparungen (Aufwände minus Einsparungen) werden ausgewiesen pro Masseneinheit recycelter Batterien.

Damit ist aber noch nicht die Frage beantwortet, welchen Beitrag das Recycling zur Rohstoffverfügbarkeit leisten kann. Dazu untersucht die MFA, welche die Frage Mengen an Batterien gesamtwirtschaftlich für ein Recycling überhaupt zur Verfügung stehen. Hier wird betrachtet, wieviel Batterien in den Bestand neuer Fahrzeuge eingebracht werden und wie lange sie in der Nutzung bleiben. Daraus ergibt sich die in einem bestimmten Jahr anfallende Menge an Altbatterien, aus denen über die Recyclingkette Sekundärrohstoffe generiert werden können. Stellt man diese Menge der im gleichen Jahr nachgefragten Menge für die Produktion neuer Batterien gegenüber, so lässt sich der Beitrag zur Rohstoffverfügbarkeit abschätzen.

Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf

- » Für die Bewertung der Circular Economy stehen fundierte und wissenschaftlich abgesicherte Methoden zur Verfügung, mit denen der Beitrag von Maßnahmen zu den Zielsetzungen eines nachhaltigen Ressourcenmanagements aufgezeigt werden kann. Diese Methoden sollten bei der Entwicklung technologischer Verfahren begleitend und in möglichst frühen Phasen eingesetzt werden. Ebenso sollten diese Methoden für die Konzeption von Steuergrößen in der Circular Economy (z.B. Recyclingquoten) und für das Monitoring des Erfolgs von implementierten Maßnahmen zur Anwendung kommen.
- » Im Hinblick auf die spezifischen Aspekte der Circular Economy und die aktuellen technologischen Entwicklungen ist für eine konsistente Bewertung von Strategien und Maßnahmen auf unterschiedlichen Ebenen die

Weiterentwicklung von Methoden und Indikatoren nötig:

- » zur Verknüpfung einfacher operativer Indikatoren (z.B. Recyclingraten) mit gesamtgesellschaftlichen Nachhaltigkeitszielen (z.B. THG-Einsparung),
 - » zur Erweiterung der Datengrundlagen für (neue) Recyclingverfahren und Primärrohstoffe,
 - » zur Bilanzierung von Materialeinsparungen und
 - » zur Konzeptentwicklung der Zuordnung von Einsparungen zu Akteuren.
- » Darüber hinaus sind für eine Nachweisführung im Bereich der Circular Economy geeignete Standards nebst Zertifizierungen und Metasystemen mit entsprechenden Schnittstellen (weiter) zu entwickeln, die im Sinne von Monitoring, Reporting und Verifizierung transparent für und durch alle (Markt-)Akteure angewendet werden können.

6. Gesellschaftlicher Rahmen und Rolle der Kommunikation

Auch wenn eine Circular Economy ohne praktikable und wirtschaftliche technische Lösungen nicht umsetzbar ist, müssen neben den technischen Herausforderungen weitere Aspekte berücksichtigt werden. Ohne aktive gesellschaftliche Mitwirkung, die – gerade, wenn es um Produktdesign, Stoffsammlung und -trennung geht – über reine Akzeptanz hinausgehen muss, ist eine Circular Economy nicht denk- und umsetzbar. Geänderte Kostenstrukturen, die sich aus dem Einsatz von Sekundärrohstoffen ergeben, können zu sozialen Verwerfungen führen.

6.1 UMGANG MIT KNAPPEN RESSOURCEN

Für viele der Stoffkreisläufe werden erneuerbare Energie und/oder grüner Wasserstoff in großen Mengen benötigt. Auf absehbare Zeit wird beides nicht in dem Maß zur Verfügung stehen, dass der Bedarf aller Branchen gleichzeitig gedeckt werden kann. Wo die verfügbaren Ressourcen eingesetzt werden, entscheiden nicht Wissenschaft und Technik, sondern Gesellschaft und Politik. Die absehbaren Konflikte können nur in gesellschaftlichen Aushandlungsprozessen gelöst werden, die offen geführt und gut mo-

deriert werden müssen und für die Bewertungsverfahren Hilfestellung zur Entscheidungsunterstützung leisten.

Doch auch auf lange Sicht wird die Circular Economy nicht umsetzbar sein, wenn sich nicht auch Konsum- und Verhaltensmuster ändern. Der Ersatz sämtlicher Fahrzeuge für den Individualverkehr durch gleich große und schwere E-Fahrzeuge mag – ausreichend erneuerbaren Strom vorausgesetzt – den CO₂-Ausstoß beim Fahren reduzieren. Der Bedarf an anderen Rohstoffen, etwa für die Batterien, bliebe aber immens und auch andere Probleme wie der Platzbedarf oder die Überlastung von Verkehrswegen blieben ungelöst. Angesichts der Weichenstellungen, die notwendig sind, um Infrastrukturen an neue Verkehrskonzepte anzupassen – von der Ladesäule bis zur Gestaltung des ÖPNV – müssen diese Diskurse jetzt geführt werden.

6.2 VERLÄSSLICHE RAHMENBEDINGUNGEN

Genau wie unser derzeitiges Wirtschaftssystem ist auch die Circular Economy nichts, was von selbst entsteht. Sie wird durch den regulatorischen Rahmen gestaltet, der auf Basis gesellschaftlicher Entscheidungen angepasst oder



Abbildung 21: Ein 100%iger Ersatz von Verbrennern durch E-Fahrzeuge würde nicht alle heutigen Probleme lösen (Quelle: Adobe Stock)

neu geschaffen werden muss. Dabei geht es nicht nur um die Lenkung von Ressourcen oder gesetzliche Vorgaben z.B. zur Materialauswahl, sondern auch um die Schaffung verlässlicher Rahmenbedingungen für Investitionen. Der Finanzbedarf für den Aufbau von Anlagen für Stofftrennung und -aufbereitung und der Um- oder Neubau von Produktionsanlagen ist immens und die Zeithorizonte lang. Gleiches gilt für den Anlagenbetrieb. Umso wichtiger sind stabile Leitplanken, die die Business Cases absichern und Investoren ermutigen, sich in diesem Bereich zu engagieren. Angesichts des hohen Investitionsbedarfs bereits in der Entwicklungsphase bei gleichzeitig hohem Risiko („heavy asset investments“) müssen Modelle entwickelt werden, die das Risiko auf möglichst viele Schultern verteilen, etwa durch genossenschaftliche Modelle, öffentliche Anschubfinanzierung o.ä..

Dafür wird ein Mix aus Verboten und Anreizen notwendig sein, der angesichts der vielen Wechselwirkungen im System der Circular Economy eher auf umfassende Ansätze setzen sollte als auf die Regulierung einzelner Stoff- oder Abfallgruppen. Deshalb sind sowohl systemare Bewertungsmethoden als auch die Vernetzung und Einbindung vieler Stakeholder unerlässlich.

6.3. SCHAFFUNG VON ENTSCHEIDUNGSGRUNDLAGEN

Informierte Entscheidungen sowohl für Investoren als auch für Verbraucher sind nur möglich, wenn die notwendigen Informationen auch vorliegen. Das gilt für die Kenntnis der technischen Optionen und ihrer Vor- und Nachteile,

aber auch für Informationen zu Rohstoff- und Abfallströmen. Wichtige Werkzeuge für die Schaffung von Entscheidungsgrundlagen sind Bewertungsmethoden (s. Kapitel 5). Wichtig ist hier die transparente und nachvollziehbare Dokumentation des methodischen Vorgehens und der Randbedingungen und Einordnung der Ergebnisse einer Bewertung.

Die Bereitstellung aktueller und validierter Datengrundlagen zu Rohstoff- und Produktströmen und ihre Einordnung sowohl hinsichtlich der nachhaltigen Produktion als auch der (Wieder)Verwertbarkeit ist eine große Herausforderung, gleichzeitig aber für die Umsetzung der Circular Economy unabdingbar. Dafür müssen entsprechende Systeme der Datenerfassung und -Dokumentation geschaffen und gepflegt werden. Ein wichtiger Beitrag kann hier vom geplanten digitalen Produktpass erwartet werden, um Produktdaten wie Material, Eigenschaften, Reparatur- und Entsorgungsoptionen für alle Akteure transparent zur Verfügung zu stellen.⁹⁴

6.4 INDUSTRIEPOLITIK UND INTERNATIONALE VERNETZUNG

Was innerhalb Deutschlands und Europas bereits herausfordernd ist, darf dennoch nicht an Landesgrenzen enden. Auch in der Circular Economy wird es globale Handelsketten und Rohstoffströme geben; Wasserstoff lässt sich z.B. in anderen Regionen wettbewerbsfähiger produzieren als in Mitteleuropa. Regularien wie die Anwendung von Nachhaltigkeitskriterien oder CO₂-Bepreisung greifen nur, wenn

sie möglichst international wirksam werden. Die Circular Economy hat das Potenzial, globale Wertschöpfungsketten disruptiv zu verändern. Deshalb sind die politische Begleitung und internationale Gestaltung unerlässlich, um handelspolitische Verwerfungen und internationale Konflikte zu vermeiden.

Für den Standort Deutschland und Europa ist die Umsetzung der Circular Economy Chance und Risiko. Chancen liegen in der ausgeprägten und erfolgreichen Forschungs- und Entwicklungslandschaft, der engen Zusammenarbeit vieler Akteure und der vorhandenen industriellen Basis, die in weiten Teilen bereits mit der Transformation begonnen hat. Andererseits machen sich auch viele andere Weltregionen auf den Weg. Damit die entwickelten Lösungen weltweit vermarktet werden können, müssen sie schnell in die Umsetzung kommen und wettbewerbsfähig sein; dem steht gelegentlich der Hang zum „over-engineering“ im Weg. Die Entwicklung der Photovoltaik-Industrie der letzten Jahrzehnte liefert einige Erkenntnisse, die berücksichtigt werden sollten, um gewonnene Schlüsselpositionen nicht leichtfertig aufzugeben.

6.5. KOMMUNIKATION

Grundlage für den gesellschaftlichen Dialog ist eine gute Kommunikation. Für die Circular Economy verläuft sie auf mehreren Ebenen:

» Wissenschaftskommunikation: Sie muss informieren und aufklären, welche technischen Lösungen zur Verfügung stehen, welche Randbedingungen sie erfordern,

wo Chancen und Risiken liegen und welche Herausforderungen noch zu bewältigen sind. Gute Wissenschaftskommunikation lädt zu Dialog und Partizipation ein und kann die Grundlagen dafür legen, wissenschaftliche Denkmuster bekannt zu machen und im besten Fall Interesse an Wissenschaft zu wecken. Studien belegen allerdings, dass mehr Information nicht automatisch zu mehr Akzeptanz führt, sondern sogar das Gegenteil bewirken kann.⁹⁵ Die Wissenschaftskommunikation stößt da an ihre Grenzen, wo andere Aspekte wie das persönliche Wertegerüst zum Tragen kommen.

» Gesellschaftliche und politische Kommunikation: Aushandlungsprozesse über Wertesysteme liegen außerhalb der Grenzen von Wissenschaft und Technik. Die Entscheidung, wie immaterielle Güter zu bewerten sind oder was als „gerecht“ verstanden wird, basieren auf persönlichen Einstellungen und Wertmustern. In einer demokratischen und partizipativen Gesellschaft wird die große Bandbreite persönlicher Präferenzen immer dazu führen, dass der Konsens auf Kompromissen basiert. Wissenschaft und Technik können Informationen beisteuern (z.B. „wie hoch ist ein Risiko“), Entscheidungen werden jedoch auch anhand außerwissenschaftlicher Parameter fallen (z.B. „welches Risiko sind wir bereit, zu akzeptieren“).

Damit die Wissenschafts- und Technikkommunikation die notwendigen Informationen vermitteln und eine möglichst gute Basis für die gesellschaftliche Diskussion schaffen kann, sollten die Informationen zielgruppenorientiert aufbereitet werden. Dabei sollten möglichst viele Aspekte (z.B.



Abbildung 22: Kommunikation als Grundlage für den gesellschaftlichen Dialog (Quelle: Matej Kastelic – fotolia)

⁹⁵ (acatech, 2012)



Auswirkungen auf Umwelt, auf Arbeitsplätze, auf Sicherheitsempfinden etc.) berücksichtigt und nach Relevanz für die Zielgruppen eingesetzt werden. Niedrigschwellige Formate wie (Bewegt-)Bild können genutzt werden, um ein Thema zu platzieren und Interesse zu wecken. Gleichzeitig

darf die Kommunikation nicht zu sehr vereinfachen. Die Zusammenhänge sind komplex und die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Entscheidungspfaden eng; das muss in der Kommunikation vermittelt werden.

7. Handlungsempfehlungen und Ausblick

Die Transformation des derzeitigen Wirtschaftssystems zu einer Circular Economy ist anspruchsvoll und komplex. Schon die Schließung eines einzelnen Stoffkreislaufs erfordert die Berücksichtigung zahlreicher Parameter und Rahmenbedingungen: In was für einem Produkt und in welcher Form war der Stoff eingesetzt? Soll er zukünftig in einem gleichartigen Produkt eingesetzt werden oder in einem ganz anderen? Welche Stoffqualität ist dafür notwendig – welche Stoffqualität muss im Recyclingvorgang erzielt werden, kann vielleicht ein funktionales Stoffgemisch eingesetzt werden, oder muss tatsächlich die Trennung bis auf die molekulare oder atomare Eben erfolgen?

Noch herausfordernder wird es, wenn verschiedene Stoffströme und ihre Wechselwirkungen zu berücksichtigen sind: Liefert ein Produkt am Ende seiner Nutzung verschiedene Stoffströme, die für das Recycling getrennt werden müssen? Lässt sich die Aufbereitung miteinander vereinbaren, oder muss zugunsten eines werthaltigeren Stroms darauf verzichtet werden, alle Komponenten aufzubereiten (z.B. wenn seltene Erden pyrolytisch aus einer Kohlenstoffhaltigen Matrix zurückgewonnen werden sollen)? Und auf Gesamtsystemebene: Wie wird mit begrenzten Ressourcen – z.B. erneuerbarer Energie, grünem Wasserstoff oder Wasser – eine maximale Effizienz und Wertschöpfung bei der Schließung von Stoffkreisläufen erreicht?

Die Darstellung aller dieser Fragestellungen, Wechselwirkungen und Abhängigkeiten ist eine große Herausforderung und bleibt notwendigerweise dort unvollständig, wo Wissenslücken bestehen oder der Detaillierungsgrad für eine umfassende Darstellung zu hoch wird. Mit dem vorliegenden Papier wurde dennoch der Versuch unternommen, ein möglichst zusammenhängendes Bild der Circular Economy zu zeichnen.

Die Perspektive der Taxonomie zeigt dabei, welche grundsätzlichen Herausforderungen in den vier sogenannten

“high-level categories of substantial contributions to Circular Economy (along the circular economy loop)” jenseits individueller Stoffkreisläufe anzugehen sind. Wie wichtig Verfahrenstechnik, chemische Technik und Biotechnologie bei der Transformation sind, spiegelt sich darin wider, dass sie bis auf wenige Ausnahmen in allen Punkten der EU-Taxonomie für die Circular Economy eine Rolle spielen. Eine besondere Bedeutung haben sie jedoch naturgemäß in den Feldern des Circular design & production sowie des Circular value recovery, die deshalb im Fokus der vorangehenden Kapitel standen. Dazu lassen sich die wesentlichen Erkenntnisse wie folgt zusammenfassen:

- » Viele für das Recycling notwendige Schritte – z.B. Schmelzen, Lösung/Fällung und andere – sind verfahrenstechnisch seit langem etablierte Grundoperationen. Dennoch besteht auch hier Forschungsbedarf und das Potenzial für Effizienzsteigerungen, z.B. hinsichtlich Energiezufuhr und -bedarf, der Aufbereitung und Kreislaufführung von Lösungsmitteln oder Trennverfahren für Spurenstoffe.
- » Auf welcher Ebene – Komponente, Werkstoff, großes oder kleines Molekül – ein Kreislauf geschlossen wird, hat erhebliche Auswirkungen auf den Energie- und Ressourcenbedarf. Deshalb sind Modelle für die Bewertung verschiedener Kreislaufoptionen einschließlich des Energie-, Wasser- und Hilfsstoffbedarfs sowie der Emissionen notwendig.
- » Gleich ob auf Verfahrens-, Anlagen- oder Systemebene: Die Optimierung der Kreislaufschließungen erfordert in erheblichem Umfang Daten und Simulations- und Modellierungstools, die eine Bewertung und Optimierung überhaupt erst möglich machen.
- » Für Stoffgemische wird eine schnelle und zuverlässige Analytik gebraucht, die Informationen über die Zusammensetzung als Ausgangspunkt für derartige Modelle liefert.
- » Stoffströme im Recycling fallen häufig dezentral und in

wechselnder Zusammensetzung an. Die Logistik und die Anlagen für das Recycling müssen dem Rechnung tragen; modulare und dezentrale Anlagen, die möglichst flexibel kombinierbar sind, können dafür geeignete Lösungen bieten.

- » Neben den unterschiedlichen Ansätzen, mit denen die Nutzungsdauer eines Produktes verlängert werden kann, muss auch das Recycling bereits beim Produktdesign mitgedacht werden. Das bedeutet aber auch, dass Informationen über eine absehbar verfügbare Recycling-Infrastruktur verfügbar sein müssen. Entsprechende Strategien und Roadmaps können Orientierungshilfe sowohl für den Aufbau dieser Infrastruktur als auch für die Gestaltung innovativer Produkte geben. Dies gilt nicht nur für komplexe Produkte, sondern auch für die Fügetechnik und für die eingesetzten Werkstoffe. Gleich ob Polymer oder Metall, möglichst sortenreine Werkstoffe und eine eindeutige Kennzeichnung erleichtern die spätere Trennung und Wiederverwertung.

Branchenübergreifende Prozesse der Wertstoffrückgewinnung (z.B. die Trennung von Kunststoffen, Keramiken und Metallen aus Werkstoffverbänden) stehen erst am Anfang. In Zukunft müssen die Stoffflüsse viel mehr auch zwischen den Branchen vernetzt werden. Ähnlich und ausgehend von der branchenbezogenen Recyclingwirtschaft einer Stoffsorte gelangt man zur Verbund-Recyclingwirtschaft, welche mit der Sektorenkopplung in der Energiewirtschaft vergleichbar ist. Die Sektorenkopplung von Energie- und Stoffflüssen bedeutet hierbei eine neue Dimension, welche nicht nur Synergieeffekte erzielen, sondern zur Effizienzsteigerung bei gleichzeitiger Ressourcenschonung beitragen soll.

Die Anforderungen an Nachhaltigkeit bringen für den Auf-/Ausbau der Circular Economy Herausforderungen mit sich: Die Innovation in der Produktentwicklung – ob bei Batterien, Elektrolyseuren oder biobasierten Kunststoffen – verläuft in Teilen so schnell, dass der Aufbau einer Recyclingindustrie damit nicht Schritt halten kann. Das führt zu Lock-In-Effekten bzw. dazu, dass heute eingesetzte Rohstoffe für die nächste Produktgeneration möglicherweise gar nicht mehr gebraucht werden. Zu wünschen wäre, dass alle Produktinnovationen zumindest die wesentlichen Grundprinzipien – möglichst Monomaterialien, Trennbarkeit von Komponenten, klare Kennzeichnung – der Circular Economy beherzigen, so dass die Rohstoffe, wenn nicht für das gleiche Produkt, so doch zumindest als Grundstoffe wiedergewonnen werden können.

Auch bei einer erfolgreichen Implementierung einer Circular Economy bleiben aber zahlreiche Herausforderungen bestehen, die außerhalb der technischen Sphäre liegen. Eine 1:1-Abbildung heutiger Konsum- und Lebensgewohnheiten wird weiterhin nur mit erheblichem Einsatz von Energie und Materialien möglich sein: Ein Individualverkehr heutigen Zuschnitts mit E-Fahrzeugen statt Verbrennern könnte (theoretisch) schadstoff- und ressourcenarm in der Nutzenphase funktionieren, jedoch muss die erneuerbare Energie durch Technologien mit erheblichem Rohstoffbedarf erzeugt werden, der selbst bei Sekundärrohstoffen Energie und ein Mindestmaß an Primärrohstoffen zum Ersatz dissipativer Verluste erfordert. Darüber hinaus bleibt bei Individualverkehr das Problem der Bereitstellung der nötigen Infrastruktur in steigendem Umfang bestehen, verbunden mit den entsprechenden Umweltwirkungen und Bedarf an Rohstoffen und Energie. Dieses Beispiel zeigt, dass Fragen des sinnvollen Einsatzes von Rohstoffen, Energie und Wasser sowie der Priorisierung von Gütern nicht allein von Naturwissenschaft und Technik beantwortet werden können; sie müssen Gegenstand gesellschaftlicher Aushandlungsprozesse sein.

Für ein rohstoffarmes Industrieland wie Deutschland mit einem immer noch einzigartigen Ökosystem an Akteuren aus Forschung und Lehre und forschenden Unternehmen, von KMUs bis Großkonzernen, bietet die Circular Economy die Chance, den Strukturwandel von stoffumwandelnden Industrien zu gestalten. Dafür ist aber ein koordiniertes Handeln aller relevanten Akteure notwendig. Auf Bundesebene haben sich in den letzten Jahren geeignete Formate der Zusammenarbeit zwischen öffentlicher Hand und Wirtschaft entwickelt, die für die Entwicklung einer Circular Economy als Teil von Wertschöpfungsnetzen insbesondere in Richtung industrieller Umsetzungen und deren wissenschaftlicher Begleitung weiterentwickelt werden könnten.

Das vorliegende Papier beschreibt die notwendigen Forschungs- und Entwicklungsbedarfe für die Implementierung der Circular Economy, aber auch welche Potenziale in der technischen Innovation und Optimierung für die Circular Economy liegen. Es soll damit einen Beitrag für die Umsetzung ebenso wie für die weitere gesellschaftliche Diskussion leisten, indem es die Chancen und die Grenzen aufzeigt, innerhalb derer wir den Lebensstandard zukünftiger Generationen in einer Circular Economy gestalten können.

8. Anhang

8.1. DARSTELLUNG BESTEHENDER INITIATIVEN / PAPIERE ZUM THEMA „CIRCULAR ECONOMY“

Zum Thema „Circular Economy“ existieren auf nationaler und europäischer Ebene unterschiedliche Initiativen und Papiere, die verschiedene Aspekte der Circular Economy aufgreifen und analysieren: Hier sind einige Beispiele:

» VDI White Paper „Circular Economy für Kunststoffe neu denken“ (2022):

Das Papier ist das Ergebnis eines Dialogprozesses von Sachverständigen aus Wirtschaft (alle Teilbereiche des Kunststoffkreislaufs), Wissenschaft, NGOs und Politik. Der Aufbau einer Circular Economy für Kunststoffe kann nur durch gemeinsame Anstrengungen und Kooperationen erreicht werden. Das Papier beschreibt innerhalb von vier Handlungsfeldern die technischen, ökonomischen und ökologischen Chancen und Herausforderungen einer Kreislaufführung von Kunststoffen. Daraus werden Handlungsempfehlungen für Industrie und Politik abgeleitet.

https://www.vdi.de/fileadmin/pages/mein_vdi/redakteure/publikationen/VDI-White-Paper-Circular-Economy-fuer-Kunststoffe-neu-denken.pdf

» „Circular Economy Roadmap für Deutschland“ (2021):

Die Circular Economy Initiative Deutschland als Multi-Stakeholder-Prozess mit mehr als 50 Institutionen aus Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft hat in interdisziplinären und branchenübergreifenden Arbeitsgruppen mit rund 130 Expert:innen erörtert, wie zirkuläre Wirtschaftssysteme ermöglicht und umgesetzt werden können. Dazu untersuchten sie mögliche Anwendungsfelder und diskutieren, welche Rahmenbedingungen zu einer erfolgreichen Umsetzung führen könnten. Die Circular Economy Initiative Deutschland definierte Ziele für diesen Veränderungsprozess und fokussierte folgende Themen: (1) Zirkuläre Geschäftsmodelle und digitale Technologien als Innovationstreiber, (2) Neue Wertschöpfungsnetzwerke für Batterien und Verpackung und (3) Rahmenbedingungen für eine zirkuläre Transformation und Bemessung ökologischer und ökonomischer Circular-Economy-Potenziale

» Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) – Positionspapier „Qualitative Betrachtung des Wertschöpfungsnetzwerks Batterierecycling“ (2020):

Das Positionspapier analysiert den Status quo des Wertschöpfungsnetzwerks zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. Dabei werden ausgewählte „Schritte“ der Wertschöpfung betrachtet, von der Batterierücknahme über die Batteriedemontage bis hin zur Wertstoffrückgewinnung und Wiederverwertung der Wertstoffe und Reststoffe und basierend auf der Analyse Handlungsempfehlungen ausgesprochen.

<https://www.circular-economy-initiative.de/circular-economy-roadmap-fr-deutschland>

» DIN, DKE und VDI „Normungsroadmap Circular Economy“ (2021):

Die Normungsroadmap wurde mit über 500 Fachpersonen aus Wirtschaft, Wissenschaft, öffentlicher Hand und Zivilgesellschaft erarbeitet. Ziel der Roadmap ist es, einen Handlungsrahmen für die Normung und Standardisierung zu schaffen, der die Transformation hin zu einer Circular Economy fördert und internationale Rahmenbedingungen definiert. Sie liefert einen umfassenden Überblick über den Status quo sowie die An- und Herausforderungen zu den folgenden sieben Schwerpunktthemen, die sich am Circular Economy Action Plan der Kommission orientieren: (1) Digitalisierung/ Geschäftsmodelle/Management, (2) Elektrotechnik & IKT, (3) Batterien, (4) Verpackungen, (5) Kunststoffe, (6) Textilien und (7) Bauwerke & Kommunen

<https://www.din.de/de/forschung-und-innovation/themen/circular-economy/normungsroadmap-circular-economy>

» GERRI (German Resource Research Institute) Positionspapier „Verantwortungsvolle Rohstoffversorgung - Innovationshebel für eine ressourceneffiziente, klimaneutrale und kreislauforientierte Rohstoffwirtschaft“ (2021):

In diesem Positionspapier wird der Forschungs- und Innovationsbedarf für eine ressourceneffiziente, klimaneutrale und kreislauforientierte Rohstoffwirtschaft aufgezeigt. Das Papier fokussiert ausschließlich auf die mineralischen und metallhaltigen Rohstoffe (Kunststoffe oder nachwachsende Rohstoffe werden nicht betrachtet) sowie auf den Rohstoffkreislauf und nicht den ebenso wichtigen Produktkreislauf.

https://www.ifad.tu-clausthal.de/fileadmin/IFAD/documents/PDFs/GERRI_Positionspapier_2021_-_Verantwortungsvolle_Rohstoffversorgung.pdf

» VCI, VDI: Abschlussbericht „Chemistry4Climate - Wie die Transformation der Chemie gelingen kann“ (2023):

Welche Bedingungen notwendig sind, damit die chemisch-pharmazeutische Industrie in Deutschland bis 2045 klimaneutral wird, wurde zwischen 2021 und 2023 auf der Klimaschutzplattform „Chemistry4Climate“ mit der Industrie, Nicht-Regierungsorganisationen und der Politik erarbeitet.

<https://www.vci.de/services/publikationen/chemistry4climate-abschlussbericht-2023.jsp>

» UBA Ressourcenkommission: Kommissions-Papier „Chancen und Grenzen des Recyclings im Kontext der Circular Economy: Rahmenbedingungen, Anforderungen und Handlungsempfehlungen“ (2023)

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/chancen-grenzen-des-recyclings-im-kontext-der>

» UBA Ressourcenkommission: Kommissions-Papier „Indikatoren im Themenfeld Ressourcenschonung und Circular Economy: Grundlagen und Anforderungen für die Entwicklung konsistenter Indikatorensysteme“ in Bearbeitung, Veröffentlichung voraussichtlich Mai 2024

» DERA Deutsche Rohstoffagentur/acatech: „Abschlussbericht Dialogplattform Recyclingrohstoffe“ (2023):

Handlungsoptionen zur Stärkung des Beitrags von Recyclingrohstoffen für die Versorgungssicherheit mit Metallen und Industriemineralen

https://www.recyclingrohstoffe-dialog.de/Recyclingrohstoffe/DE/Downloads/58_DERA_Dialogplattform_Recyclingrohstoffe_Langversion.pdf

» DGAW Akademie der Kreislaufwirtschaft: Positionspapier „Festlegung von Quoten in der Kreislaufwirtschaft - Empfehlungen und Hintergrund“ (2024)

<https://www.dgaw.de/de/akademie-der-kreislaufwirtschaft/empfehlungen-der-akademie>

8.2. PAPIERE UND PUBLIKATIONEN ZUR BIOÖKONOMIE

Bundesregierung, Roadmap Bioraffinerien, 2012, verfügbar unter

<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/roadmap-bioraffinerien.html>

Bundesregierung, Nationale Bioökonomiestrategie, 2020, verfügbar unter

<https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/nationale-biooekonomiestrategie-langfassung.pdf>

Europäische Kommission, A sustainable bioeconomy for Europe, 2013, verfügbar unter

<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/edace3e3-e189-11e8-b690-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-149755478>

Global Bioeconomy Summit, Global Bioeconomy Policy Report, 2020, verfügbar unter

https://gbs2020.net/wp-content/uploads/2021/04/GBS-2020_Global-Bioeconomy-Policy-Report_IV_web-2.pdf

Übersichten zu weiteren Publikationen sind u.a. zu finden unter

https://biooekonomie.de/service/mediathek?f%5Bo%5D=node_type%3Apublication

https://knowledge4policy.ec.europa.eu/bioeconomy/bioeconomy-strategy_en



8.3. FORSCHUNGSINITIATIVEN UND ANSÄTZE ZUR VERNETZUNG VON AKTIVITÄTEN IM BEREICH KOHLENSTOFFKREISLÄUFE

In verschiedenen Bundesländern wurde damit begonnen, ganzheitliche Strategien zur Schließung von Stoffkreisläufen für kohlenstoffhaltige Komponenten zu entwickeln. Das Land Nordrhein-Westfalen war hier Vorreiter und hat als erste Gebietskörperschaft in Deutschland inzwischen eine „Carbon-Management-Strategie“ vorgelegt. Auch die Bundesregierung verhandelt über die Entwicklung einer übergreifenden Carbon Management Strategie.

In Forschungseinrichtungen wurden eine Reihe von Netzwerken und Infrastrukturen geschaffen, um Forschung zur Schließung des anthropogenen Kohlenstoffkreislaufs zu betreiben. Als Beispiele sind zu nennen:

- » KIT: Die Forschungsinfrastruktur Energy Lab vernetzt mit den Elementen „Carbon Cycle Lab“ und „Power to X-Lab“ die Systemforschung und Forschung- und Entwicklung zu technischen Lösungen für die Nutzung von Biomasse-Reststoffen, Kunststoffabfallfraktionen und zur CO₂-Gewinnung aus verschiedenen Quellen mit der CO₂-Verwertung
- » Die TU Bergakademie Freiberg und Fraunhofer IKTS betreiben gemeinsam Plattformen zur Pyrolyse und Vergasung von Kohlenstoff-Trägern

8.4. PAPIERE DER DECHEMA UND DECHEMA/VDI-GREMIEN (SEIT 2015)

- » Diskussionspapier „Elektrifizierung chemischer Prozesse“, 2015,
https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Dechema_DiskPap_Elektrifizierung_2015.pdf
- » Positionspapier „Anorganische Rohstoffe - Sicherung der Rohstoffbasis von morgen“, 2015,
https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/PP_Anorg_Rohstoffe_2015_11_FINAL_ezlp-20001405.pdf
- » Statuspapier „Phosphatrückgewinnung“, 2017,
https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Statuspap_Phosphat_2017_FINAL_NOV-p-20003290.pdf
- » Diskussionspapier „Forschungspolitische Empfehlungen zum chemischen Kunststoffrecycling“, 2021,
<https://dechema.de/kunststoffrecycling-path-123211,124930.html>
- » Diskussionspapier „Auswirkungen der Circular Economy in der Prozessindustrie auf das industrielle Wassermanagement“, 2022,
https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/2022_Diskussionspapier_CE_und_Wasser.pdf
- » Diskussionspapier „Beitrag der Hochtemperaturtechnik zu der Umsetzung der Ziele des European Green Deal“, 2022,
<https://dechema.de/Forschung/Studien+und+Positionspapiere/2022+02+Green+Deal.html>
- » Positionspapier "Abfallverbrennung in der Zukunft", 2022,
https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/2022+03_Positionspapier_Abfallverbrennung+2022-p-20008505.pdf
- » Roadmap „Katalyse - Eine interdisziplinäre Schlüsseltechnologie zur nachhaltigen Wirtschaftsentwicklung“, 2023,
<https://dechema.de/katalyseroadmap-path-123211,124930.html>
- » Roadmap "Chemical Reaction Engineering", 2023,
https://dechema.de/Roadmap_Reaction_Engineering-path-123211,124930.html

Weitere Publikationen, auch aus Projekten bzw. im Rahmen von Aufträgen, sind zu finden unter <https://dechema.de/studien-path-123211.html>

9. Literatur

- Andes, Lisa; Lützkendorf, Thomas; Ströbele, Benjamin; Kopfmüller, Jürgen; Rösch, Christine: Methodensammlung zur Nachhaltigkeitsbewertung Grundlagen, Indikatoren, Hilfsmittel; Karlsruher Institut für Technologie KIT; 2019, <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000128806>
- acatech, 2012. Perspektiven der Biotechnologie-Kommunikation.
- Andes, L., Lützkendorf, T., Ströbele, B., Kopfmüller, J., Rösch, C., 2019. Methodensammlung zur Nachhaltigkeitsbewertung Grundlagen, Indikatoren, Hilfsmittel. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000128806>
- Ausfelder, F., Blaumeiser, D., Boumrifak, C., Frank, D., Kotzur, M., Lucht Uribe, A., Track, T., 2024. Water for X - Roadmap for sustainable hydrogen production and follow-up PtX processes.
- Auswirkungen der Circular Economy in der Prozessindustrie auf das industrielle Wassermanagement - Diskussionspapier, 2022.
- B. Müller, D., 2006. Stock dynamics for forecasting material flows—Case study for housing in The Netherlands. *Ecol. Econ.* 59, 142–156. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.09.025>
- Bakker, C., Wang, F., Huisman, J., Den Hollander, M., 2014. Products that go round: exploring product life extension through design. *J. Clean. Prod.* 69, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.028>
- BASF, 2024. BASF und Inditex erzielen Durchbruch im Textil-zu-Textil-Recycling mit loopamid, dem ersten zirkulären Nylon 6, das vollständig auf Textilabfällen basiert. URL <https://www.basf.com/global/de/media/news-releases/2024/01/p-24-109.html>
- Bazzanella, A., Förster, A., Mathes, B., Rübberdt, K., Track, T., Wage-mann, K., Westhaus, U., 2016. Digitalisierung in der Chemieindustrie.
- Beckmann, M., Hoenig, V., Kellenbenz, J., Kolb, T., Lampe, K., Malek, C., Pfeifer, H., Rumpel, S., Schlichting, H., Schulenburg, F., Stapf, D., Stranzinger, B., Tretau, A., 2022. Beitrag der Hochtemperaturtechnik zu den Zielen des European Green Deal - Diskussionspapier der ProcessNet-Fachgruppe Hochtemperaturtechnik in der ProcessNet-Fachgemeinschaft SuPER.
- Berger, M., 2024. Dissipation-based life cycle impact assessment of mineral resource use—a review, case study, and implications for the product environmental footprint. *Int. J. Life Cycle Assess.* <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02318-6>
- Biermann, L., Brepohl, E., Eichert, C., Paschetag, M., Watts, M., Scholl, S. (2021): Development of a continuous PET depolymerization process as a basis for a backto-monomer recycling method. *Green Processing and Synthesis* 2021 (10), 361–373, DeGruyter
- Brosowski, A., Müller-Langer, F., Lenz, V., Horst, J., Dittmeyer, R., Uzor, L., Borchers, M., Thrän, D., Viebahn, P., Zuberbühler, U., 2021. Woher kommt der Kohlenstoff Für synthetische Wasserstofffolgeprodukte? FVEE.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 2023. Die Nationale Kreislaufwirtschafts-Strategie.
- Bundesregierung, 2024a. Ein Plan fürs Klima.
- Bundesregierung, 2024b. Eckpunkte der Bundesregierung für eine Carbon-Management-Strategie.
- Bundesregierung, n.d. Zweites Gesetz zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes.
- Chen, W.-S., Chen, Y.-C., Lee, C.-H., 2022. Hydrometallurgical Recovery of Iron, Nickel, and Chromium from Stainless Steel Sludge with Emphasis on Solvent Extraction and Chemical Precipitation. *Processes* 10, 748. <https://doi.org/10.3390/pr10040748>
- Cieno, F., Crîstiu, D., d'Amore, F., Bezzo, F., 2023. Economic optimization of the Northern Italian supply chain for residual plastic packaging waste treatment, in: *Computer Aided Chemical Engineering*. Elsevier, pp. 2125–2130. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15274-0.50338-3>
- Dahmus, J.B., Gutowski, T.G., 2007. What Gets Recycled: An Information Theory Based Model for Product Recycling. *Environ. Sci. Technol.* 41, 7543–7550. <https://doi.org/10.1021/es062254b>
- DECHEMA, 2013. Geobiotechnologie - Stand und Perspektiven.
- Delhomme, C., Schödel, N., Tota, A., Schmidt, G., 2024. Plastic pyrolysis oils as feedstock for steam crackers: Opportunities and challenges—Part 2. *Hydrocarb. Process.*
- Delhomme-Neudecker, C., Schödel, N., Tóta, Á., Schmidt, G., 2024. Plastic pyrolysis oils as feedstock for steam crackers: Opportunities and challenges—Part 1. *Hydrocarb. Process.*
- DERA Deutsche Rohstoffagentur, 2023. Abschlussbericht Dialogplattform Recyclingrohstoffe.
- Diekmann, J., Sander, S., Sellin, G., Petermann, M., Kwade, A., 2018. Crushing of Battery Modules and Cells, in: *Recycling of Lithium-Ion Batteries: The LithoRec Way*. Springer.
- DIN e.V., 2022. DIN EN ISO 14040:2021-02: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen.
- DIN e.V., DKI, VDE, 2023. Standardization Roadmap Circular Economy.
- Draese, N., 2023. Automatisierung in der Industrie: Welche Vor- und Nachteile – welche Potenziale? *ingenieur.de*.
- Eiden, S., Bellinghausen, R., Larcher, C., Stevelink, R., Ciolca, D., Schenk, N., Heeres, E., Deuss, P., Engels, T., 2023. Development of selective pyrolysis of polyurethane rigid foam to amines. Presented at the BoA 11th International Freiberg Conference on Circular Carbon Technologies, Rotterdam.
- Energie- und Umwelttechnik, 2016. VDI-Richtlinie 3925: Methoden zur Bewertung von Abfallbehandlungsverfahren.



- Europäisches Parlament, 2023. Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile [WWW Document]. Themen Eur. Parlam. URL <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile> (accessed 4.5.24).
- European Commission. Directorate General for Research and Innovation., 2020. Categorisation system for the circular economy: a sector agnostic categorisation system for activities substantially contributing to the circular economy. Publications Office, LU.
- Fraunhofer, n.d. Seltene Erden. URL <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/bausteine-fuer-die-zukunft/seltene-erden.html>
- Fraunhofer IKTS, n.d. Recycling von seltenen Metallen mit keramischen Membranen. URL https://www.ikts.fraunhofer.de/de/abteilungen/umwelttechnik_verfahrenstechnik/biomassetechnologien_membranverfahrenstechnik/biomassekonversion_naehrstoffrecycling/recycling_von_seltenen_metallen_mit_keramischen_membranen.html
- Friege, H., Kümmerer, K., 2022. Practising circular economy, in: The Impossibilities of the Circular Economy. Routledge, London, p. 332.
- Gaun, A., Elwert, T., 2017. Abtrennung von feinen NE-Partikeln aus Sekundärrohstoffen mit Hilfe eines Barriere-Wirbelstromscheiders. Recycling und Rohstoffe. TK-Verlag Karl Thomé - Kozmiensky, Neuruppin.
- Gemeinschaftsausschuss Klebtechnik, 2024. Roadmap Klebtechnik.
- Gerlitz, E., Botzem, D., Weinmann, H., Ruhland, J., Fleischer, J., 2021. Cell-to-Pack-Technologie für Li-Ionen-Batterien: Aktueller Entwicklungsstand, Marktakteure in der Automobilindustrie und Auswirkungen auf eine nachhaltige Produktionstechnik unter dem Aspekt der Kreislaufwirtschaft. Z. Für Wirtsch. Fabr. 116, 689–694. <https://doi.org/10.1515/zwf-2021-0146>
- GERRI, 2021. Verantwortungsvolle Rohstoffversorgung.
- Geyer, Björn & Lorenz, Guenter & Kandelbauer, Andreas. (2016). Recycling of poly (ethylene terephthalate)-A review focusing on chemical methods. eXPRESS Polymer Letters. 10. 559-586.
- Gonçalves, A., Henriques, E., Ribeiro, I., 2024. Towards plastics circular economy: sustainability assessment of mono-material design for recycling. Procedia CIRP 122, 401–406. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.01.058>
- Hummen, T., Desing, H., 2021. When to replace products with which (circular) strategy? An optimization approach and lifespan indicator. Resour. Conserv. Recycl. 174, 105704. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105704>
- Jovic, M., Carvalho, P.C., Siqueira e Silva, J., 2022. Monomaterial Packaging.
- Kaas, A., Mütze, T., Peuker, U.A., 2022. Review on Zigzag Air Classifier. Processes 10, 764. <https://doi.org/10.3390/pr10040764>
- Kaas, A., Wilke, C., Vanderbruggen, A., Peuker, U.A., 2023. Influence of different discharge levels on the mechanical recycling efficiency of lithium-ion batteries. Waste Manag. 172, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.08.042>
- Kaltschmitt, M., Schebek, L. (Eds.), 2015. Umweltbewertung für Ingenieure: Methoden und Verfahren. Springer Vieweg, Berlin Heidelberg.
- Khanna, R., Ellamparathy, G., Cayumil, R., Mishra, S.K., Mukherjee, P.S., 2018. Concentration of rare earth elements during high temperature pyrolysis of waste printed circuit boards. Waste Manag. 78, 602–610. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.041>
- Kirchherr, J., Reike, D., Hekkert, M., 2017. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. Resour. Conserv. Recycl. 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Königsreuther, P., 2023. Forscher machen Lithium-Ionen-Batterie quasi „unsterblich“. MaschinenMarkt.
- Kusenberg, M., Eschenbacher, A., Djokic, M.R., Zayoud, A., Ragaert, K., De Meester, S., Van Geem, K.M., 2022. Opportunities and challenges for the application of post-consumer plastic waste pyrolysis oils as steam cracker feedstocks: To decontaminate or not to decontaminate? Waste Manag. 138, 83–115. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.009>
- Lase, I.S., Tonini, D., Caro, D., Albizzati, P.F., Cristóbal, J., Roosen, M., Kusenberg, M., Ragaert, K., Van Geem, K.M., Dewulf, J., De Meester, S., 2023. How much can chemical recycling contribute to plastic waste recycling in Europe? An assessment using material flow analysis modeling. Resour. Conserv. Recycl. 192, 106916. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106916>
- Lövenich, C., n.d. Introduction to CIRCULAR FOAM: chemical recycling technologies and routes for rigid polyurethane (PU) foam. Presented at the BoA 11th International Freiberg Conference on Circular Carbon Technologies, Rotterdam.
- Lyon, T., Mütze, T., Peuker, U.A., 2022. Decoating of Electrode Foils from EOL Lithium-Ion Batteries by Electrohydraulic Fragmentation. Metals 12, 209. <https://doi.org/10.3390/met12020209>
- Mangold, H. and von Vacano, B. (2022), The Frontier of Plastics Recycling: Rethinking Waste as a Resource for High-Value Applications. Macromol. Chem. Phys., 223: 2100488 (CC-BY Creative Commons Lizenz)
- Meys, R., Kätelhön, A., Bachmann, M., Winter, B., Zibunas, C., Suh, S., Bardow, A., 2021. Achieving net-zero greenhouse gas emission plastics by a circular carbon economy. Science 374, 71–76. <https://doi.org/10.1126/science.abg9853>
- Neligan, A., 2023. Wandel durch Innovation: Mit Digitalisierung zur zirkulären Wirtschaft. Zuk. Nachhalt.
- Netsch, N., Vogt, J., Richter, F., Straczewski, G., Mannebach, G., Fraaije, V., Tavakkol, S., Mihan, S., Stapf, D., 2023. Chemical Recycling of Polyolefinic Waste to Light Olefins by Catalytic Pyrolysis. Chem. Ing. Tech. 95, 1305–1313. <https://doi.org/10.1002/cite.202300078>
- NexantECA, 2021. Advances in depolymerization technologies for recycling. <https://www.nexanteca.com/news-and-media/advances-depolymerization-technologies-recycling>
- Nimmegeers, P., Billen, P., 2021. Quantifying the Separation Complexity of Mixed Plastic Waste Streams with Statistical Entropy: A Plastic Packaging Waste Case Study in Belgium. ACS Sustain. Chem. Eng. 9, 9813–9822. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c02404>

- Pacheco-López, A., Prifti, K., Manenti, F., Somoza-Tornos, A., Graells, M., Espuña, A., 2023. Paving the way for the integration of synthesis, assessment, and design tools within an ontological framework, in: *Computer Aided Chemical Engineering*. Elsevier, pp. 2291–2296. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15274-0.50365-6>
- PlasticsEurope e.V., 2022. Handlungsempfehlungen für eine Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie.
- Raabe, D., 2023. The Materials Science behind Sustainable Metals and Alloys. *Chem. Rev.* 123, 2436–2608. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00799>
- Reichstein, J., Müssig, S., Wintzheimer, S., Mandel, K., 2023. Communicating Supraparticles to Enable Perceptual, Information Providing Matter. *Adv. Mater.* 35, 2306728. <https://doi.org/10.1002/adma.202306728>
- Roithner, C., Cencic, O., Rechberger, H., 2022. Product design and recyclability: How statistical entropy can form a bridge between these concepts - A case study of a smartphone. *J. Clean. Prod.* 331, 129971. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129971>
- Sánchez-Bastardo, N., Schlögl, R., Ruland, H., 2021. Methane Pyrolysis for Zero-Emission Hydrogen Production: A Potential Bridge Technology from Fossil Fuels to a Renewable and Sustainable Hydrogen Economy. *Ind. Eng. Chem. Res.* 60, 11855–11881. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c01679>
- Schebek, L., et al., 2024. Indikatoren im Themenfeld Ressourcenschonung und Circular Economy: Grundlagen und Anforderungen für die Entwicklung konsistenter Indikatorensysteme, Ressourcenkommission am Umweltbundesamt.
- Schlotter, U., Ausfelder, F., Wendler, K., Sartorius, I., Reuter, M., Köhne, A., Stapf, D., Eichert, C., Scholl, S., Köpke, D., 2021. Forschungspolitische Empfehlungen zum Chemischen Kunststoffrecycling – Neue Verfahren und Konzepte.
- Schröder, J., Naumann, K., 2022. Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr. <https://doi.org/10.48480/19NZ-0322>
- Sommerville, R., Zhu, P., Rajaeifar, M.A., Heidrich, O., Goodship, V., Kendrick, E., 2021. A qualitative assessment of lithium ion battery recycling processes. *Resour. Conserv. Recycl.* 165, 105219. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105219>
- Steinwinder, T., Gill, E., Gerhardt, M., 2011. Process Design of Wastewater Treatment for the NREL Cellulosic Ethanol Model (No. NREL/SR-5100-51838, 1025060). <https://doi.org/10.2172/1025060>
- Stiehl, C., Hirth, T., 2012. From End of Pipe Environmental Protection to Sustainable Production. *Chem. Ing. Tech.* 84, 963–968. <https://doi.org/10.1002/cite.201200008>
- Stoppel, L., Dietrich, B., Duran, I., Hofberger, C., Krumholz, R., Uhlenbruck, N., Wetzel, T., 2024. Technology Development for the Pyrolysis of Hydrocarbons in Liquid Metal. *Chem. Ing. Tech.* 96, 30–35. <https://doi.org/10.1002/cite.202300107>
- Thiyagarajan, S., Maaskant-Reilink, E., Ewing, T.A., Julsing, M.K., Van Haveren, J., 2022. Back-to-monomer recycling of polycondensation polymers: opportunities for chemicals and enzymes. *RSC Adv.* 12, 947–970. <https://doi.org/10.1039/D1RA08217E>
- Vanderbruggen, A., Hayagan, N., Bachmann, K., Ferreira, A., Werner, D., Horn, D., Peuker, U., Serna-Guerrero, R., Rudolph, M., 2022. Lithium-Ion Battery Recycling Influence of Recycling Processes on Component Liberation and Flotation Separation Efficiency. *ACS EST Eng.* 2, 2130–2141. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.2c00177>
- Velazquez Martinez, O., Santasalo-Aarnio, A., Reuter, M., Serna-Guerrero, R., 2021. Case studies of Statistical Entropy Analysis in Recycling Processes: A tool in Support of a Circular Economy, in: *Proceedings of Entropy 2021: The Scientific Tool of the 21st Century*. Presented at the Entropy 2021: The Scientific Tool of the 21st Century, MDPI, Sciforum.net, p. 9791. <https://doi.org/10.3390/Entropy2021-09791>
- Vertretung in Deutschland, 2023. Nachhaltige Produkte sollen zur neuen Norm in der EU werden.
- von Vacano, B., Mangold, H., Seitz, C., 2021. Kunststoffe im Kreislauf: Die Zeit ist reif. *Chem. Unserer Zeit* 6, 374–386.
- Werner, D. M., Mütze, T. & Peuker, U. A. 2022. Influence of Pretreatment Strategy on the Crushing of Spent Lithium-Ion Batteries. *Metals*, 12, 1839. <https://doi.org/10.3390/batteries9100514>
- Wilke, C., Kaas, A., Peuker, U.A., 2023a. Influence of the Cell Type on the Physical Processes of the Mechanical Recycling of Automotive Lithium-Ion Batteries. *Metals* 13, 1901. <https://doi.org/10.3390/met13111901>
- Wilke, C., Werner, D.M., Kaas, A., Peuker, U.A., 2023b. Influence of the Crusher Settings and a Thermal Pre-Treatment on the Properties of the Fine Fraction (Black Mass) from Mechanical Lithium-Ion Battery Recycling. *Batteries* 9, 514. <https://doi.org/10.3390/batteries9100514>
- Wuschke, L., 2018. Mechanische Aufbereitung von Lithium-Ionen-Batteriezellen, 1. Auflage. ed, Freiburger Forschungshefte A Verfahrenstechnik. Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg.
- Wuschke, L., Jäckel, H.-G., Leißner, T., Peuker, U.A., 2019. Crushing of large Li-ion battery cells. *Waste Manag.* 85, 317–326. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.042>
- Zeller, M., Netsch, N., Richter, F., Leibold, H., Stapf, D., 2021. Chemical Recycling of Mixed Plastic Wastes by Pyrolysis – Pilot Scale Investigations. *Chem. Ing. Tech.* 93, 1763–1770. <https://doi.org/10.1002/cite.202100102>
- Zsifkovits, H., Woschank, M., 2019. Smart Logistics – Technologiekonzepte und Potentiale. *BHM Berg- Hüttenmänn. Monatshefte* 164, 42–45. <https://doi.org/10.1007/s00501-018-0806-9>



10. Autor:innen und Gremien

Michael Beckmann	TU Dresden
Ralf Günter Berger	Leibniz Universität Hannover
Martin Bertau	TU Bergakademie Freiberg
Christoph Blöcher	Covestro Deutschland AG
Markus Busch	TU Darmstadt
Kathrin Castiglione	FAU Erlangen-Nürnberg
Olaf Deutschmann	KIT
Tobias Eifert	Covestro Deutschland AG
Daniel Frank	DEHEMA e.V.
Peter Fröhlich	PARFORCE Engineering & Consulting GmbH
Julian Grimm	Fraunhofer IPA
Thomas Hirth	KIT
Stefan Junne	TU Berlin
Steffen Kiemel	Fraunhofer IPA
Norbert Kockmann	TU Dortmund
Thomas Kolb	KIT
Tobias Kraus	INM – Leibniz-Institut für Neue Materialien / Univ. des Saarlands
Péter Krüger	Covestro Deutschland AG
Dagmar Kunsmann-Keitel	BASF SE
Karl Mandel	Fraunhofer ISC / FAU Erlangen-Nürnberg
Andreas Meiswinkel	Linde GmbH - Linde Engineering
Raoul Meys	Carbon Minds GmbH
Franziska Müller-Langer	DBFZ
Peter Neubauer	TU Berlin
Mandy Paschetag	TU Braunschweig
Urs Peuker	TU Bergakademie Freiberg
Florian Puch	TU Ilmenau
Daniela Riedl	Roche Diagnostics GmbH
Steve Rommel	
Kathrin Rübberdt	DEHEMA e.V.
Vitalij Salikov	RITTEC 8.0 Umwelttechnik GmbH
Jörg Sauer	KIT
Liselotte Schebek	TU Darmstadt
Nicole Schödel	Linde GmbH - Linde Engineering
Rita Schulze	DEHEMA e.V.
Michael Sievers	TU Clausthal/CUTEC
Dieter Stapf	KIT
Jochen Strube	TU Clausthal
Ralf Takors	Universität Stuttgart
Bernhard von Vacano	BASF SE
Katja Wendler	DEHEMA e.V.
Thomas Wetzel	KIT

**Bei der Erstellung des Statuspapiers haben folgende
DECHEMA-Fachsektionen und Gremien mitgewirkt:**

DECHEMA/VDI-Fachsektion Fluidodynamik und Trenntechnik

- » Mechanische Flüssigkeitsabtrennung
- » Phytoextrakte – Produkte und Prozesse

DECHEMA/VDI-Fachsektion Partikeltechnik und Produktdesign

- » Grenzflächenbestimmte Systeme und Prozesse

DECHEMA-Fachsektion Funktionale Materialien

- » Nano- und Mesoskopische Systeme

DECHEMA-Fachsektion Ressourcen und Verfahren zur Stoffumwandlung

- » Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung
- » Hochtemperaturtechnik
- » Rohstoffe

DECHEMA-Fachsektion Biobasierte Wertschöpfungsketten

- » Industrielle Nutzung Nachwachsender Rohstoffe

DECHEMA-Fachsektion Biotechnologische Produktionssysteme

- » Lebensmittelbiotechnologie
- » Biotransformationen
- » Synthetische Biologie

DECHEMA/VDI-Fachsektion Chemische Reaktionstechnik

- » Polymere

DECHEMA-Fachsektion Energie, Chemie und Klima

- » Energieverfahrenstechnik

DECHEMA-Fachsektion Bildung und Innovation

- » Zukunftsforschung und Innovationsmanagement

DECHEMA/VDI-Fachsektion Process Engineering & Materials Technology

DECHEMA-Fachsektion Industrierwasser

DECHEMA-Fachsektion Bioprozesstechnik

DECHEMA-Zukunftsforum Biotechnologie

GeCatS

Arbeitskreis Prozessanalytik der GDCh



Gesellschaft für Chemische
Technik und Biotechnologie e.V.
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main
Tel.: +49 69 7564-0
E-Mail: info@dechema.de