



CIRCULAR ECONOMY IN DER GRUNDSTOFF- INDUSTRIE: POTENZIALE UND NOTWENDIGE RAHMENBEDINGUNGEN FÜR EINE ERFOLG- REICHE TRANSFORMATION

Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy

Dieses Dokument wird inhaltlich von folgenden Unternehmen und Institutionen unterstützt:



IN4climate.NRW – eine Initiative der NRW-Landesregierung

Ministerium für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



IN4climate.NRW lebt von der Diskussion und den verschiedenen Standpunkten der beteiligten Unternehmen und Organisationen. IN4climate.NRW versteht sich nicht als Verband, der die Interessen seiner Mitglieder aktiv in der Politik vertritt. Die Initiative stellt eine Plattform zum Meinungsaustausch und Diskurs dar. In diesem Umfeld entstehen Papiere und Ausarbeitungen, die von einzelnen Mitgliedern erarbeitet, diskutiert und ausformuliert werden. Andere Mitglieder können sich in einem strukturierten Prozess den Ergebnissen oder Diskussionsbeiträgen explizit anschließen und das Dokument mittragen. Alle IN4climate.NRW-Mitglieder, die sich zu einer Unterzeichnung explizit entschlossen haben, werden transparent aufgeführt. Dies erlaubt aber keine Aussage zur Positionierung anderer nicht aufgeführter IN4climate.NRW-Mitglieder. Die Geschäftsstelle von IN4climate.NRW stellt Transparenz und Beteiligungsmöglichkeiten sicher.

AutorInnen: Marina Fecke (Wuppertal Institut), Dr. Sarah Fluchs (IW),
Dr. Iris Rieth (IN4climate.NRW), Dr. Henning Wilts (Wuppertal Institut)
Dr. Lukas John (IN4climate.NRW)

Beiträge von: Nadine Braun (Wuppertal Institut), Bernd Dettmer (RHM), Frank Düssler (Georgs-
marienhütte), Jens Hannes (RWE), Dr. Bernhard Kirchartz (Speira), Dr. Sebastian Palm
(VDZ), Christoph Reißfelder (HeidelbergCement), Lisa Schulz (thyssenkrupp), Prof. Dr.
Ulrich Seifert (Fraunhofer UMSICHT), Dr. Balint Simon (RWTH Aachen), Gerald Stubbe
(BFI), Dr. Wolfgang Volkhausen (thyssenkrupp)

Bibliographische Angaben

Herausgeber: IN4climate.NRW
Veröffentlicht: November 2021
Koordination: Dr. Iris Rieth (IN4climate.NRW), Marina Fecke (Wuppertal Institut), Dr. Lukas John
(IN4climate.NRW)
Kontakt: iris.rieth@energy4climate.nrw

Bitte zitieren als: IN4climate.NRW (Hrsg.) 2021: Circular Economy in der Grundstoffindustrie:
Potenziale und notwendige Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Transformation.
Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy. Gelsenkirchen.

UNSERE KERNBOTSCHAFTEN

- Die **Circular Economy (CE)** ist in den „Sustainable Development Goals“ der Vereinten Nationen (SDGs) fest verankert und kann einen wichtigen Beitrag zum Pariser Klimaabkommen leisten. Sie ermöglicht eine **Kreislaufführung von Rohstoffen** und kann somit auch in erheblichem Maße zur Defossilisierung beitragen.
- Die Circular Economy ist ein **gesamtsystemisches Konzept** und muss sektor- und branchenübergreifend entlang der gesamten Wertschöpfungskette umgesetzt werden.
- Es existieren bereits Strategien für die nachgelagerte Wertschöpfungskette wie „Reuse“, „Remanufacture“ und „Design for Recycling“. Doch einige **grundstoffproduzierende Industrien** haben die Aufgabe, ihre **Rohstoffquellen** umzustellen und den **Materialkreislauf** letztendlich zu schließen. Die Primärrohstoffe können in der Grundstoffindustrie mithilfe von zwei sich ergänzenden Strategien durch Sekundärrohstoffe ersetzt werden:
 - **Recycling** von Pre- und Post-Consumer-Abfällen,
 - branchenübergreifendes stoffliches **Nutzen von Reststoffen und Nebenerzeugnissen** aus der **Grundstoffindustrie**.
- Die **Grundstoffindustrie** steht dabei nicht nur vor der Herausforderung, diese Strategien auf bestehende Prozesse anzuwenden. Vielmehr werden sich die Stoffströme (Input und Output) im Zuge der **industriellen Transformation zur Klimaneutralität** verändern. Hier gilt es schon jetzt, Konzepte zu erarbeiten, um die bestehenden **industriellen Symbiosen** auch mit den neuartigen Stoffströmen zu erhalten und weiter auszubauen.
- Die **Nachfrage nach Grundstoffen steigt** weiterhin an, sodass der Bedarf auch zukünftig nicht vollständig durch Sekundärrohstoffe gedeckt werden kann. Es werden also weiterhin Primärrohstoffe benötigt. Zudem fließen die Grundstoffe vielfach in langlebige Produkte und werden als Produkt, Abfall und Schrott exportiert, sodass sie **dem regionalen Kreislauf entzogen** werden.
- Die Nutzung von Sekundärrohstoffen, als ein Baustein der Circular Economy, kann bei der Herstellung von Grundstoffen zur **Reduktion von CO₂-Emissionen** führen. Sie sollte daher in die **Förderrichtlinien** zur klimaneutralen Umstellung der Industrie aufgenommen werden. Insbesondere die Förderrichtlinie „Dekarbonisierung der Industrie“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) ist dahingehend zu überarbeiten, um entsprechende Projektvorhaben unterstützen zu können. Bund und Länder sollten für den vom **Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)** angekündigten IPCEI „Low Carbon Emissions Industry“ die Circular Economy als Themenfeld verankern und **Haushaltsmittel für die Finanzierung der Projekte bereithalten**.
- Um eine Circular Economy zu etablieren, sind eine entsprechende **Zielsetzung sowie klare Rahmenbedingungen aus der Politik** erforderlich. Im Vergleich zu anderen klimapolitisch wichtigen Zielen – wie der direkten Reduktion der CO₂-Ausstöße in Produktion und Nutzung – gibt es für Circular-Economy-Maßnahmen **keine konkreten Vorgaben und Kennzahlen**, an denen Unternehmen sich orientieren können oder die ihnen als Zielvorgaben auferlegt werden. So ist zur Etablierung einer Circular Economy eine Strukturierung in Politik und Verwaltung erforderlich, die Abfall- und Umweltwirtschaft, Wirtschaftskonzepte und Rohstoffsicherung zu einer **ganzheitlichen Lösung** verbindet.

Zusammenfassung der bestehenden Hemmnisse, Ziele und möglichen Maßnahmen für die Etablierung einer Circular Economy

Hemmnisse

...im Bereich der regulatorischen Rahmenbedingungen

- geringe Fokussierung der Politikansätze auf die CE
- keine Anrechnung in Recyclingquoten
- fehlende adäquate Förderrichtlinie für Technologieentwicklung
- unterschiedliche Normungen
- Standards für Primär- und Sekundärrohstoffe
- geringe Konsistenz regulatorischer Bestimmungen

...im Bereich der Stoffströme und Technologien

- geringe Nachfrage nach Rezyklaten
- geringes Angebot hochwertiger Rezyklate
- veränderte Stoffströme

Ziele

- Wettbewerbsfähigkeit durch regulatorische Rahmenbedingungen steigern
- Innovationen in die Umsetzung bringen
- CE in der Industrie- und Wirtschaftspolitik verankern

Maßnahmen

- Anpassung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes
- Anrechnung des chemischen Recyclings bei Recyclingquoten
- Mindestrezyklatquoten als Treiber der Nachfrage für bestimmte Stoffe
- Standardisierungen
- öffentliche Beschaffung als Treiber der Nachfrage
- Informationsbereitstellung durch Digitalisierung
- Forschungsförderung für technologie- und materialoffene Konzepte
- Anreizsysteme für Sekundärrohstoffe
- konsistenter Policy Mix und Nutzung von Synergieeffekten

INHALT

UNSERE KERNBOTSCHAFTEN	3
1. HINTERGRUND UND EINFÜHRUNG	6
1.1 Motivation	6
1.2 Definition „Circular Economy“ und Fokus des Papieres.....	6
1.3 Aktuelle Situation und kurzer Überblick der Rahmenbedingungen	9
2. STOFFSTRÖME IN NRW	12
2.1 Status Quo	12
2.2 Auswirkungen struktureller Veränderungen durch die Klimapolitik	19
2.3 Potenzial zur weiteren Schließung der Stoffkreisläufe	21
3. NOTWENDIGE RAHMENBEDINGUNGEN ZUR WEITEREN SCHLIEßUNG DER STOFFKREISLÄUFE	26
3.1 Hemmnisse im Status Quo	26
3.2 Maßnahmen für den Industriesektor	28
3.2.1 Wettbewerbsfähigkeit durch regulatorische Rahmenbedingungen steigern	28
3.2.2 Innovationspolitik und Forschung/Innovationen in die Umsetzung bringen.....	31
3.2.3 Circular Economy in der Industrie- und Wirtschaftspolitik verankern.....	32
3.2.4 Notwendigkeit eines „Policy Mixes“ entlang der Wertschöpfungskette	33
LITERATUR	35

1. HINTERGRUND UND EINFÜHRUNG

1.1 Motivation

Die grundstoffproduzierende Industrie in NRW befindet sich auf dem Weg in Richtung Klimaneutralität. Dabei sind die Ziele klar: Das Pariser Klimaschutzabkommen muss eingehalten werden, um die Erderwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen. Die Leitplanken sind durch den **European Green Deal** sowie das **Bundes- und das nordrheinwestfälische Klimaschutzgesetz** gesetzt: Treibhausgasneutralität bis 2045 und eine Verringerung der Treibhausgasemissionen im Vergleich zu 1990 – um 65 Prozent bis 2030 und um 88 Prozent bis 2040 (Landtag NRW 2021). Um diese Ziele zu erreichen, muss die Produktion auf weniger energieintensive Verfahren und auf solche mit weniger prozessbedingten Emissionen umgestellt werden.

Bei der Herstellung einiger Grundstoffe machen Förderung, Aufbereitung und Einsatz von **Primärrohstoffen** einen großen Teil der Emissionen aus. Der alternative Einsatz von **Sekundärrohstoffen** hat das Potenzial, emissionsärmer zu sein. Daher kann das wichtige Ziel der Defossilisierung, das für das Erreichen der Klimaneutralität in der **Grundstoffindustrie** notwendig ist, nur unter Einsatz von Sekundärrohstoffen erfolgen.

Die Circular Economy ist folglich ein wichtiger Baustein zur Treibhausgasminderung. Darüber hinaus ist sie in den **SDGs** der Vereinten Nationen als Strategie zur nachhaltigen Nutzung unserer Ressourcen fest verankert (United Nations 2015). Nicht zuletzt motivieren Ressourcenknappheit und steigende Rohstoffpreise die Unternehmen auch ökonomisch zur Etablierung einer funktionierenden Circular Economy.

Mit Blick auf die **Transformation in Richtung Klimaneutralität** hat sich die Arbeitsgruppe Circular Economy drei Ziele gesetzt: die Erarbeitung der Rolle der grundstoffproduzierenden Industrie für die Circular Economy, das Aufzeigen konkreter Handlungsfelder in der Industrie und die Diskussion notwendiger Rahmenbedingungen.

1.2 Definition „Circular Economy“ und Fokus des Papieres

Die nachhaltige Entwicklung umfasst drei Dimensionen: **Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft**. Die Etablierung einer Circular Economy leistet einen wichtigen Beitrag für alle drei. Denn sie schränkt den Einsatz von **Energie und Ressourcen** auf ein Maß ein, das die natürlichen Reproduktionsraten der Ökosystemkreisläufe in den Wirtschaftskreisläufen respektiert (Korhonen et al. 2018).

Um eine Circular Economy erfolgreich umzusetzen, muss eine wesentliche Bedingung erfüllt sein: Es müssen durch entsprechende Wiederverwertungs- und Recyclingprozesse hochwertige **Rezyklate** hergestellt werden.

Definition Circular Economy (CE)

Im Gegensatz zum Begriff der Kreislaufwirtschaft, der häufig die Abfall- und Recyclingwirtschaft fokussiert, ist das Konzept der CE in der Regel deutlich umfassender: Es schließt die gesamte Wertschöpfungskette beziehungsweise den kompletten Produktlebenszyklus ein. Die Europäische Kommission definiert als Ziel einer CE, „den Wert von Produkten, Materialien und Ressourcen so lange wie möglich zu erhalten, indem sie am Ende ihrer Nutzungsdauer in den Produktkreislauf zurückgeführt werden und gleichzeitig möglichst wenig Abfall erzeugt wird. Je weniger Produkte wir wegwerfen, desto weniger Material muss neu gewonnen werden – mit den entsprechenden Vorteilen für unsere Umwelt. Dieser Prozess setzt ganz am Anfang des Produktlebenszyklus an: Durch eine intelligente Produktgestaltung und ressourcensparende Produktionsverfahren können Ineffizienz bei der Abfallbewirtschaftung vermieden und neue Geschäftsmöglichkeiten geschaffen werden“ (eurostat o. J.). Zusammenfassend reduziert eine CE sowohl den Ressourceneinsatz als auch das Abfallaufkommen. Dieses kann durch die Wiederverwendung und -verwertung, das Recycling von Materialien und Rohstoffen sowie durch ein ressourceneffizientes Produktdesign (Ökodesign) realisiert werden (SCI4climate.NRW 2021a).

In Abgrenzung der Circular Economy zur „klassischen Abfallwirtschaft“ hat das NRW-Wirtschaftsministerium 2016 den Begriff der „Zirkulären Wertschöpfung“ entwickelt, um die industriepolitische und produktorientierte Dimension zu betonen (Scheelhaase und Zinke 2016).

12,2 Prozent

**betrug die Nutzungsrate
wiederverwendbarer Stoffe
im Jahr 2019.**

**Damit lag Deutschland im
europäischen Durchschnitt.**
(eurostat 2021b)

Diese stoßen jedoch auf eine Reihe wirtschaftlicher, technischer, sozialer und ökologischer Herausforderungen (SCI4climate.NRW 2021b): Es muss nicht nur der Ressourcenverbrauch reduziert werden. Vielmehr muss eine längere Nutzungsdauer der Ressourcen fokussiert werden, indem die eingesetzten Rohstoffe und Materialien im Kreislauf gehalten werden. Dieses kann durch mehrere Optionen realisiert werden. Dazu gehören zum einen Reparatur, Aufarbeitung und Wiederaufbereitung. Eine weitere Strategie ist der Austausch von Materialien gegen weniger schädliche und erneuerbare Ressourcen. Eine entsprechende Übersicht über verschiedene Möglichkeiten einer erhöhten Ressourceneffizienz gibt Abbildung 1.

	Weniger verbrauchen	Mehrmalig gebrauchen	Ersetzen
Prozesse	Materialeinsparung & Abfallvermeidung	Reuse & Recycle	Neue/veränderte Werkstoffauswahl
Produktdesign	Langlebigkeit, Reparierbarkeit & Material-/Energieeffizienz	Recyclingfähigkeit & Aufrüstbarkeit	Problemstoffarmut & alternative Rohstoffe (nachwachsend/recycelt)

Abbildung 1: Erhöhung der Ressourceneffizienz (Neligan et al. 2021)

Die **Europäische Kommission** fasst in ihrem Aktionsplan drei übergeordnete Ziele zusammen, die zur Etablierung einer Kreislaufwirtschaft gemeinsam erreicht werden müssen (Europäische Kommission 2020):



befähigte VerbraucherInnen



umweltgerechtes Produktdesign



zirkuläre Produktionsprozesse

Das **umweltgerechte Produktdesign** bzw. die recyclinggerechte Konstruktion von Produkten ist für eine ressourcenschonende Circular Economy wichtig, damit – über den gesamten Lebenszyklus betrachtet – Umweltbelastungen von Produkten reduziert werden können. Es ist notwendig, Produkte für eine Wiederverwertung so zu gestalten und zu produzieren, dass beispielsweise eine Demontage, eine sortenreine Trennung von Materialien und ein effizientes Recycling möglich sind. Das Ökodesign eines Produkts schließt mehrere Faktoren ein: die Konstruktion, die eingesetzten Materialien, die Produktionsprozesse sowie die verfügbaren Informationen für Reparatur und Recycling (SCI4climate.NRW 2021a).

Eine lineare Wirtschaft ist durch einen **einseitigen Material- und Informationsfluss** charakterisiert – von den Zulieferunternehmen zu den Produktionsfirmen über den Handel an die KonsumentInnen. Häufig gehen auf diese Weise produktspezifische Informationen verloren. Sie sind dann weder für die Produktion noch für eine potenzielle Verwertung oder ein Recycling zugänglich. Im Zusammenspiel können befähigte KonsumentInnen, umfassende Informationssysteme und eine umgestaltete Wirtschaftsweise eine effiziente Zirkularität ermöglichen, in der alle Teilnehmenden entlang des Produktlebenszyklus über die notwendigen Informationen verfügen.

Ein weiteres Ziel der Europäischen Kommission in einer Circular Economy ist ein **hoher Materialwert** über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg. Dies kann durch unterschiedliche Konzepte des Reparierens, Wiederverwertens, Remanufacturings und Recyclings erreicht werden – und zwar auf den unterschiedlichen Ebenen des gesamten Produkts, einzelner Komponenten oder Materialien. So kann erreicht werden, dass ein Produkt nicht unmittelbar nach der Nutzung in seiner Gesamtheit als Abfall deklariert werden muss (ebd.).

Von zentraler Bedeutung ist die **systemische Betrachtung der Circular Economy**. Sie stellt ein Konzept für ein gesamtes Wirtschaftssystem dar, da einzelne Produkte oder Materialien – separiert betrachtet – nicht vollständig zirkulär gestaltet werden können. Stattdessen müssen unterschiedliche Industriezweige, Sektoren und Stoffkreisläufe ganzheitlich analysiert und in einer Circular Economy miteinander verknüpft werden. Denn Ausschüsse aus einem Prozess liefern den Input für einen anderen Prozess oder können in anderen Anwendungen weitergenutzt werden (ebd.). Einen Überblick über die Handlungsmöglichkeiten für die zirkuläre Wertschöpfung entlang der Wertschöpfungsketten in NRW gibt die Potenzialanalyse des nordrhein-westfälischen Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie (MWIDE) (Scheelhaase und Zinke 2016).

Dieses Diskussionspapier fokussiert unter Betrachtung der drei genannten Ziele – umweltgerechtes Produktdesign, befähigte VerbraucherInnen und zirkuläre Produktionsprozesse – die Nutzung von Sekundärrohstoffen gegenüber Primärstoffen als einen wesentlichen Schritt auf dem Weg zur Etablierung einer Circular Economy. Betrachtet wird dazu die nordrhein-westfälische Grundstoffindustrie, deren Prozesse in wesentlichen Bereichen energieintensiv sind und die das Potenzial der Verknüpfung von Industrien zur Schließung von Kreisläufen bereits erkannt hat. Sie muss diese jedoch noch weiter ausbauen und optimieren, um eine ganzheitliche Circular Economy umzusetzen.

Dieses Papier soll zwei Hauptziele erreichen: Zunächst zeigt es den Status Quo in den aufgeführten Industrien und das Szenario zur Veränderung der Stoffströme durch die Transformation zu einer klimaneutralen Grundstoffindustrie auf. Dabei identifiziert es die Hemmnisse auf dem Weg zur Etablierung einer Circular Economy. Darauf aufbauend leitet das Papier politische Handlungsempfehlungen und Maßnahmen ab.

1.3 Aktuelle Situation und kurzer Überblick der Rahmenbedingungen

Global betrachtet herrscht in vielen Sektoren überwiegend eine **lineare Wirtschaftsweise** vor. Damit verbunden ist immer noch ein enormes Abfallaufkommen, das die Volkswirtschaften weltweit vor massive Herausforderungen stellt. In der Konsequenz wird der Übergang in eine Circular Economy stärker forciert als jemals zuvor. Wesentliche Impulse für die Weiterentwicklung des regulatorischen Rahmens zur Circular Economy kommen von der Europäischen Kommission. Im Rahmen des **European Green Deals** ist das Konzept der Circular Economy eines der zentralen Handlungsfelder auf dem Weg zur Klimaneutralität bis 2050. Die europäische Kommission hebt dabei die Circular Economy nicht nur als einen Beitrag zur Klimaneutralität, sondern auch zur zukünftigen Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Industrie hervor.

Der „Circular Economy Action Plan“ der Europäischen Kommission

Die Europäische Kommission verabschiedete im März 2020 einen Aktionsplan für die Circular Economy, in dem wesentliche Ziele und Maßnahmen zur Erreichung einer zirkulären Wirtschaft für Europa konkretisiert werden (SCI4climate.NRW 2021a). Auf Basis des **Circular Economy Action Plans** sollen vielfältige Überarbeitungen bestehender Regulierungen, z. B. zu einzelnen Abfallströmen, vorgenommen werden. Dabei betrachtet er hauptsächlich das Produktdesign sowie die Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse im Rahmen einer Circular Economy, mit denen das oberste Ziel erreicht werden kann: die eingesetzten Ressourcen so lange wie möglich in der europäischen Wirtschaft zu halten (Europäische Kommission 2020). Gleichzeitig sollen aber auch neue Strategien entwickelt werden, die insbesondere auf den Querschnittscharakter der Circular Economy abzielen sollen, z. B. mit Blick auf die Verbindung von Circular Economy und Klimaschutz oder auf die zunehmende Digitalisierung der Kreislaufwirtschaft.

Die Circular Economy wird hier auch als **Gegenmodell des linearen Wirtschaftens** gesehen, bei der sich einzelne Wirtschaftsmächte zunehmend den Zugang zu Rohstoffen durch Direktinvestitionen in Schwellen- und Entwicklungsländern sichern, beispielsweise China in verschiedenen afrikanischen Ländern. Stattdessen soll die Importabhängigkeit durch die Kreislaufführung von Rohstoffen reduziert werden.

Die EU-Taxonomie

Auf europäischer Ebene hat die Europäische Kommission zudem mit der **EU-Taxonomie** eine Verordnung geschaffen, insbesondere private Investitionen zukünftig stärker in Richtung Klimaneutralität und Kreislaufwirtschaft auszurichten. Dies wird durch ein Klassifizierungssystem erfolgen, das eine Beurteilung der Tätigkeiten von Industriesektoren/-teilnehmenden im Hinblick auf deren Nachhaltigkeit ermöglicht. In der Verordnung werden Aktivitäten gelistet, die signifikant zu verschiedenen Umweltzielen beitragen und die gleichzeitig keine unerwünschten Nebeneffekte auf die anderen insgesamt sechs Umweltziele haben („do no significant harm“). Hierzu sind aktuell auch Kriterien zur Circular Economy in der Entwicklung, die u. a. auf die Rückgewinnung von Rohstoffen abzielen.

Die Abfallrahmenrichtlinie und das Kreislaufwirtschaftsgesetz

Die „Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlamentes und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien“ (kurz: **Abfallrahmenrichtlinie**) verpflichtet die EU-Mitgliedsstaaten seit dem 12. Dezember 2013, nationale Abfallvermeidungsprogramme zu erstellen (EU 2008). Diese Verpflichtung wurde in Deutschland durch §33 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) im Juli 2013 umgesetzt und mündete im **nationalen Abfallvermeidungsprogramm** (SCI4climate.NRW 2021b). Letzteres ist alle sechs Jahre auszuwerten und bedarfsgerecht fortzusetzen, mit dem Ziel einer Entkopplung von Ressourcennutzung und Wirtschaftswachstum (BMU (Hrsg.) 2013).

Zur Darstellung und Strukturierung möglicher Verwertungsansätze definiert das **Kreislaufwirtschaftsgesetz** eine **Abfallhierarchie** (BMJV 2012), in der fünf Kategorien von Maßnahmen genannt und in eine Rangfolge gebracht sind. Es soll jeweils die Maßnahme bevorzugt angewendet werden, die das höchste Potenzial zur Ressourcenschonung aufweist und die geringsten negativen Auswirkungen auf die Menschen und die Umwelt bei der Abfallgenerierung und deren Bewirtschaftung hat (ebd.). Zur Bewertung dieser Auswirkungen werden Kriterien vorgegeben, die entlang des Lebenszyklus – vom Rohstoff über das Produkt hin zum Abfall – zugrunde gelegt werden sollen:

- die zu erwartenden Emissionen,
- das Maß der Schonung der natürlichen Ressourcen,
- die einzusetzende oder zu gewinnende Energie sowie
- die Anreicherung von Schadstoffen in Erzeugnissen, in Abfällen zur Verwertung oder in daraus gewonnenen Erzeugnissen.



Abbildung 2: Die fünfstufige Abfallhierarchie (ebd.). Darstellung aus (SCI4climate.NRW 2021b)

Gemäß der Abfallrahmenrichtlinie hat die Abfallvermeidung die höchste Priorität im Rahmen der fünfstufigen Abfallhierarchie. Die **Abfallvermeidung** ist eine Schlüsselstrategie für die Etablierung einer Circular Economy und impliziert eine Anpassung von Herstellungsmethoden auf der einen Seite sowie ein angepasstes KonsumentInnenverhalten auf der anderen Seite (ebd.). Laut Kreislaufwirtschaftsgesetz adressiert die Abfallvermeidung im Sinne von §3 Absatz 20 Satz 2 insbesondere die „anlageninterne Kreislaufführung von Stoffen, eine abfallarme Produktgestaltung, die Wiederverwendung von Erzeugnissen, die Verlängerung ihrer Lebensdauer sowie ein Konsumverhalten, das auf den Erwerb von abfall- und schadstoffarmen Produkten sowie die Nutzung von Mehrwegverpackungen gerichtet ist“ (BMJV 2012).

In NRW soll das Landesabfallgesetz zu einem **Landes-Kreislaufwirtschaftsgesetz** weiterentwickelt werden. Mit dem Gesetzentwurf, der bereits vom Landeskabinett verabschiedet wurde, nimmt die Landesregierung eine Anpassung an EU- und Bundesrecht vor. Zentrale Punkte sind die fünfstufige Abfallhierarchie und die grundsätzliche Verpflichtung, bei öffentlichen Aufträgen Rezyklate gegenüber Primärmaterialien vorzuziehen. Das Gesetz soll im Frühjahr 2022 in Kraft treten (MULNV NRW 2021).

Das Ressourceneffizienzprogramm

Mit dem „Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen für Deutschland“ – genannt **ProgRess** – wurde eine Strategie mit dem Ziel geschaffen, den Ressourcenverbrauch zu senken. Eine Kernthese adressiert in dem Programm das Ziel, die „Wirtschafts- und Produktionsweisen in Deutschland schrittweise von Primärrohstoffen unabhängiger zu machen, die Kreislaufwirtschaft weiterzuentwickeln und auszubauen“.

Der Kreislaufwirtschaftsgedanke des **Deutschen Ressourceneffizienzprogramms** (BMU 2020) zielt auf die Bereiche Abfallvermeidung, Wiederverwendung und Vorbereitung zur Wiederverwendung, auf die Verwertung von Abfällen sowie das nachhaltige Management von Rohstoffen in Infrastrukturen, Gebäuden und langlebigen Gütern ab. Dieser Bereich umfasst insgesamt 15 Maßnahmen, davon vier prioritäre.

Weitere Strategien auf Bundes- und Landesebene

Auch die **Industriestrategie 2030** des **BMWi** benennt im Zusammenhang der Rohstoffsicherung die Kreislaufwirtschaft als wichtiges Strategieelement: „Vor dem Hintergrund des weltweit zunehmenden Rohstoffverbrauchs und der Endlichkeit zahlreicher Primärrohstoffe rücken die Sekundärrohstoffe verstärkt in den Fokus.“ (BMWi 2019a). Dabei verweist das Ministerium auf die **Rohstoffstrategie**. Hier zeigt sich mit Blick auf die konkreten Maßnahmen jedoch ein deutlicher Unterschied zwischen dem Fokus der Rohstoffsicherung und dem Thema Circular Economy. Die Rohstoffsicherung wird sehr konkret, z. B. durch Garantien für ungebundene Finanzkredite oder die Einrichtung von Kompetenzzentren unterstützt. Währenddessen bleiben die Ausgaben zur Circular Economy vage und unverbindlich. Es ist in diesem Zusammenhang nur von Dialogprozessen und der Unterstützung von Forschungsvorhaben die Rede (Maßnahmen 12 und 13 (BMWi 2019b)).

Auf NRW-Landesebene wurde vor Kurzem eine **Carbon Management Strategie NRW** (MWIDE 2021) erarbeitet, die auch die Circular Economy als zukunftsfähige Kohlenstoffquelle diskutiert.

Ein Überblick über die einzelnen Strategien und Regularien auf EU-, Bundes- und Landesebene ist in Abbildung 3 dargestellt.

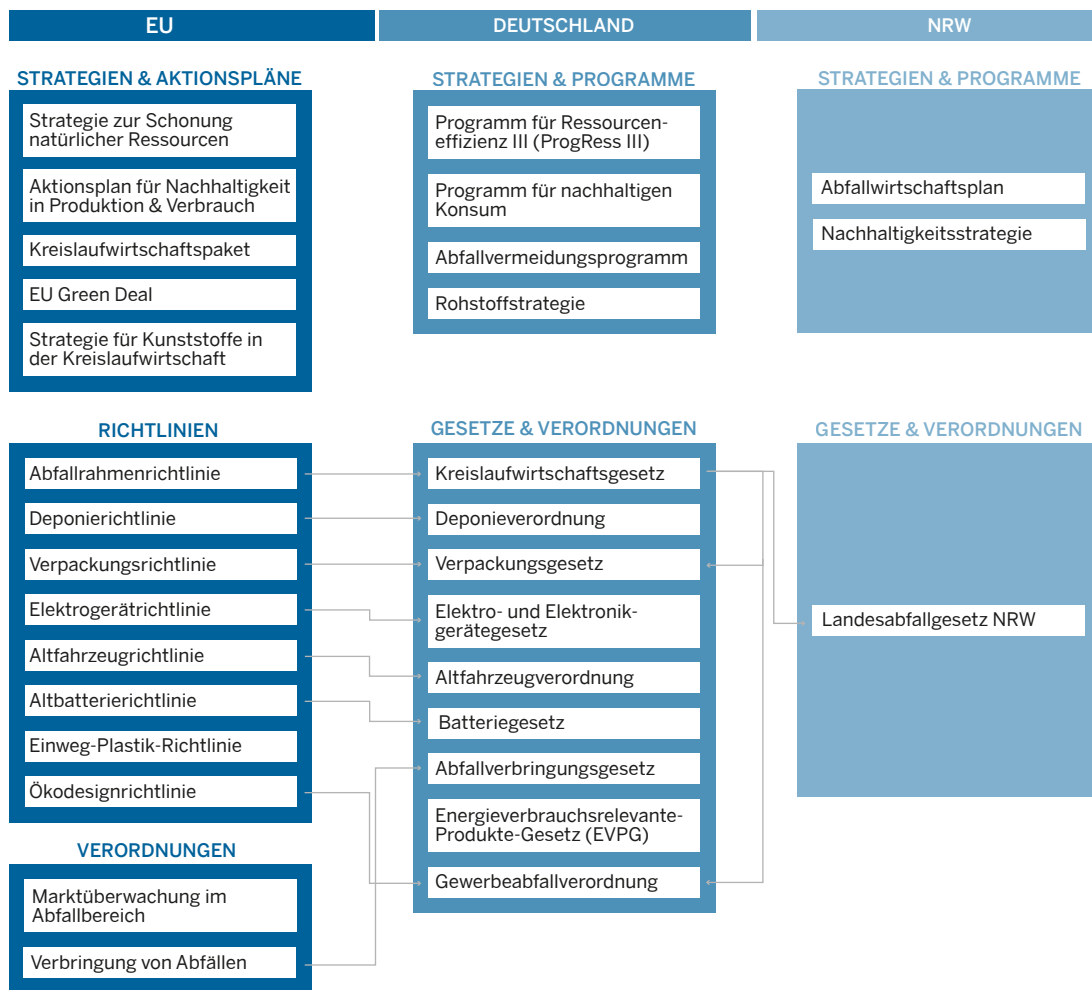


Abbildung 3: Strategien und Regulierungen im Bereich der Circular Economy (SCI4climate.NRW o. J.)

2. STOFFSTRÖME IN NRW

Die Industrie in NRW ist ein historisch gewachsenes Netzwerk aus über 10.000 Unternehmen mit zirka 1,2 Millionen Beschäftigten, dessen **Wertschöpfungsketten** sich aus den lokal vorhandenen **Primärrohstoffen** entwickelt haben. Die umfassende Transformation hin zu einer nachhaltigen Circular Economy stellt NRW vor eine besondere Herausforderung. Denn die Stoffströme vieler Industriezweige sind lokal eng vernetzt und punktuelle Veränderungen wirken sich zwangsläufig auf mehrere Branchen und Unternehmen gleichzeitig aus.

2.1 Status Quo

Die **Grundstoffindustrie** in NRW benötigt für ihre Produktion Rohstoffe, die heute vorwiegend über Primärrohstoffe wie Erdöl, Kalkstein, Bauxit, Eisenerz oder Sand gedeckt werden. Doch auch **Sekundärrohstoffe** kommen immer mehr zum Einsatz: Reststoffe und Nebenerzeugnisse aus der Grundstoffindustrie werden branchenübergreifend weiter als Rohstoff genutzt und Produktionsabfälle und Post-Consumer-Abfälle werden recycelt. Welche Stoffströme bereits rezykliert werden und welche Herausforderungen für die Grundstoffindustrie noch bestehen, wird im Folgenden diskutiert.

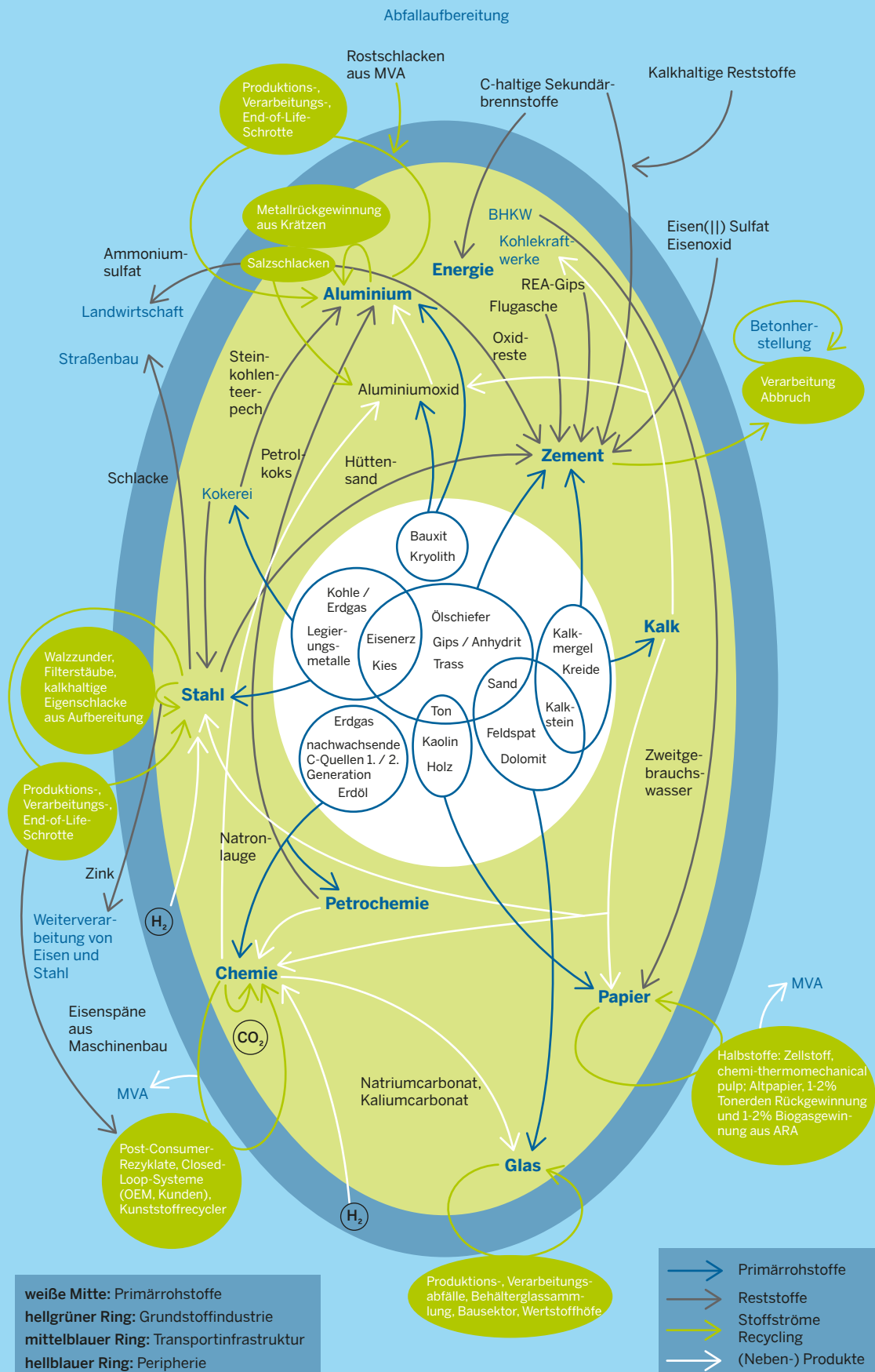


Abbildung 4: Stoffströme der Grundstoffindustrie – Status Quo

ZAHLEN UND FAKTEN

Um die Circular Economy in der Grundstoffindustrie voranzutreiben, ist es notwendig, die aktuellen **Stoffströme der Rohstoffe** und die Produktionsmengen der Grundstoffe zu kennen. Doch hier bestehen **große Lücken in der veröffentlichten Datenlage** auf Bundes- und vor allem auf Landesebene. Die Produktionsmengen und der Rohstoffeinsatz der verschiedenen Branchen sollten zukünftig vom statistischen Bundesamt oder äquivalenten Behörden des Landes NRW erfasst werden, sodass der zukünftige Rohstoffbedarf abgeschätzt werden kann und Synergien zwischen den Branchen gehoben werden können. Die folgenden Grafiken stellen – soweit entsprechende Zahlen veröffentlicht wurden – den Sekundärrohstoffeinsatz der **Grundstoffindustrie** dar:

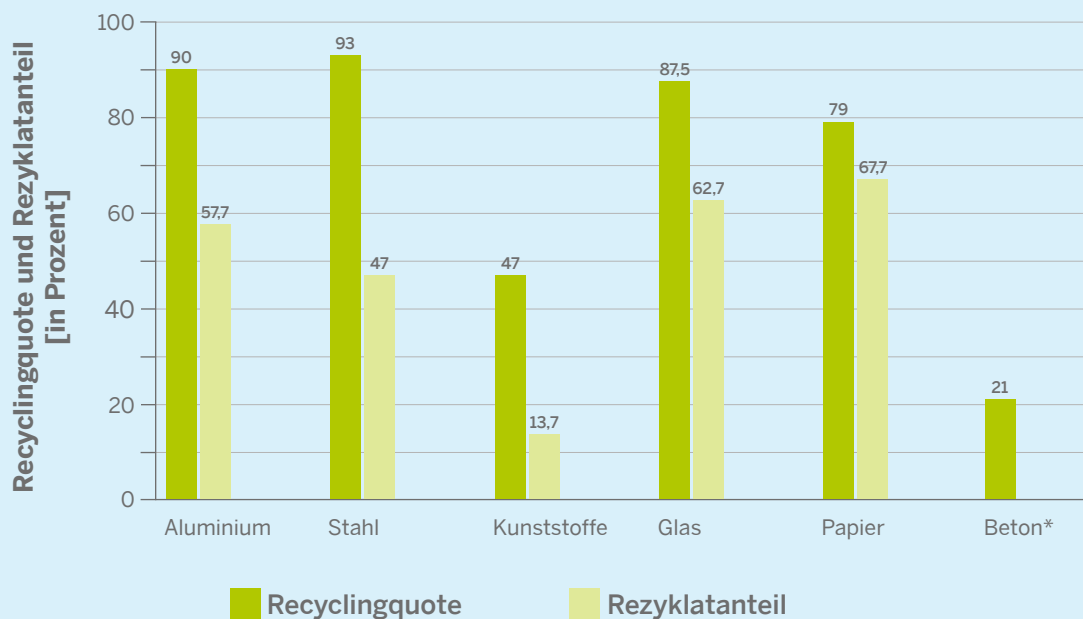


Abbildung 5: Recyclingquoten und Rezyklatanteil der verschiedenen Grundstoffe in Deutschland; *als Recycling-Baustoff hochwertig in Betonherstellung; (Aluminium Deutschland e. V. o. J., WV Stahl 2018, BGR 2019, UBA 2021a, 2020, VDP 2021, Conversio 2020, BGR 2020)

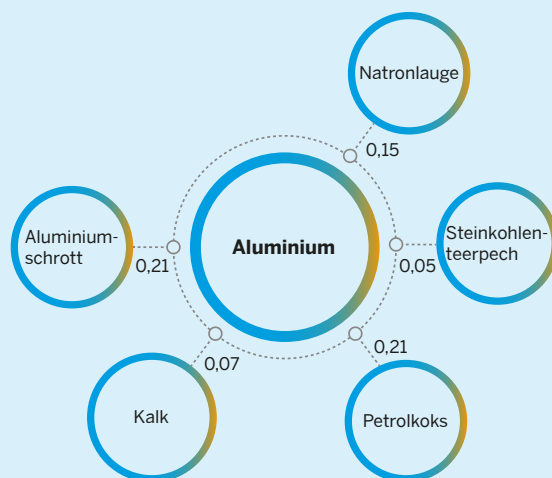


Abbildung 6: Sekundärrohstoff- und Nebenprodukteinsatz in der Aluminiumproduktion in NRW in 10⁶ Tonnen pro Jahr; (Hydro 2021a; TRIMET o. J.), berechnet aus (IAI 2018; IT.NRW 2020)

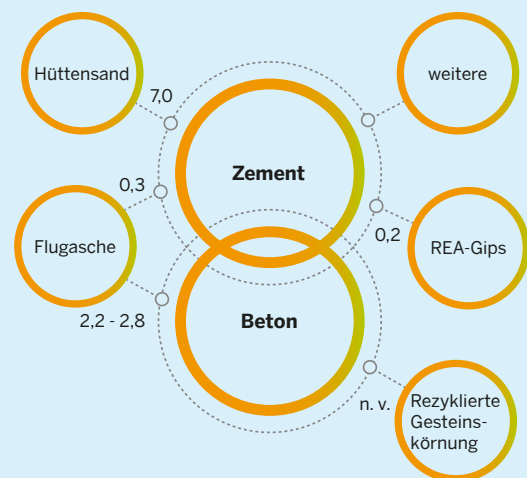


Abbildung 7: Sekundärrohstoffeinsatz in der Zement- und Betonindustrie in Deutschland in 10⁶ Tonnen pro Jahr (WIN 2019; VDZ 2020b; bbs 2019; Kreislaufwirtschaft Bau 2021)

Chemieindustrie

Die **Chemiebranche** in NRW hat eine sehr diverse Produktpalette, deren **Rohstoffe** heute größtenteils auf Erdöl und Erdgas basieren. Zudem nutzt sie bereits Biomasse und vereinzelt auch CO₂ als Rohstoffe (z. B. (Covestro o. J.)). Und schließlich setzt sie neben Rezyklaten auch Reststoffe aus anderen Branchen ein. So dienen beispielsweise Eisenspäne als Basis für Pigmente.

Bei der **Wiederverarbeitung von Kunststoffabfällen** gibt es in puncto Wirtschaftlichkeit eine wesentliche Hürde: Aktuell wird Kunststoffabfall mithilfe von werkstofflichen/physikalischen Verfahren stofflich verwertet. Dabei kommt es zu einer sukzessiven Verkürzung der Polymerketten – und damit zu einer Veränderung der Eigenschaften (Ragaert et al. 2017). Eine weitere Herausforderung ist die Heterogenität des Kunststoffabfalls: Er enthält Störstoffe, Verbundkunststoffe und Stoffgemische (Müll). Auf lange Sicht führt das reine werkstoffliche/physikalische Recycling zu einem Downcycling, da das Rezyklat mit jedem Zyklus minderwertiger wird.

Eisen- und Stahlindustrie

Zum größten Teil werden Schrotte in der **Eisen- und Stahlindustrie** wieder in die Stahlproduktion zurückgeführt. Hier gibt es zwei Möglichkeiten, sie zu verwerten: Zum einen wird Stahlschrott in der sogenannten **Sekundärstahlroute** in Elektrolichtbogenöfen zu Rohstahl eingeschmolzen. Zum anderen wird Stahlschrott in der **Primärroute** als Kühlterschrott im Konverter eingesetzt, sodass auch hier der Rohstahl aus zirka einem Sechstel Sekundärrohstoff besteht (Hiebel und Nühlen 2016).

Stahl bleibt aufgrund seiner Materialeigenschaften auch über die zukünftigen Recyclingzyklen hinweg zu 100 Prozent recyclingfähig und die Rückgewinnung ist aus fast jedem Abfallstrom möglich (WV Stahl 2020). Um dieses Potenzial weiter auszuschöpfen, sollten **Schrottströme in Europa** verbleiben und mit **innovativen Aufbereitungsverfahren** so bearbeitet werden, dass der Eisen- und Stahlindustrie hochwertige Schrottsorten zur Verfügung gestellt werden können. Denn der Anteil qualitätsmindernder Begleitmetalle im Schrott, die im Schmelzprozess nicht entfernt werden können – allen voran Kupfer – nimmt zu. Eine gezielte und genauere Separierung von Schrotten würde die Wertschöpfung bei der Edelstahlherstellung durch höherwertige legierte Schrotte und bei der C-Stahlherstellung durch saubere unlegierte Schrotte erhöhen.

Für die bei der Sortierung entstehenden und möglicherweise problematischen Restfraktionen müssen Lösungen zur weiteren Verwertung bzw. zum Ausschleusen aus dem Wirtschaftskreislauf gefunden werden.

Aluminiumindustrie

Zwar wird schon der Großteil des Schrottes in der **Aluminiumindustrie** in Deutschland recycelt (Aluminium Deutschland e. V. o. J.), doch die Rezyklatanteile in neuen Produkten sind noch relativ gering. Hier liegen die Herausforderungen in der **legierungsscharfen Trennung von Al-Legierungen** und der **Schrottverfügbarkeit**. Denn Metallprodukte haben eine hohe Langlebigkeit und werden oft exportiert, sodass diese nicht als Schrott in Deutschland anfallen. Für die Primäraluminiumherstellung in NRW wird Aluminiumoxid importiert (Hydro 2021b, TRIMET o. J.). Die beim Bauxitabbau und der Umwandlung zu Aluminiumoxid benötigten Rohstoffe und entstehenden Reststoffe werden daher nicht diskutiert.

Bei der **Primäraluminiumerzeugung** und den nachgeschalteten **Gießeinrichtungen** fallen hauptsächlich folgende Stoffe an: Reststoffe wie Kathodenkohlen und andere kohlenstoffhaltige Restfraktionen, gebrauchte Feuerfestauskleidungen sowie Krätzen und Filterstäube.

Für die **Kathodenkohlen** existieren eine Reihe von Nutzungsmöglichkeiten: Sie können z. B. als Reduktionsmittel in der **Stahl- und Steinwolleindustrie** verwendet werden. Außerdem sind sie als Zusatzbrennstoff bei der **Zementklinkerherstellung** verwertbar. Auch für chemisch thermische Aufbereitungsverfahren sind sie geeignet. **Feuerfestauskleidungen** können ebenfalls z. B. bautechnisch verwertet oder chemisch-physikalisch behandelt werden.

Die Nutzungsmöglichkeiten für Kathodenkohle und Feuerfestauskleidung werden in NRW schon ausgeschöpft. Allerdings fallen dabei noch Rückstände an, die schwierig zu verwerten sind. In der Literatur wird darüber hinaus von umweltschädlichen Fluorid- und Cyanidverbindungen in der Kohlenstofffraktion berichtet (Fona o. J., Hydro 2021c).

Krätzen werden vollständig aufbereitet und das darin enthaltene Aluminium in den Produktionsprozess zurückgeführt. Reststoffe aus der Krätzeaufbereitung und der dabei anfallenden Salzschlacken finden Verwendung in anderen Industriezweigen. Der Aluminiumprozess ist somit hinsichtlich der Metallfraktion nahezu rückstandsfrei. Die Nutzung im **Baustoffsektor** könnte zukünftig jedoch durch die neu geschaffene Ersatzbaustoffverordnung behindert werden (siehe auch Absatz „Zement- und Betonindustrie“).

Filterstäube fallen nur in vergleichsweise geringen Mengen an. Ihre Verwertung oder Entsorgung kann jedoch in Einzelfällen problematisch sein.

Zement- und Betonindustrie

Viele **Reststoffe und Nebenerzeugnisse** aus der **Grundstoffindustrie** finden in der **Zementproduktion** als Rohstoff Anwendung. Beispielsweise gehen mineralische Bestandteile aus Sekundärbrennstoffen in den Portlandzementklinker (Hauptbestandteil von Zement) über. Des Weiteren werden hier **Schlacken** aus der **Stahlindustrie**, beispielsweise in Form von Hüttensand, als weiterer Zementhauptbestandteil eingesetzt (s. Abbildung 4).

Das Recycling von **mineralischen Abfällen** nimmt bei der Umsetzung der Circular Economy eine besondere Bedeutung ein. Denn dieser Massenstrom macht einen erheblichen Teil des gesamten Abfallaufkommens in der EU aus. Im Jahr 2018 waren es 74 Prozent (eurostat 2021a).

Zwar wird ein großer Teil der mineralischen Bauabfälle in die Wertschöpfungskette zurückgeführt. Allerdings werden nur 21 Prozent der Recycling(RC)-Baustoffe hochwertig in der **Asphalt- und Betonherstellung** recycelt (Kreislaufwirtschaft Bau 2021). Der übrige Teil der mineralischen Abfälle wird dort eingesetzt, wo der Qualitätsanspruch weniger hoch ist, zum Beispiel im Straßen- und Erdbau. Dennoch werden auch hier im gleichen Maße Primärrohstoffe ersetzt. In **Recyclingbeton** für den Einsatz im Hochbau, für den eine hohe Betonqualität benötigt wird, dürfen zurzeit nur bis zu 45 Volumenprozent der Gesamtgesteinskörnung als Rezyklat enthalten sein (DAfStb 2010). Der restliche Anteil besteht weiterhin aus Primärrohstoffen.

Eine Rückführung von **Feinfraktionen** aus dem Recycling in die Zementherstellung erfolgt in Deutschland noch nicht, da noch keine Technik für eine hochwertige Aufbereitung von Feinstoffen gleichbleibender Qualität zur Verfügung steht. Außerdem existieren noch keine normativen Regelungen zur Verwendung von Recyclingsand im Beton und zur Verwendung von **Brechsandfeinstanteilen** als Zement(haupt-)bestandteil. Sobald entsprechende (Produkt-)Normen oder bauaufsichtliche Zulassungen zur Verfügung stehen, wird eine große Herausforderung für die Unternehmen in der Markteinführung von **R-Betonen und klinkereffizienten Zementen mit Brechsandfeinstanteilen** liegen.

Ebenso herausfordernd wird es sein, die **regionale Verfügbarkeit** von rezyklierten Gesteinskörnungen sicherzustellen. Insgesamt werden die Mengen an RC-Baustoffen aus dem Abbruch nicht ausreichen, um den Bedarf an Gesteinskörnungen komplett zu decken. Die Herstellung von Portlandzementklinker aus reinen Brechsandfeinstanteilen ist chemisch nicht möglich. Auch hier werden in Zukunft Primärrohstoffe benötigt werden.

Sekundärrohstoffe sind eine wichtige Rohstoffquelle. Der Ausbau der Circular Economy kann helfen, die Importabhängigkeit mancher Industriebranchen zu reduzieren und heimische Ressourcen, die heute noch flächenintensiv abgebaut werden, zu schonen.

Herausforderungen und Klimaschutzpotenziale der verschiedenen Grundstoffindustrien auf einen Blick

Aluminium

Herausforderung:

- Vielzahl unterschiedlicher Alu-Legierungen
- Verfügbarkeit von Schrott wirkt limitierend (Export und Langlebigkeit der Produkte)

Schwer verwertbare Reststoffe:

- Filterstäube aus Schmelzofen
- Fluorid- und Cyanidverbindungen in Kohlenstoffausbruch

Klimaschutz durch Recycling:

- geringerer Energieverbrauch: Beim Einschmelzen von Aluminiumschrott geringere Temperatur notwendig als bei Primärroute (Material Economics 2018)
- keine prozessbedingten Emissionen in Sekundärroute

Rohstoffsicherung/Ressourcenschonung:

- Bauxit-/Aluminiumoxidimport

Glas

Herausforderung:

- Vielzahl unterschiedlicher Glassorten und benötigter Qualitäten
- Kaskadennutzung: Flachglas aus Post-Consumer-Abfällen hat zu geringe Qualität für neues Flachglas (BV Glas 2014, Rose et al. 2019)

Schwer verwertbare Reststoffe:

- Feinstkörnung in Schredder-Leichtfraktion (Martens und Goldmann 2016)

Klimaschutz durch Recycling:

- Minderung des rohstoffbedingten CO₂, da verringerter Einsatz von Carbonaten pro Tonne Glas
- geringerer Energieverbrauch, da geringere Schmelztemperatur bei höherem Glasscherbenanteil (ebd.)

Rohstoffsicherung/Ressourcenschonung:

- heimische Ressourcen schonen

Chemie

Herausforderung:

- Störstoffe, Verbundkunststoffe, Stoffgemische (Müll)
- Polymerketten verkürzen sich durch Belastung bei werkstofflichem Recycling (Ragaert et al. 2017)
- Export des erfassten und sortierten Abfalls
- (thermo-)chemisches Recycling derzeit nicht als Recycling anerkannt
- zu wenig Erneuerbare Energien für den erhöhten Energiebedarf

Rohstoffsicherung durch Recycling:

- Ersatz fossiler Kohlenstoffquellen

Stahl

Herausforderung:

- Verfügbarkeit von Schrott wirkt limitierend (Export und Langlebigkeit der Produkte)
- Transformation führt zu neuen Zusammensetzungen und Mengen der Reststoffe und Nebenprodukte

Klimaschutz durch Recycling:

- Einsatz von Strom in der Sekundärroute statt fossiler Energieträger in der Primärroute
- stoffliche Verwertung der Kuppelgase wird getestet

Papier

Herausforderung:

- Fasern verkürzen sich mit Recyclingzyklus
- Rückstände/Verunreinigungen reichern sich über Lebenszyklus an (bvse o.J., UBA 2021b)

Klimaschutz und Ressourcenschonung:

- weniger Holzabbau, mehr Wälder als CO₂-Senke, geringere CO₂-Entstehung bei Recyclingpapierherstellung (ebd.)

Metallguss

Herausforderung:

- Verfügbarkeit von Schrott wirkt limitierend (Export und Langlebigkeit der Produkte)
- Vielzahl an Metalllegierungen

Klimaschutz durch Recycling:

- Einsatz von Strom in der Sekundärroute statt fossiler Energieträger in der Primärroute

Zement und Beton

Herausforderung:

- Dekarbonisierung der Energiewirtschaft und der Stahlindustrie vermindert die Verfügbarkeit bisher genutzter Sekundärstoffe in der Zementherstellung
- (Produkt-)Normen und Markteinführung klinkereffizienter Zemente und R-Betone erforderlich
- RC-Sand bisher nicht verwendbar (Norm)
- RC-Mengen aus Abbruch nicht ausreichend, um Bedarf vollständig zu decken

Klimaschutz und Ressourcenschonung:

- Minderung des rohstoffbedingten CO₂: verringerter Klinkeranteil im Zement (VDZ 2020a)
- heimische Ressourcen schonen, Sand als kritischen Rohstoff zurückgewinnen

2.2 Auswirkungen struktureller Veränderungen durch die Klimapolitik

Um die Klimaziele zu erreichen, muss sich die **Grundstoffindustrie** strukturell verändern. Vermieden werden muss nicht nur die CO₂-Entstehung bei der Energieversorgung der Produktion, sondern auch die prozessbedingte CO₂-Entstehung. Im Folgenden wird beschrieben, welche Auswirkungen der Transformation auf die Stoffströme in der Grundstoffindustrie erwartet werden.

Für die Energieversorgung gewinnen die **Erneuerbaren Energien** immer mehr an Bedeutung, während der Anteil an Energie aus fossilen Energieträgern abnimmt. Mit dem Abschalten der Kohlekraftwerke in NRW entfallen schon jetzt die Reststoffe wie Flugasche und REA-Gips aus der Abgasreinigung. Lediglich die Erzeugung von Strom und Wärme aus Biomasse wird bei der Energiegewinnung zu Reststoffen führen. Gleichzeitig führt der Wechsel von Kohlekraftwerken auf Windenergie- und Solaranlagen auf der Anlagen-seite zu neuen **Herausforderungen der Circular Economy**: Während bei Windkraftanlagen das Recycling des Betonfundaments und der Verbundwerkstoffe der Flügel eine Herausforderung darstellen (Sommer et al. 2020), sind es bei Solaranlagen vor allem seltene Erden, die zurückgeführt werden müssen. Ebenso besteht Entwicklungsbedarf beim Recycling der Batterien, die für die Energiespeicherung immer wichtiger werden. Insbesondere das enthaltene Lithium und der Elektrolyt werden zumeist noch nicht zurückgewonnen.

Chemieindustrie

Genauso wie die Energiebranche muss auch die **Chemieindustrie** ihre Rohstoffquellen grundlegend verändern, um sich hin zur Klimaneutralität zu transformieren. Die heutige **Petrochemie** erfährt schon jetzt eine Umstellung ihrer Geschäftsmodelle und bietet zukünftig der nachgelagerten Chemiebranche auch **nachhaltige Kohlenstoffquellen** an: Fossile Primärrohstoffe werden durch nachhaltige Biomasse, Rezyklate und perspektivisch durch CO₂ ersetzt. Hierdurch entfallen aktuelle Nebenprodukte der Petrochemie wie Petrolkoks für die **Aluminiumbranche**.

Aluminiumindustrie

Die Aluminiumindustrie arbeitet seit Jahrzehnten an der Entwicklung sogenannter **inert Anoden** (TRL 5). Sie sollen die petrolkoks-basierten Kohlenstoffanoden ersetzen, sodass die prozessbedingte CO₂-Entstehung bei der Reduktion des Aluminiumoxids zukünftig vermieden wird (TRIMET 2021, ELYSIS 2021) und die Aluminiumproduktion hinsichtlich der Einsatzstoffe **dekarbonisiert** werden kann.

Mit der Einführung der inerten Anoden würden sowohl der Einsatz von Steinkohlenteerpech bei der Anodenherstellung als auch die dabei entstehenden kohlenstoffhaltigen Reststofffraktionen (kohlenstoffhaltige Stäube, Brennofenschlacken, teerhaltige Reststofffraktionen etc.) als Kohlenstoffquelle entfallen. Ankündigungen, die inerte Anode bis 2024 zur großtechnischen Marktreife zu führen, sind jedoch aufgrund der bisherigen Erfahrungen vorsichtig zu bewerten. Auch bleibt abzuwarten, ob und in welchem Umfang inerte Anoden auch über eine ausreichende Standzeit verfügen. Und schließlich ist noch nicht abzusehen, inwieweit neue Reststofffraktionen entstehen und diese stofflich verwertet werden können.

Stahlindustrie

Die Umstellung der **Stahlproduktion** auf die **Direktreduktion** führt dazu, dass der Koks nicht mehr benötigt wird. Gleichzeitig steht der Steinkohlenteer aus den **Kokereien** für die Kohlenstoffelektroden der **Aluminium- und Elektrostahlindustrie** nicht mehr zur Verfügung (s. o.). Im Gegensatz zur Kohlenstoffanode in der Aluminiumindustrie gibt es noch keine Ansätze zur Substitution der **Graphitelektrode** für die Elektrostahlindustrie, für deren Herstellung u. a. auch Pech benötigt wird. Während der Transformation müssen – im Sinne der Nutzung von Reststoffen und der Rohstoffsicherung – diese Abhängigkeiten mitgedacht werden.

Zement- und Kalkindustrie

Die Umstellung der Stahlproduktion auf die Direktreduktion und eine Steigerung der Stahlherstellung über die Sekundärroute haben auch Auswirkungen auf die **Zementbranche**. Denn auch in diesen Verfahren entstehen Reststoffe, von denen beispielsweise die Schlacken perspektivisch in der Zementbranche als Sekundärrohstoff eingesetzt werden können. Jedoch haben diese eine andere Zusammensetzung als der heutige Hüttensand aus dem Hochofenprozess. Außerdem führt die Energiewende dazu, dass Flugasche und Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen nicht mehr für die Zementherstellung zur Verfügung stehen. Unabhängig von sonstigen Veränderungen wird in der Zementindustrie **Gips** auch zukünftig als Sulfatträger benötigt. Steht dieser zukünftig nicht mehr als Sekundärrohstoff zur Verfügung, muss er als Primärrohstoff abgebaut oder aus Gipsrezyklaten gewonnen werden.

Insgesamt wird sich also die Rohstoffbasis der Zementindustrie stark verändern. Aufgrund dessen werden neue Zementzusammensetzungen entwickelt. Mit ihnen sollen gleich drei Ziele erreicht werden: die Reaktion auf die **Veränderung der zur Verfügung stehenden Sekundärrohstoffe**, die **Verringerung der CO₂-Entstehung** der Produktion und die **Erhaltung der Qualität** der Zemente (VDZ 2020a).

Auch die **Kalkbranche** ist von der Transformation der Energiebranche betroffen, da Branntkalk nicht mehr für die Abgasreinigung in Kohlekraftwerken nachgefragt wird.

Mit dem Ziel, Stoffkreisläufe zu schließen und dabei möglichst hochwertige Rezyklate zu gewinnen, wird die energetische Verwertung von Reststoffen und Nebenprodukten nur noch zur **Ausschleusung von Schad- und Störstoffen** gesehen. Das heißt, dass sich sowohl die Mengen als auch die Zusammensetzung der Sekundärrohstoffe aus der Abfallaufbereitung verändern werden. Dies betrifft vor allem die **Zementbranche**, aber auch die Rostschlacken in der **Aluminiumindustrie**.

Glasindustrie

Damit die **Glasindustrie** die prozessbedingten Emissionen vermeiden kann, muss ein **alternativer Rohstoff** zu Soda und Kalkstein (Carbonate) eingesetzt werden (Gerdes und Zimmermann 2020). Hier wird zurzeit der Einsatz von **Hydroxiden** erforscht, die keine rohstoffbedingte CO₂-Entstehung mit sich bringen. Dies hat Auswirkungen auf die Nachfrage der heutigen und zukünftigen Edukte. Gelingt zudem die Umstellung auf eine kohlenstofffreie Wärmebereitstellung (Elektrifizierung/H₂-Feuerung), besteht das Potenzial der Dekarbonisierung der Glasindustrie.

Recycling von Windkraftanlagen

Abgerüstete Rotorblätter von Windkraftanlagen stellen einen Abfallstrom dar, für den es aus mehreren Gründen noch an der Implementierung von Recycling- und Verwertungsinfrastrukturen mangelt. Verwertungstechnologien für die wichtigsten Baumaterialien von Rotorblättern – glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) und kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) – befinden sich noch in einem niedrigen „Technology Readiness Level“ (TRL). Außerdem gibt es noch keine Sekundärmärkte für die potenziellen Rezyklate. Und schließlich ist auch die zukünftige Nachfrage nach diesen Rezyklaten unsicher.

Die Planung der optimalen Wertschöpfungskette des Recyclings und der Verwertung für GFK und CFK ist eine komplexe Aufgabe. Investitionen, Prozesskosten, Ausbeuten der Technologien und Erlöse der rezyklierten Materialien unterscheiden sich stark. Daher ist eine strukturierte Analyse notwendig: Bewertet werden müssen sowohl die Recycling- und Verwertungsinfrastrukturen und die daraus resultierenden Stoffströme als auch die Wahl der Aufbereitungstechnologien in Abhängigkeit von möglichen politischen Regulierungen und Sekundärmarktentwicklungen (Sommer und Walther 2021).

Nicht alle Maßnahmen der Circular Economy liefern automatisch einen Beitrag zu Klimaschutz und Ressourceneffizienz. Genauso ist nicht jede Maßnahme zum Klimaschutz mit den Zielen der Circular Economy (siehe SDGs) vereinbar. Dies wird am Beispiel der Windkraftanlagen klar (siehe **Infobox** auf S. 20). Circular Economy-Maßnahmen sind daher im Sinne des Ökodesigns immer auch nach ihrer CO₂-Entstehung zu bewerten. Parallel sollen neue Produkte und Anlagen, die der CO₂-Reduktion dienen, auf ihre Recyclingfähigkeit geprüft werden. Schon vor der Produkteinführung müssen die Wertschöpfungsketten des Recyclings konzeptioniert werden. Diese beiden SDGs können aber auch sehr gut ineinander greifen, wie zum Beispiel beim **Aluminium- und Glasrecycling** (Material Economics 2018, Martens und Goldmann 2016).

2.3 Potenzial zur weiteren Schließung der Stoffkreisläufe

In vielerlei Hinsicht ist die Sekundärrohstoffnutzung in der **Grundstoffindustrie** bereits etabliert. Gerade bei der Reststoffnutzung haben sich aus wirtschaftlichen Gründen Symbiosen entwickelt. Dennoch besteht weiterhin großes Potenzial, die verbleibenden Reststoffe aus der Produktion, die Produktabfälle aus der Weiterverarbeitung und die Post-Consumer-Abfälle wieder als Sekundärrohstoff einzusetzen. Wichtige Hebel sind neue **Technologien** für Sammlung, Trennung und Recycling. Diese müssen dann mit digitalen Lösungen zur Informationsweitergabe verknüpft werden. Von entscheidender Bedeutung sind aber vor allem **Kooperationen** – sowohl **entlang der Wertschöpfungskette** als auch **zwischen den verschiedenen Branchen** –, um **industrielle Symbiosen** über die Transformation hinaus zu erhalten und weiter auszubauen.

Viele Produkte aus der **Metall- und Baustoffbranche** haben eine lange Lebensdauer. Umso wichtiger ist es, **Exporte** der anfallenden Schrotte und Bauabfälle möglichst zu minimieren. Vielmehr sollten diese vollständig in Europa im Kreis geführt und – wenn sie nicht mehr wiederverwendet werden können – in die **Grundstoffindustrie** als Sekundärrohstoff zurückgeführt werden. Gleiches gilt für Kunststoffe, die (außer PET) ebenfalls zu großen Teilen als Abfall exportiert werden.

Doch nicht nur die Exporte stellen die **Aluminium-, Kunststoff- und Glasindustrien** vor eine große Herausforderung. Problematisch ist auch, dass die zurückgeführten Stoffströme aus einer Mischung an Aluminiumlegierungen sowie Kunststoff- bzw. Glasarten bestehen und Verunreinigungen enthalten.

Abhilfe könnten **Rücknahmesysteme** schaffen. Sie könnten dafür sorgen, dass eine sortenreine Sammlung an Baustellen, im Handwerk, im privaten Haushalt und an Abfallsammelstationen gestärkt wird. Wertstoffhöfe und Recyclingunternehmen könnten hier eine zentrale Rolle übernehmen. Sie könnten zum Beispiel Fenster sammeln und den Herstellern zurückgeben, sodass Flachglas sowie die enthaltenen Kunststoffe und das Aluminium gezielt und sortenrein zurückgeführt werden könnten.

Es ist Sache der Grundstoffindustrie, gemeinsam mit dem weiterverarbeitenden Gewerbe und den Recyclingunternehmen, Konzepte und Geschäftsmodelle zu entwickeln.

Ziel solcher Kooperationen entlang der Nutzungswege ist dabei nicht nur, die Inputmengen zu erhöhen, sondern auch die Vermischung unterschiedlicher Werkstoffe während der Sammlung zu vermeiden. Denn dies erleichtert die nachfolgend beschriebene Trennung und das Recycling.

Trennung von Materialien

Generell gilt: Je besser unterschiedliche Materialien voneinander getrennt werden können, desto einfacher können diese recycelt werden. Gleichzeitig kommt hier das **Produktdesign** zum Tragen. Getreu dem Prinzip „Design for Recycling“ müssen Produkte so entwickelt werden, dass deren Komponenten und unterschiedlichen Materialien sich einfach voneinander trennen lassen. Durch geschicktes Produktdesign und die Einführung **neuer Sortiertechnologien** können so Stoffströme erschlossen werden, die bisher noch nicht recycelt werden können. Oder es können Recyclingtechnologien angewendet werden, die weniger aufwendig bzw. energieintensiv sind.

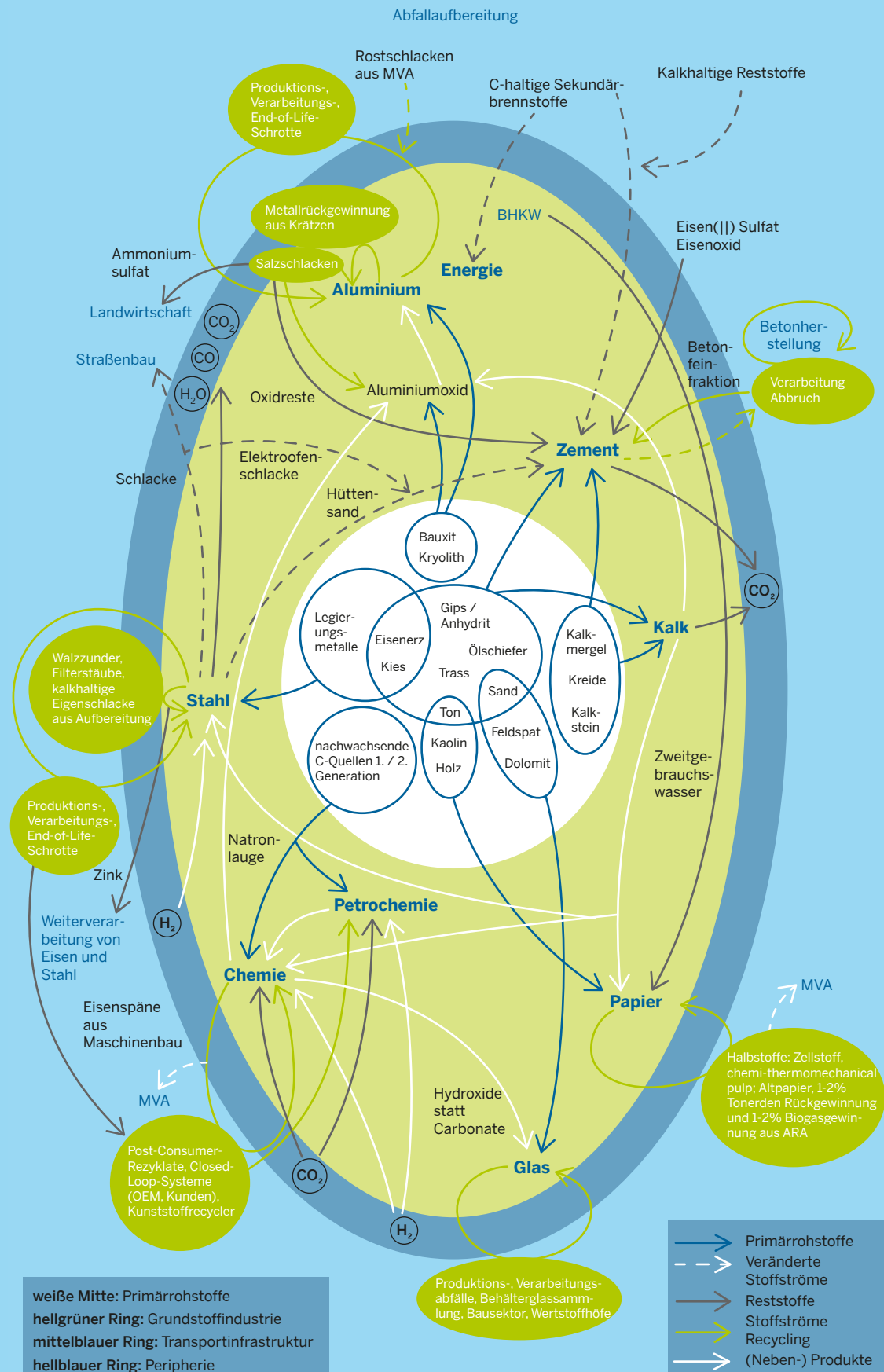


Abbildung 8: Zukünftige Stoffströme der Grundstoffindustrie

Konkrete Ansätze für die **Grundstoffindustrie**, die weiterentwickelt werden müssen, sind

- die sortenreine Trennung von **Kunststoffen** zum Ausbau des mechanischen Recyclings, sodass Stoffströme erschlossen werden können, die zurzeit noch energetisch verwertet werden. Bei der Sortierung liegt die Herausforderung in der unbegrenzten Kombination von Polymeren, Zuschlags- und Verstärkungsmaterialien, die zum Erreichen der benötigten Eigenschaften maßgeblich sind. Hier sind ausgefeilte Sensor- und Trenntechnologien notwendig, um die Stofftrennung ökonomisch und ökologisch sinnvoll weiterzuentwickeln,
- die legierungsscharfe Trennung von **Aluminiumschrotten** zur Verbesserung der Effizienz des Kreislaufprozesses,
- die verbesserte Abtrennung **metallischer und organischer Komponenten**, ähnlich wie es bereits heute für den Weißblechschrott erfolgt, sodass höherwertige Schrotte entstehen. Heute wird zwar bereits sämtlicher Schrott verwertet, jedoch könnte durch die verbesserte Trennung die Qualität von Schrotten, die in der **Stahlindustrie** eingesetzt werden können, gesteigert werden,
- die Trennung von groben Gesteinskörnungen, Sand und Zementstein im **Betonrecycling**,
- die Sortierung der **Feinstpartikel** der **Glasindustrie** nach Farbe zur Erhöhung der Glasausbeute.

Recycling

Die chemische Trennung und die damit **elementare Zerlegung von Metalllegierungen** kann durch thermische, galvanische oder elektrolytische Prozesse erfolgen. Hierbei spielt vor allem die Wirtschaftlichkeit eine große Rolle. So findet sie bisher vor allem für seltene Erden und Edelmetalle Anwendung. Eine **Optimierung der Schmelzofentechnologie** kann zudem die Schmelzausbeuten des Aluminiumrecyclings erhöhen.

Um zukünftig Betonbestandteile hochwertig recyceln zu können, werden Technologien (weiter-)entwickelt, die es ermöglichen, das Verbundmaterial **Beton in seine Komponenten** zu zerlegen. Zum Beispiel können thermische Verfahren eingesetzt werden, die die Eigenschaft der begrenzten thermischen Stabilität des Zementsteins – Zerfall bei hohen Temperaturen – nutzen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die elektrodynamische Fragmentierung zu nutzen, bei der das Verbundmaterial Beton durch elektrisch erzeugte Druckwellen in seine Komponenten zerlegt wird. Brechsande könnten so in RC-Sande und RC-Zementstein („recycled concrete fines“) zerlegt werden und zukünftig als Sekundärrohstoff für die **Betonherstellung** (Sand) und für die **Zement(klinker-)herstellung** dienen (VDZ 2020a).

Das **chemische Kunststoffrecycling** hat das Potenzial, die Kunststoffabfälle, die zurzeit in Müllverbrennungsanlagen energetisch verwertet werden, im Kunststoffkreislauf zu halten. Denn dadurch können auch Kunststoffabfälle recycelt werden, die aufgrund ihrer Heterogenität an Materialien nicht werkstofflichen Verfahren zugeführt werden können (IN4climate.NRW (Hrsg.) 2021).

So können gleich drei Ziele erreicht werden: die Ergänzung der bisherigen Technologien, die Minimierung der mit der Verbrennung zusammenhängenden CO₂-Mengen und die Nutzung des hochwertigen Rezyklats als Kohlenstoffquelle für neue Produkte – alternativ zu fossilen Primärrohstoffen. Recycelte Kunststoffabfälle müssen primär neuen Kunststoffen zugeführt werden. Dabei gilt jedoch auch hier: Etwaige Reststoffe sollten weitergenutzt werden. Einen Überblick zu den verschiedenen Verfahren des chemischen Recyclings ist in einem anderen IN4climate-Diskussionspapier (IN4climate.NRW (Hrsg.) 2020a) dargestellt.

Schließen der Stoffkreisläufe durch vermehrten branchenübergreifenden Einsatz von Reststoffen

Das Recycling des konventionellen **Elektrolyseausbruchs** in der **Aluminiumindustrie** hat Entwicklungsbedarf. Denn die Einführung der inerten Anode und kohlenstofffreien Kathode ist heute noch nicht möglich und die Elektrolysezellen haben sechs bis sieben Jahre Betriebszeit. Forschungsvorhaben haben sich zum Ziel gesetzt, den Elektrolyseausbruch möglichst vollständig zu recyceln. Er könnte dann z. B. als Kohlenstoffquelle in der **Stahl- und Zementindustrie** genutzt und die Fluoride könnten in der Sekundäraluminiumproduktion eingesetzt werden (Fona o. J., Flores et al. 2019, Robshaw et al. 2020).

Um die **Schlackenprodukte** aus dem DR-Prozess und der Sekundärroute der **Stahlbranche** in der **Zementindustrie** als Sekundärrohstoff einsetzen zu können, werden in aktuellen Forschungsaktivitäten Aufbereitungsverfahren für die Elektroofenschlacken entwickelt (Fraunhofer UMSICHT 2021). So könnten die bestehenden Synergien zwischen den beiden Branchen erhalten bleiben.

Zinkhaltige Filterstäube aus der Abgasreinigung der Stahlproduktion werden schon heute als Sekundärrohstoff eingesetzt. Doch auch hier besteht noch weiteres Potenzial, um z. B. Gichtschlamm, Pfannenofenschlacke und Feuerfestausbuch weiter zu nutzen.

Prozessgase der **Stahlproduktion** enthalten unterschiedliche Anteile an Stickstoff, CO₂, CO und H₂. Diese werden bisher im integrierten Hüttenwerk meist thermisch oder zur Stromerzeugung genutzt. Zusätzlich wird untersucht, inwieweit zukünftig eine Abscheidung von CO, H₂ und CO₂ aus dem Hüttengas durchgeführt werden kann, um sie aufgereinigt für die **Chemieindustrie** zur stofflichen Nutzung zur Verfügung zu stellen (Fona 2021). Während Synthesegas aus CO und H₂ schon lange ein fester Bestandteil der Chemieproduktion ist, gilt es, für CO₂ neue Verwertungspfade zu etablieren. Für „Carbon Capture and Utilization“ (CCU) eignen sich weitere Quellen, die auch in Zukunft noch unvermeidbar sein werden. Welche Kohlenstoffquellen das sind und wann eine CO₂-Nutzung angestrebt werden sollte, wird in der IN4climate.NRW-AG Kohlendioxidwirtschaft diskutiert. Diese hat dazu bereits zwei Diskussionspapiere – zu unvermeidbarer CO₂-Entstehung und zur CO₂-Infrastruktur – veröffentlicht, die auf www.in4climate.nrw abrufbar sind.

Klärschlamm kann eine wichtige Quelle für Phosphor werden. Dazu werden zurzeit verschiedene Technologien in **Versuchs- bis Pilotanlagen** weiterentwickelt (RWE 2021, Remondis 2020), u. a. die „Multi-Fuel-Conversion“-Anlage, in der neben dem Phosphor auch Synthesegas als Produkt erhalten wird (RWE 2021). Das Ziel der Circular Economy ist es, die Stoffkreisläufe durch Recycling zu schließen. Doch auch in Zukunft wird die energetische Verwertung von Reststoffen eine wichtige Rolle für die Ausschleusung von Störstoffen aus dem System haben. Hier gilt es, die anfallenden Reststoffe – wie **Müllverbrennungsschlacken und CO₂** – so weit aufzubereiten, dass auch diese den Stoffkreisläufen zurückgeführt werden können. Diese Schlacken enthalten unter anderem Metallrückstände, die als Sekundärrohstoff wieder in der **Grundstoffindustrie** eingesetzt werden können.

Digitale Technologien zur Überwindung von Informationsdefiziten

Die **digitale Transformation** könnte durch ihre Ansätze die Lösung zur Schließung der Informationsdefizite für die Umsetzung der Circular Economy liefern. Denn sie ist in vielerlei Hinsicht vor allem eine Informationsrevolution. Dabei gilt es jedoch, eine Kosten-Nutzen-Abwägung vorzunehmen, da viele Technologien der digitalen Transformation einen großen Energieverbrauch aufweisen und eine geeignete Infrastruktur benötigen. Überlegungen, wie dies geschehen könnte, werden hier beispielhaft erläutert. Eine tiefergehende Betrachtung, welchen Beitrag die Digitalisierung für die Circular Economy in der **Kunststoffindustrie** leisten kann, gibt das Wuppertal Institut (SCI4climate.NRW 2021c).

Digitalisierung in der Circular Economy

Digitale Zwillinge von Produktionsprozessen (sogenannte „cyber physical systems“) führen dazu, dass Informationen über Produkte mindestens durch den gesamten Produktionsprozess erhalten bleiben. Der **digitale Produktpass** beinhaltet demgegenüber alle relevanten Informationen über das Produkt und die verwendeten Materialien über alle Wertschöpfungsstufen hinweg (vom Rohstoff bis zum Recycling). Diese Informationen müssen sich für die Kreislaufwirtschaft über den gesamten Lebenszyklus erstrecken und auch umweltrelevante Informationen wie Materialzusammensetzung oder ökologische Fußabdrücke beinhalten. So werden Informationsasymmetrien sinnvoll reduziert.

Innovative Sensortechnologie erlaubt in der Industrie 4.0 eine Datensammlung und -erzeugung in Echtzeit. Der genaue Ort des Anfalls von Abfällen, seine exakte stoffliche Zusammensetzung usw. können ort- und zeitgenau identifiziert, festgehalten („**Fast Data**“) und an andere Unternehmen weitergegeben werden, die daraufhin ihre Produktionsprozesse planen. Neue Ansätze der Datenanalyse z. B. auf Basis künstlicher Intelligenz („**Big Data**“) können dann Aufschluss über weitere Verwendung, sinnvolle Logistiklösungen etc. liefern und projizieren.

Das Zusammenführen von Angebot und Nachfrage nach Abfällen bzw. Sekundärrohstoffen kann durch internetbasierte Lösungen revolutioniert werden, wie sie heute bereits in der Distribution von Produkten eingesetzt werden. Eine zukünftige **automatisierte Markt- und Logistikplattform** (sozusagen als „Über für Abfall“) kann Such- und Transaktionskosten reduzieren; außerdem können Skaleneffekte leichter erzielt werden, da mehr Klarheit über Materialmengen besteht.

In einem derart intelligenten Gesamtsystem wäre es sogar denkbar, dass sich wiederzuverwertende Produkte ihre Märkte über das „**Internet of Things**“ automatisch „selbst“ erzeugen, indem sie sich aufgrund der Informationen über Zusammensetzung und Einsatzmöglichkeit auf solchen Plattformen selbst vermarkten. Rezyklate sind zum Teil heute schon preiswerter als Primärmaterial, dies könnte so noch gesteigert werden. Rezyklierbarkeit wird dann auch zum technischen Wettbewerbsvorteil.

Block Chain-Anwendungen, auf denen heute bereits z. B. die virtuelle Währung Bitcoin basiert, könnten Informationen anonymisiert und verschlüsselt weitergeben, ohne dass die Konkurrenz Rückschlüsse auf eigene Produktionstechnologien ziehen kann.

3. NOTWENDIGE RAHMENBEDINGUNGEN ZUR WEITEREN SCHLIEßUNG DER STOFFKREISLÄUFE

Die lineare Wegwerfgesellschaft ist auf politischer Ebene akzeptiert. Mit dem **Aktionsplan Kreislaufwirtschaft** der Europäischen Kommission oder dem **Programm Ressourceneffizienz** der Bundesregierung wurde zwar der politische Wille zur Transformation dokumentiert. Dieser wird aber bislang nicht in ausreichender Geschwindigkeit umgesetzt (s. Kapitel. 1.3). Zentral stellt sich daher die Frage, wie das Transformationstempo erhöht werden kann. Zum einen sprechen umweltpolitische Gründe für ein schnelles Handeln. Aber auch wirtschafts- und industriepolitisch ergibt sich – insbesondere mit Blick auf die Circular Economy – die Chance, die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit des Standorts Deutschland und damit auch Hunderttausende von Arbeitsplätzen zu erhalten.

Eine zunehmende Anzahl an Studien, z. B. der Ellen MacArthur Foundation oder der Circular Economy Initiative Deutschland scheint zu belegen, dass eine erfolgreiche Circular Economy tatsächlich zu deutlichen ökonomischen Vorteilen führt (Ellen MacArthur Foundation 2020, Weber und Stuchtey 2019). Allein die Europäische Kommission erwartet von der Umsetzung des Aktionsplans Kreislaufwirtschaft eine erhöhte **Wertschöpfung von 80 Milliarden Euro pro Jahr!** Dadurch wird eines klar: Die sozioökonomischen Vorteile werden sich auf die Länder und Regionen fokussieren, die den Umgestaltungsprozess ihrer Volkswirtschaften am schnellsten vorantreiben – und sich damit im globalen Wettbewerb um Investitionen und Arbeitsplätze am besten positionieren. Der Übergang zur Circular Economy wird teilweise disruptiv. Damit sind Chancen verbunden, aber ebenso das Risiko, die alte Stärke zu verlieren. Dies kann sich ganz konkret im Niedergang klassisch linearer Wirtschaftszweige zeigen.

Das folgende Kapitel stellt die bestehenden Hemmnisse im Status Quo den möglichen Maßnahmen zur weiteren Schließung der Stoffkreisläufe gegenüber.

3.1 Hemmnisse im Status Quo

Wesentliche Herausforderungen der Circular Economy im Hinblick auf das Ziel einer klimaneutralen Wirtschaft ergeben sich insbesondere aufgrund von **veränderten Stoffströmen**, beispielsweise bei der Umstellung auf Wasserstoff in der **Stahlindustrie** (s. Kapitel 2.2). Der Wegfall oder die Veränderungen von Nebenprodukten in der Produktion haben unmittelbaren Einfluss auf Unternehmen, die diese Nebenprodukte in ihren bisherigen Stoffströmen als Input für ihre Prozesse nutzen. Ein wichtiges Beispiel ist in diesem Zusammenhang der Wegfall von Hüttensand als Nebenprodukt der Stahlindustrie. Denn dieser erhöht in der Konsequenz den CO₂-Verbrauch in der **Zementindustrie**, wenn nicht alternative Hauptbestandteile ähnlicher Güte erschlossen werden können. Diese Tatsache verdeutlicht die Wichtigkeit, **sektorübergreifende Kooperationen** weiterhin zu intensivieren und zu fördern. Dies kann realisiert werden, indem ein offener und stetiger Dialog und Austausch zwischen allen beteiligten Akteuren forciert wird. Das Land NRW ermöglicht diesen Austausch u. a. mit der Initiative IN4climate.NRW. Hier erarbeiten VertreterInnen aus Industrie, Wissenschaft und Politik branchenübergreifende Strategien für eine nachhaltige Industrie. Im Folgenden werden die von der AG Circular Economy identifizierten Hemmnisse in den regulatorischen Rahmenbedingungen skizziert.

Geringe Fokussierung der Politikansätze auf die Circular Economy

Die regulatorischen Rahmenbedingungen ermöglichen bislang noch keine umfassende Transformation des Systems, da sie derzeit teilweise noch die Umsetzung von konkreten (beispielsweise quantitativen) Maßnahmen hemmen. So werden häufig Subventionen für die Rohstoff- und Verarbeitungssektoren bereitgestellt, die den Einsatz von Primärrohstoffen begünstigen (OECD 2019). Darüber hinaus fehlen den Handlungsansätzen des **Deutschen Ressourceneffizienzprogramms** spezifizierte Vorgaben bezüglich eines Zieljahres oder einer Zielperiode. Die 39 an die SDGs angelehnten Schlüsselindikatoren in der aktuellen deutschen **Nachhaltigkeitsstrategie** (Bundesregierung 2018) lassen die Bereiche Kreislaufwirtschaft und Abfall praktisch noch außen vor. Die Dialogfassung der neuen deutschen Nachhaltigkeitsstrategie

thematisiert beide Bereiche stärker, führt aber keine ergänzenden Ziele ein. Dies führt weitgehend zu einem System von abfallwirtschaftsorientierter Kreislaufwirtschaft, das auf Technologieentwicklung und -innovationen beschränkt ist. Von ihm gehen nur geringe Anreize zur Abfallvermeidung und Wiederverwendung oder zu zusätzlichen Kreislaufstrategien aus. Zudem setzt es einem weiterwachsenden Abfallaufkommen wenig entgegen.

Keine Anrechnung des chemischen Kunststoffrecyclings in Recyclingquoten

In die Recyclingquoten des Verpackungsgesetzes ist ausdrücklich nur das werkstoffliche Recycling einbezogen. **Chemisches Kunststoffrecycling** kann jedoch als Substitution der energetischen Verwertung und als Ergänzung zum mechanischen Recycling dazu beitragen, den Kohlenstoffkreislauf insgesamt weiter zu schließen und den Bedarf an fossilen Rohstoffen in der chemischen Industrie schrittweise auf null zu reduzieren (UBA 2020).

Fehlende adäquate Förderrichtlinie auf Bundesebene für den Einsatz von Rezyklaten

Es besteht weiterer Forschungsbedarf, um die **Produktqualitäten von Rezyklaten** besser einschätzen und durch entsprechende Normwerte sicherstellen zu können. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der geforderten Rezyklaterhöhungen und -mindestmengen entscheidend.

Feine Gesteinskörnung kleiner zwei Millimeter nicht in Produktnorm

Im konkreten Fall der Normungen sind in manchen Industrien, beispielsweise der **Zementindustrie**, verschiedene **nationale und internationale Industrienormungen** zu beachten, da die entsprechende Normung auf EU-Ebene durch die Kommission derzeit nicht veröffentlicht wird.

Unterschiedliche Standards für Primär- und Sekundärrohstoffe

In der **Baustoffbranche** werden für den Einsatz von Primärrohstoffen als Naturprodukt andere Qualitätsstandards angesetzt als für die Nutzung von Sekundärrohstoffen. Diese Ungleichbehandlung führt zu einer **Verdrängung von Nebenprodukten** aus dem Markt.

Geringe Nachfrage

Die öffentliche Beschaffung von Produkten mit hohem Rezyklatanteil wird mit dem Kreislaufwirtschaftsgesetz geschärft. Aber gesetzliche Verpflichtungen zum Einsatz von Rezyklaten in den Branchen, in denen die Nachfrage nach Sekundärmaterialien fehlt, ist mit der Novelle nicht erfolgt. Dazu gehört beispielsweise ein verpflichtender Rezyklatanteil in bestimmten Produkten zu einem bestimmten Zeitpunkt. Auf der anderen Seite scheitert der übergreifende Einsatz von Rezyklaten an der aktuellen **unzuverlässigen Nachfrage**. Würde sie steigen, würde dies die notwendigen Investitionen in entsprechende Technologien und Geschäftsmodelle (wie beispielsweise private Pfandsysteme für die separate Sammlung einzelner Produktgruppen) rechtfertigen.

Ein weiteres Beispiel aus der **Baubranche** veranschaulicht, dass es bisher **keine ausreichenden Märkte** für Primär- und Sekundärmaterialien gibt. So steht der Einsatz von Materialien, die zur Verfüllung genutzt werden können, in **Konkurrenz zum Recycling**. Da bestehende Auflagen die Betreiber zur Verfüllung und zur Renaturierung von Abbaustätten verpflichten, werden die entsprechenden Abfälle in vielen Fällen zur Verfüllung eingesetzt und nicht dem Recycling zugeführt.

Geringes Angebot von hochwertigen Rezyklaten

In vielen Sektoren mit niedrigen Anteilen recycelter Grundstoffe, wie z. B. dem **Kunststoffsektor**, scheitert die Wettbewerbsfähigkeit zirkulärer Alternativen bislang an mehreren Faktoren: Auf der einen Seite **fehlt das Angebot** an qualitativ hochwertigen Rezyklaten (teilweise aufgrund des Exports erfasster und sortierter Abfälle wie z. B. Schrott). Gleichzeitig ist auch die **Nachfrage limitiert**. Daraus resultiert, dass aktuell

Primärstoffe wie Kunststoff deutlich günstiger sind als deren Rezyklate. So hemmen die etablierten Märkte mit ihrem entsprechenden Preisgefüge für Primär- und Sekundärrohstoffe die **Wettbewerbsfähigkeit hochwertiger Rezyklate**.

Geringe Konsistenz regulatorischer Bestimmungen

Weitere Hemmnisse auf dem Weg zur vollständigen Transformation hin zu einer Circular Economy sind **bestehende Konflikte zwischen unterschiedlichen regulatorischen Bestimmungen**. Hierzu zählen beispielsweise die erhöhten Energieeffizienzanforderungen, aber auch energie- und abfallrechtliche Anforderungen sowie Grenzwerte beim Recycling. Denn diese sind häufig nicht mit der Umstellung der Prozesse auf eine Zirkularität synchronisiert. Dieser Zielkonflikt muss durch eine sinnvolle Priorisierung der Ziele und der zu treffenden Maßnahmen aufgelöst werden, an deren Ende ein eindeutiger Ordnungsrahmen steht.

Die **lineare Wirtschaft** ist bisher auch deshalb so erfolgreich – und damit so schwierig zu überwinden –, weil sie auf ein in sich geschlossenes und damit **konsistentes System an Regulierungen** aufbauen kann, das über Jahrzehnte immer weiter angepasst und optimiert wurde. Daraus ergeben sich deutlich sichtbare Pfadabhängigkeiten, die den Übergang zu einer Circular Economy erschweren. Gleichzeitig verursachen **zirkuläre Geschäftsmodelle** im Vergleich zu den eingespielten Modellen der Wegwerfgesellschaft massive **Transaktionskosten**.

Die exemplarisch genannten Hemmnisse in Bezug auf die vollständige Transformation der Grundstoffindustrie zu einer ressourcenschonenden Circular Economy verdeutlichen die Notwendigkeit von regulatorischen und politischen Rahmenbedingungen. Denn nur sie schaffen die Voraussetzung dafür, dass effiziente und wirtschaftliche Strategien für die Kreislaufführung entwickelt werden können. Es bedarf verlässlicher Maßnahmen, um die notwendigen technologischen Prozesse zu erforschen, funktionierende und wirtschaftliche Märkte für Sekundärmaterialien zu etablieren – und damit Anreize sowie eine langfristige Perspektive für Unternehmen zu schaffen.

3.2 Maßnahmen für den Industriesektor

Kreislaufwirtschaft ist ein politisches Querschnittsthema, das – ähnlich wie der Klimaschutz – einen **integrierten Politikansatz** erfordert. In Deutschland konnten bereits wichtige Grundbausteine gesetzt werden – sowohl im Hinblick auf konkrete Inhalte als auch auf den Prozess einer solchen Politikintegration. Um die Integration und Etablierung einer Kreislaufwirtschaft weiter zu verfolgen, gilt es jedoch, einige Punkte näher zu betrachten: Wo liegen die **zentralen Stellschrauben** für die Circular Economy jenseits der klassischen Umweltpolitik? Was könnten in Zukunft **zentrale Treiber** sein? Hierzu sollen im Folgenden erste Ansätze und Eckpunkte – sowohl auf nationaler als auch mit Bezug zur EU-Ebene – benannt werden.

3.2.1 Wettbewerbsfähigkeit durch regulatorische Rahmenbedingungen steigern

Anpassung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes

Zur weiteren Schließung der Stoffkreisläufe in der **Grundstoffindustrie** ist eine wettbewerbsfähige Gestaltung zirkulärer Grundstoffe entscheidend, um eine Steigerung der Nachfrage erzielen zu können. Dazu müssen zunächst die europäische Abfallrahmenrichtlinie und im Nachgang das deutsche Kreislaufwirtschaftsgesetz angepasst werden. Wichtig ist, dass es die gesamte Sekundärrohstoffnutzung unterstützt. Hierzu sollte die aktuelle **Abgrenzung von Nebenerzeugnissen zu Rezyklaten überdacht** werden – stoffliche Verwertung und Rezyklierung sollten im Sinne der Rohstoffeffizienz nicht gegeneinander ausgespielt werden. Zu diesem Zweck ist eine **Harmonisierung von Abfall- und Stoffrecht** (Abfallrecht/REACH) erforderlich. Die Vorgaben für die stofflichen Analysen und die Grenzen für die Zusammensetzung von Primär- und Sekundärrohstoffen müssen aneinander angeglichen werden. Primärrohstoffe dürfen nicht bevorzugt behandelt werden, indem sie geringere Anforderungen als Sekundärrohstoffe erfüllen müssen.

Anrechnung bei Recyclingquoten zur Etablierung von Recyclingtechnologien

Das **chemische Recycling** kann an Bedeutung gewinnen – sowohl für langlebige als auch für kurzlebige Produkte wie Verpackungen, die trotz konsequentem Produktdesign nicht werkstofflich recycelt werden können. Der **Strommix** ist jedoch ausschlaggebend für die CO₂-Bilanz, da die Verfahren energieintensiv sind. Für den genannten Anwendungsbereich sollte im Verpackungsgesetz schon jetzt geprüft werden, wie neben der Quote für ein werkstoffliches Recycling auch die Verwertung durch ein chemisches Recycling ausdrücklich berücksichtigt werden kann.

Mindestrezyklatquoten als Treiber der Nachfrage

Die **Europäische Kommission** setzt in der Umsetzung ihres Aktionsplans Kreislaufwirtschaft zunehmend auf **Mindestrezyklatquoten**. Erkennbar ist dies z. B. bereits in der Batterierichtlinie, im Kunststoffbereich sowie in der Diskussion um die zu überarbeitende Altautorichtlinie oder in der Strategie für den **Gebäudesektor**. Bei der Gestaltung solcher Quotensysteme sollte nicht nur der administrative Aufwand berücksichtigt werden. Es ist auch entscheidend, dass sie nicht zum Abzug von Rezyklaten aus einem Sektor führen, um in anderen Bereichen zur Quotenerfüllung eingesetzt zu werden. Ein negatives Beispiel wäre in diesem Zusammenhang, dass bei Einführung einer Quote für Kunststoffe im **Automobilsektor** am Ende weniger Rezyklat im **Verpackungssektor** eingesetzt würde. Denn **Engpässe** könnten zu steigenden Kosten und somit zu einer sinkenden Attraktivität von Sekundärrohstoffen führen.

Bei solchen Quoten bleibt jedoch zu beachten, dass sie die **Gefahr der Pauschalisierung** beinhalten können. Eine Anwendung auf Materialien wie Stahl ist beispielsweise nicht sinnvoll. Hier ist bereits ein **etablierter Schrottmarkt** vorhanden und es müssen keine weiteren Anreize für den Rezyklateinsatz geschaffen werden. Vielmehr steht sogar jetzt schon nicht ausreichend Recyclingmaterial zur Verfügung, um die Nachfrage decken zu können (z. B. bei Stahl, Aluminium und mineralischen Baustoffen).

In diesem Zusammenhang ist jedoch auch der Export wertvoller (Sekundär-)Ressourcen zu beachten. Hier braucht es eine konkrete Regulatorik, um beispielsweise die **Mengen und Qualitäten der im- und exportierten Ressourcen in einem Gleichgewicht** zu halten. Geschäftsmodellinnovationen – wie z. B.

Mindestrezyklatquoten

Für die Etablierung und den Hochlauf von noch nicht funktionierenden Recyclingmärkten könnten **Mindestrezyklatquoten** auch für die **Grundstoffindustrie** einen hilfreichen Ansatz bilden: Jedes auf den Markt gebrachte Produkt müsste dann einen spezifischen Anteil recycelter Materialien beinhalten. Dabei wäre im Einzelnen zu definieren, welche Anforderungen z. B. an die Quelle dieses Materials gestellt werden ("Post Consumer Waste" oder „Pre Consumer Waste“). Solche Mindestrezyklatquoten müssen nicht notwendigerweise gesetzlich geregelt, sondern könnten auch über **freiwillige Selbstverpflichtungen** einzelner Branchen umgesetzt werden. Allerdings sollte dann möglichst auch die **Grundstoffindustrie mit in die Entwicklung und Umsetzung einbezogen** werden. Auch hier wäre dann zu klären, wie die Einhaltung solcher Quoten konkret überprüft würde (z. B. über geeignete Stichprobennahmen) und wie Unternehmen sanktioniert würden, die sich als „free rider“ ihren Verpflichtungen entziehen.

Rezyklat- und Substitutionsquoten: Spezifische Anforderungen an die „Chain of Custody“

Der **Nachweis von Rezyklatanteilen** kann speziell für die Grundstoffindustrie mit besonderen Herausforderungen verbunden sein. In vielen Prozessen werden bereits heute standardmäßig sowohl primäre als auch sekundäre Ausgangsstoffe verwendet und anschließend mit einer Vielzahl von Zusatzstoffen aufbereitet. Von daher ist der finale Verbleib einer einzelnen Tonne recycelter Materials kaum nachvollziehbar, gleichzeitig entspricht aber die Menge des sekundären Inputs auch der Menge des am Ende zur Verfügung gestellten Sekundärrohstoffs. U.a. die Ellen MacArthur Foundation hat daher einen sogenannten **„mass balance approach“** vorgestellt, mit dem auch für die Grundstoffindustrie Rezyklatgehalte einerseits eindeutig, andererseits mit vertretbarem Aufwand dargestellt werden können (Ellen MacArthur Foundation 2020).

In diesem Zusammenhang fordert die **Ressourcenkommission vom Umweltbundesamt (KRU)** eine **Substitutionsquote**. Diese „definiert das Verhältnis von eingesetzten Sekundärrohstoffen zum insgesamt genutzten Materialaufwand“. Konkret würde dabei die **Menge der eingesetzten Sekundärrohstoffe gemessen** werden, um somit zu evaluieren, welcher Anteil an Primärrohstoffen ersetzt bzw. eingespart wird. Relevant wäre an dieser Stelle ebenfalls die Berücksichtigung der Qualität des Recyclings, da diese maßgeblich über den möglichen Austausch von Primärrohstoffen entscheidet. Eine solche Quote könnte volkswirtschaftlich dazu beitragen die wirtschaftlichen und ökologischen Beiträge der Circular Economy ganzheitlich zu bewerten. (KRU 2019)

Damit eng verbunden sind jedoch auch Fragen der konkreten Anforderungen beim Endproduktehersteller, ob die Quoten beispielsweise auf Ebene des Gesamtunternehmens, einzelner Produktgruppen oder für jedes einzelne Produkt nachgewiesen werden müssen. Langfristig sieht die Ressourcenkommission eine Ausweitung der Substitutionsquote auf die Produktebene als sinnvoll an, um somit klar zu differenzieren, wie viel rezykliertes Material in einem Produkt enthalten ist. (ebd.)

neue Eigentums- und Besitzstrukturen von Ressourcen – könnten dafür sorgen, dass diese entlang der Wertschöpfungskette in einem Kreislauf geführt und nicht in andere Systeme exportiert werden.

Darüber hinaus können die CO₂-Emissionen aus dem Transport, die durch den Austausch der Materialströme entstehen, in deutlichem Widerspruch zum Ressourcennutzen stehen (Zielkonflikt). Ähnlich verhält es sich bei einer starken Erhöhung der Rezyklatquote. Manche Stoffströme müssen für eine erhöhte Recyclingquote sehr energieintensiv aufbereitet werden. Dadurch entstehen wiederum – in Abhängigkeit des Strommixes – Treibhausgas (THG)-Emissionen. Daher ist für die CO₂-Bilanz der Circular Economy essenziell, die **Energieversorgung über Erneuerbare Energien** zu sichern und den Transportsektor zu dekarbonisieren. Eine **verstärkte Lebenszyklusanalyse** (LCA) wäre an dieser Stelle notwendig, um den **ökologischen Rucksack eines Produktes bestimmen** und verringern zu können.

Standardisierungen zur Ermöglichung der CE und Erhöhung der Nachfrage

Ein zentraler Ansatz ist die weitere **Standardisierung** von Vorgaben zur Kreislauffähigkeit. Hierzu laufen sowohl auf **nationaler** (z. B. beim DIN) als auch auf **EU-Ebene** verschiedene Prozesse, die in Zukunft aufwändige Abstimmungen, z. B. zu Begrifflichkeiten und Qualitätsdefinitionen, vermeiden sollen. Auf europäischer Ebene sind dazu im Rahmen der **Ökodesign-Richtlinie** vielfältige Prozesse angestoßen worden. Sie sollen den bisherigen Fokus auf Energieverbräuche von Produkten ausweiten und stärker Aspekte der Materialeffizienz und Kreislauffähigkeit integrieren. Diese Richtlinie ist dabei jedoch von konkreten Standardisierungen zu unterscheiden, da sie Produktentwicklern vielfältigere Gestaltungsmöglichkeiten bieten. Darüber hinaus zielt die im Juni 2021 beschlossene **Ersatzbaustoffverordnung** darauf ab, die Wiederverwendung mineralischer Abfälle in technischen Bauwerken signifikant zu erhöhen. Ganz konkret wären beispielsweise (Produkt-)Normen hilfreich, um die Markteinführung von klinkereffizientem Zement oder R-Beton in der **Zementbranche** zu unterstützen. Für Kunden in der weiterverarbeitenden Industrie hätten Normen beispielsweise den Vorteil, dass die Rezyklate besser verglichen werden können. Folglich könnte der mit ihrem Einsatz verbundene CO₂-Produktfußabdruck besser abgeschätzt werden.

Speziell für die **Baustoffindustrie** werden **neue Produktnormen** benötigt, die auf dem Fortschritt z. B. der Aufbereitungstechnik oder der Betonzusatzmitteltechnologie basieren. Gleiches gilt branchenübergreifend für die **umweltrechtlichen Bestimmungen und Grenzwerte** zum Recycling bzw. zur Verwendung von Reststoffen in anderen Branchen. Sie berücksichtigen teilweise nicht den aktuellen Stand der Technik von Aufbereitungsverfahren und behindern so die Kreislaufschließung. Ergänzend sind **Positivlisten** für Stoffe, die als Zementhauptbestandteil zum Einsatz kommen können, hilfreich. In NRW gibt es sie z. B. für Ersatzbrennstoffe (MULNV NRW (Hrsg.) 2005). Sowohl Normen als auch Positivlisten können das Vertrauen in die Qualität der Produkte stärken und so die Nachfrage an Recyclingprodukten steigern.

Öffentliche Beschaffung als Treiber der Nachfrage

Daneben sollte aber auch insbesondere die **öffentliche Hand** bei ihren Beschaffungsausgaben verstärkt auf den **Einsatz von Rezyklaten** achten. Hier sind mit dem neuen Kreislaufwirtschaftsgesetz entsprechende Grundlagen gelegt worden, die in vielen Bereichen aber noch weiter konkretisiert werden müssten, damit sie in der Praxis tatsächliche Relevanz erlangen (z. B. im Gebäudebereich).

Informationsbereitstellung durch Digitalisierung

Der Übergang zur Circular Economy wird es zwingend erfordern, **Stoff- und Informationsflüsse** – von der **Grundstoffindustrie** bis hin zum Recyclingprozess – stärker zu koordinieren. Informationen über Mengen und insbesondere über Qualitäten von Produkten und den in ihnen enthaltenen Rohstoffen müssen erhoben werden und erhalten bleiben. Sie müssen ebenso im Kreislauf mitgeführt werden, denn nur so wird Abfall zu einer verarbeitbaren Ressource. Eine Schlüsselherausforderung ist dabei, die Masse der Informationen (über die stoffliche Zusammensetzung jedes einzelnen Produkts, seine Nutzungsmuster, seinen Verbleib im Abfallsystem etc.) effektiv zu erzeugen, zu sammeln, zu verarbeiten und wieder zur Verfügung zu stellen. All dies ist notwendig, um funktionierende Märkte und Kreisläufe zu etablieren. So werden **effiziente, markbasierte Lösungen statt reiner Regulation** möglich.

Die **SCIP-Datenbank** der EU beispielsweise liefert Informationen über ökologisch bedenkliche Stoffe – in Erzeugnissen selbst oder in komplexen Objekten (Produkten) gemäß der Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EC). Seit Januar 2021 sind Anbieter von Erzeugnissen verpflichtet, diese Informationen zu übermitteln.

Die Datenbank liefert somit eine essenzielle Informationsbasis für das Recycling von Produkten. Im Anschluss an die Bewährung in der Praxis könnte sie weiter ausgebaut werden, um auch Informationen unbedenklicher Stoffe zu sammeln (z. B. Legierungsanteile) und für die Kreislaufwirtschaft zur Verfügung zu stellen. Diese können dann Sammlung, Trennung und Recycling der verschiedenen Materialien vereinfachen.

Gleichzeitig erfordern all diese technologischen Ansätze (s. Kapitel 2.3) und der damit verbundene Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien erhebliche Mengen an Energie und Rohstoffen. Schon heute gehen zirka vier Prozent aller Treibhausgasemissionen auf das Konto der **Digitalisierung** – mit enormen Steigerungsraten (BMU o. J.). Diese deutlich sichtbare **Umweltrelevanz** steht mit dem stetig wachsenden Sektor der **Digitalwirtschaft** in Zusammenhang. Denn dieser umfasst mittlerweile eigene Produkte, Infrastrukturen und Wirtschaftszweige. Aus diesem Grund ist es gerade für die Digitalbranche essenziell, eigene **umweltpolitische Strategien und Instrumente zur Dekarbonisierung und Ressourceneffizienz** zu entwickeln (Ramesohl und Berg 2019).

Die Digitalisierung der Circular Economy ist damit kein Selbstzweck. Vielmehr erfordert sie für tatsächliche Beiträge zum Klima- und Ressourcenschutz entsprechende Rahmenbedingungen: „Damit die Digitalisierung nicht zum Brandbeschleuniger ökologischer Zerstörung wird, braucht es **Leitplanken**. Gelingt es, die **Digitalisierung nachhaltig zu gestalten**, kann sie den sozial-ökologischen Umbau entscheidend unterstützen.“ (BMU o. J.). Dabei handelt es sich auf der einen Seite um rechtliche Rahmenbedingungen. Auf der anderen Seite werden grundlegende Infrastrukturen benötigt, die eine übergreifende Erfassung, Sammlung, Übertragung und Auswertung der Daten ermöglichen. Mit der **umweltpolitischen Digitalagenda** hat das BMU einen ersten Aufschlag für die damit konkret verbundenen Aufgaben geliefert. Viele davon, wie z. B. ein an Nachhaltigkeitskriterien ausgerichteter **digitaler Produktpass**, stehen jedoch noch am Anfang des Entwicklungsprozesses.

3.2.2 Innovationspolitik und Forschung/Innovationen in die Umsetzung bringen

Die Transformation hin zu einer Kreislaufwirtschaft ist auch eine **innovationspolitische Herausforderung**. Ein zentrales Ziel ist dabei, neues Wissen zu generieren und umzusetzen – vor allem mit Blick auf die Funktionsweise von Systemen, möglichen Zielen und auf die Veränderung bestehender linearer Systeme (Schneidewind 2018). Betrachtet man jedoch die Innovationspolitik zum Thema Kreislaufwirtschaft, so kommt das Fraunhofer ISI im Rahmen einer vom Umweltbundesamt beauftragten Studie zu der Einschätzung, „dass sich die Transformation in Richtung Circular Economy in Deutschland noch in einer frühen Entwicklungsphase mit geringer Dynamik befindet“ (Gandenberger 2021, S. 35).

Technologien und Konzepte

Ein zentraler Ansatzpunkt ist die **Forschungsförderung** für technologie- und materialoffene Konzepte – auch im Kontext der **Grundstoffindustrie**. So besteht beispielsweise bei der Umsetzung und Etablierung des chemischen Recyclings sowie bei der Einführung der inerten Anode noch Entwicklungsbedarf in der Industrie (s. Kapitel 2.1).

In nationalen Programmen zur Forschungsförderung gerät das Thema Circular Economy als integrierter Ansatz in den Fokus. Das beweisen erste Beispiele aus den innovativeren Formen der Forschung. Im Kontext des Rahmenprogramms **Forschung für Nachhaltigkeit** hat das **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)** beispielsweise im **Förderaufruf** „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Kunststoffrecyclingtechnologien (KuRT)“ explizit nicht nur die **interdisziplinäre Forschung und die Einbindung von Praxispartnern** gefordert, sondern auch die **Abdeckung ganzer Wertschöpfungsketten** als

Fördervoraussetzung benannt. Im Gegensatz dazu sind die klassischen Förderinstrumente – beispielsweise der Deutschen Forschungsgemeinschaft – in der Regel noch immer sehr disziplinar ausgerichtet. Auch in der **universitären Ausbildung** sind integrierte Studiengänge zum Thema Circular Economy bisher kaum etabliert.

Dies schlägt sich zunehmend auch in den **rückläufigen Patentanmeldungen** deutscher Unternehmen zur Kreislaufwirtschaft nieder. Mittelbar ergeben sich damit auch für die Grundstoffindustrie neue strategische Herausforderungen, wenn zentrale Technologien und damit auch Industriestandards in Zukunft verstärkt nicht mehr in der EU entwickelt und gesetzt werden.

Zusätzlich sind zur Entwicklung und Einführung neuer Technologien und Prozesse verstärkte **LCA-Betrachtungen** notwendig. Um die LCA transparent und vergleichbar durchführen zu können, sollten Fördermittel zur Finanzierung bereitgestellt werden.

Die Bereitschaft des **BMW**, ausgewählte Einzelprojekte deutscher Unternehmen im Rahmen eines „Important Project of Common European Interest“ (IPCEI) „Low Carbon Emissions Industry“ (LCI) zu fördern und die Chance zu nutzen, europäische Wertschöpfungsketten über das Beihilferecht hinaus zu unterstützen, wird begrüßt. Die Circular Economy ist als Themenfeld in diesem IPCEI unbedingt zu berücksichtigen. Schon jetzt sollten sowohl auf Bundes- als auch Landesebene Haushaltsmittel zur Finanzierung der IPCEI-LCI-Projekte eingeplant werden.

Deutlich wird insgesamt, dass eine Forschungsförderung technologie- und materialoffen sein sollte, um möglichst vielseitige zirkuläre Lösungen zu generieren. Darüber hinaus sollten jedoch auch spezifische Technologien der Circular Economy gezielt gefördert und in der Förderrichtlinie „Dekarbonisierung der Industrie“ des Bundesumweltministeriums berücksichtigt werden. Die Bedingung dafür sollte sein, dass diese deutlich höhere THG-Reduktionen versprechen als die bestehenden Produktionsprozesse und Wertschöpfungsketten (analog zu einer „Merit Order“ zur THG-Vermeidung).

3.2.3 Circular Economy in der Industrie- und Wirtschaftspolitik verankern

Wie dargestellt, ist das Thema Circular Economy auf **europäischer Ebene** zentraler Bestandteil einer industriepolitischen Agenda: Durch die Transformation von der klassischen linearen zur zirkulären Wirtschaft wird das Ziel verfolgt, die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Industrie auch in Zukunft zu behaupten. Hier steht die **Versorgung mit Grundstoffen** zentral im Fokus. Angesichts hoher Löhne sowie Sozial- und Umweltstandards sind mittel- und langfristig Effizienzvorteile notwendig, um im globalisierten Wettbewerb mithalten zu können. Es wird das Risiko gesehen, dass diese bestehenden Effizienzvorteile in der linearen Produktion kaum gehalten werden können. Aus dieser Sicht wird die **Wettbewerbsfähigkeit des Industriestandorts Europa im globalen Wettbewerb nur als Circular Economy zu sichern** sein. Denn hier können zum einen direkte Kosteneinsparungen durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen erzielt werden. Zum anderen können auch indirekte Effekte zum Tragen kommen. Dazu gehören die Etablierung neuer Geschäftsmodelle, die erhöhte Innovationstätigkeit durch neue Kooperationsformen und der verbesserte Zugang zu Kapitalmärkten, auf denen Beiträge zum Klima- und Ressourcenschutz zunehmend stärker gewichtet werden. Die Circular Economy muss so gestaltet und gefördert werden, um letztendlich ein **selbsttragendes Geschäftsmodell** zu etablieren.

Dabei sollten **Anreizsysteme** für Unternehmen entwickelt werden, damit diese in ihren Produktionsprozessen – wo technisch möglich – verstärkt auf Sekundärrohstoffe setzen. Dies könnte beispielsweise durch das Absenken der EEG-Umlage oder durch finanzielle Anreize bei der Erhöhung der Recyclingfähigkeit von Produkten (analog zu den „eco-modulated fees“ in Systemen erweiterter Herstellerverantwortung) umgesetzt werden. Bei einigen Grundstoffen wie Metallen bilden sich die Preise beispielsweise an internationalen Finanzmärkten (z. B. LME London). Die Preise für Schrotte orientieren sich an diesen Preisen. Allerdings werden bei einem höherem Verunreinigungsgrad auch die Kosten für einen

Aufbereitungsaufwand aufgeschlagen, um eine vergleichbare Qualität wie bei den Primärmaterialien sicherzustellen (z. B. Schmelzebehandlung, erhöhtes Krätzeaufkommen und damit verbundene Behandlungskosten). Rein wirtschaftlich betrachtet kann also der Einsatz von Primärmaterial vorteilhafter sein. Teilweise kann er, aufgrund strenger Analysevorgaben, zurzeit auch gar nicht umgangen werden. Da Recyclingmetalle jedoch dazu beitragen, Ressourcen effizient zu nutzen und die Stoffkreisläufe weiter zu schließen, müssen konkrete Anreize für Unternehmen ausgearbeitet werden, um diese **teilweise geringere Wirtschaftlichkeit von Recyclingmaterial auszugleichen** und den Einsatz im Rahmen der technischen Möglichkeiten zu erhöhen.

Die Circular Economy kann nicht nur zur Ressourcenschonung, sondern auch maßgeblich zum Klimaschutz beitragen. Dieses Potenzial kann jedoch nur dann voll ausgeschöpft werden, wenn sowohl die Recycling- und Produktionsprozesse als auch die digitalen Anwendungen und die Logistik auf **Erneuerbaren Energien** basieren. Hierfür muss die Politik auf Bundes- und Landesebene sowohl den Ausbau in Deutschland als auch die Importe von Strom und strombasierten Energieträgern beschleunigen. Um die bestehenden Ausbauziele bei tendenziell steigendem Strombedarf zu erreichen und die weiteren nationalen Potenziale zum Ausbau Erneuerbarer Energien zu erschließen, müssen Bund und Länder die **starren Ausbaugrenzen lockern** und das **Repowering vereinfachen** (IN4climate.NRW (Hrsg.) 2020b).

Ähnlich wie bei der zuvor beschriebenen Innovationspolitik gilt es, den Zielkonflikt zwischen zirkulärer Industrie- und Wirtschaftspolitik und tatsächlich eingesparten Ressourcen oder Emissionen zu beachten (s. Kapitel 3.2.2).

3.2.4 Notwendigkeit eines „Policy Mixes“ entlang der Wertschöpfungskette

Die Diskussion der verschiedenen Hemmnisse und Maßnahmen zeigt deutlich, dass kein Einzelinstrument allein den Übergang zur Circular Economy erzielen wird. Ein derart **komplexer Transformationsprozess** erfordert ein koordiniertes Vorgehen aus unterschiedlichen Perspektiven. Die hier genannten Handlungsfelder sind dabei mit Sicherheit nicht abschließend und könnten noch weiter ergänzt werden. Auffällig ist bei der Betrachtung vor allem der gegenwärtige Mix aus unterschiedlichen Instrumententypen. Sie reichen von eher informatorischen Instrumenten bis hin zu stringenter Ordnungspolitik und klaren marktbasierten Anreizen. Insgesamt scheint die beobachtbare Geschwindigkeit dieses Transformationsprozesses darauf hinzuweisen, dass **rein freiwillige Maßnahmen schnell an ihre Grenzen stoßen** und die verbindlichen Vorgaben noch immer stark auf klassische abfallrechtliche Regelungen fokussiert sind.

Grundsätzlich ist völlig klar, dass sich der weitere Aufbau einer Circular Economy nicht allein durch Umweltpolitik erreichen lassen wird. Circular Economy ist ein Querschnittsthema, das für eine erfolgreiche Umsetzung unter anderem in der Forschungs- oder Industriepolitik verankert werden muss. Ein in vielen Bereichen erfolgreiches Beispiel wäre hier die Klimaschutzpolitik, die ganz neue Prozesse und institutionelle Regelungen hervorgebracht hat. **Unglücklicherweise sind Circular Economy und Klimaschutz in Deutschland aber bisher noch weitestgehend getrennte Diskurse** – trotz aller inhaltlichen Schnittstellen und möglicher Lern- und Synergieeffekte. Gefragt sind damit **innovative Ansätze**, um das Thema Circular Economy in weiteren relevanten Politikfeldern stärker als bisher zu verankern.

Für einen erfolgreichen Policy Mix wird es zudem auf eine **verstärkte Konsistenz der einzelnen Maßnahmen** ankommen. An vielen Stellen werden mögliche Synergien zwischen einzelnen Instrumenten noch nicht ausreichend realisiert. Gleichzeitig gibt es noch immer widersprüchliche Regelungen beziehungsweise verschiedene Bereiche, in denen die übergeordneten Zielstellungen noch unklar bleiben. Wirtschafts-, Industrie- und Forschungspolitik müssen daher diesen Prozess der radikalen Umgestaltung von Produktions- und Konsumstrukturen nicht nur wohlwollend flankieren. Die Integration dieser Themenfelder wird eine Schlüsselherausforderung für eine schnell und – mit Blick auf sozialpolitische Verteilungsfragen – gerechte Umsetzung und allseitige Akzeptanz der Circular Economy sein.

Kurzfristig angepasst werden muss dabei sowohl die **Unterstützung von F&E** als auch die **Umsetzung durch Förderprogramme in der Industrie**. Die in diesem Papier aufgezeigten regulatorischen Maßnahmen sollen vor allem dem Markthochlauf von Circular-Economy-Lösungen dienen. Sie sollten daher kurzfristig umgesetzt werden. Mittel- bis Langfristig muss sich jedoch ein **selbsttragender Markt** entwickeln.

Politik, Industrie und Wissenschaft stehen vor der gemeinsamen Aufgabe, Konzepte für die Etablierung eines selbsttragenden Marktes für die Circular Economy zu erarbeiten und umzusetzen.

Zusammenfassung der bestehenden Hemmnisse, Ziele und möglichen Maßnahmen für die Etablierung einer Circular Economy

Hemmnisse

...im Bereich der regulatorischen Rahmenbedingungen

- geringe Fokussierung der Politikansätze auf die CE
- keine Anrechnung in Recyclingquoten
- fehlende adäquate Förderrichtlinie für Technologieentwicklung
- unterschiedliche Normungen
- Standards für Primär- und Sekundärrohstoffe
- geringe Konsistenz regulatorischer Bestimmungen

...im Bereich der Stoffströme und Technologien

- geringe Nachfrage nach Rezyklaten
- geringes Angebot hochwertiger Rezyklate
- veränderte Stoffströme

Ziele

- Wettbewerbsfähigkeit durch regulatorische Rahmenbedingungen steigern
- Innovationen in die Umsetzung bringen
- CE in der Industrie- und Wirtschaftspolitik verankern

Maßnahmen

- Anpassung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes
- Anrechnung des chemischen Recyclings bei Recyclingquoten
- Mindestrezyklatquoten als Treiber der Nachfrage für bestimmte Stoffe
- Standardisierungen
- öffentliche Beschaffung als Treiber der Nachfrage
- Informationsbereitstellung durch Digitalisierung
- Forschungsförderung für technologie- und materialoffene Konzepte
- Anreizsysteme für Sekundärrohstoffe
- konsistenter Policy Mix und Nutzung von Synergieeffekten

LITERATUR

- Aluminium Deutschland e. V. o. J.: Recycling. In: aluinfo. Online unter: <http://www.aluinfo.de/recycling.html> (abgerufen am 22. Juli 2021).
- bbs 2019: Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland. Berlin: Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V. (Hrsg.). Online unter: https://www.baustoffindustrie.de/fileadmin/user_upload/bbs/Dateien/Downloadarchiv/Rohstoffe/Rohstoffstudie_2019.pdf.
- BGR 2019: Deutschland - Rohstoffsituation 2018. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Online unter: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/min_rohstoffe_node.html (abgerufen am 22. Juli 2021).
- BGR 2020: Deutschland - Rohstoffsituation 2019. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Online unter: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/min_rohstoffe_node.html (abgerufen am 22. Juli 2021).
- BMJV 2012: Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 9. Juni 2021 (BGBl. I S. 1699) geändert worden ist. Online unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/BJNR021210012.html> (abgerufen am 19. Juli 2021).
- BMU 2020: Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Online unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Ressourceneffizienz/progress_iii_programm_bf.pdf.
- BMU o. J.: Umweltpolitische Digitalagenda. In: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Online unter: <https://www.bmu.de/digitalagenda> (abgerufen am 23. Juli 2021).
- BMU (Hrsg.) 2013: Abfallvermeidungsprogramm des Bundes unter Beteiligung der Länder. Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Online unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/abfallvermeidungsprogramm_bf.pdf.
- BMWi 2019a: Rohstoffstrategie der Bundesregierung - Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffen. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Online unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/rohstoffstrategie-der-bundesregierung.pdf?__blob=publicationFile&v=4.
- BMWi 2019b: Industriestrategie 2030 - Leitlinien für eine deutsche und europäische Industriepolitik. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Online unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/industriestrategie-2030.pdf?__blob=publicationFile&v=20.
- Bundesregierung 2018: Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie - Aktualisierung 2018. Berlin. Online unter: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975292/1559082/a9795692a-667605f652981aa9b6cab51/deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-aktualisierung-2018-download-bpa-data.pdf>.
- BV Glas 2014: Stellungnahme zum BMUB-Entwurf des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRess) II. Düsseldorf: Bundesverband Glasindustrie e.V.
- bvse o. J.: Altpapierqualität – eine Herausforderung für die gesamte Altpapierkette. In: Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung. Online unter: <https://www.bvse.de/papierrecycling-infos/pressemitteilungen/407-altpapierqualitaet-eine-herausforderung-und-ihre-kontrolle-2.html> (abgerufen am 22. Juli 2021).

- Conversio 2020: Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019. Conversio Market & Strategy GmbH. Online unter: https://www.conversio-gmbh.com/res/News_Media/2020/Kurzfassung_Stoffstrombild_2019.pdf.
- Covestro o. J.: CO₂ as a new raw material – becoming a jack of all trades. Online unter: <https://www.covestro.com/en/sustainability/flagship-solutions/co2-as-a-raw-material> (abgerufen am 30. Juli 2021).
- DAfStb 2010: DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Online unter: <https://www.beuth.de/de/technische-regel/dafstb-beton-rezyklierte-gesteinskoernung/139271550> (abgerufen am 23. Juli 2021).
- Ellen MacArthur Foundation 2020: Enabling a circular economy for chemicals with the mass balance approach. Online unter: <https://www.iscc-system.org/wp-content/uploads/2019/06/Mass-Balance-White-Paper.pdf>.
- ELYSIS 2021: ELYSIS selects Alma smelter for commercial size 450 kA inert anode prototype cells. Online unter: <https://elysis.com/en/elysis-selects-alma-smelter-for-commercial-size-450-ka-inert-anode-prototype-cells> (abgerufen am 22. Juli 2021).
- EU 2008: Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien.
- Europäische Kommission 2020: Änderung unserer Produktions- und Verbrauchsmuster: Neuer Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft ebnet Weg zu klimaneutraler und wettbewerbsfähiger Wirtschaft mit mündigen Verbrauchern. Online unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN> (abgerufen am 4. November 2021).
- eurostat 2021a: Waste statistics. Online unter: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics (abgerufen am 27. Juli 2021).
- eurostat 2021b: Circular material use rate. Online unter: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg_12_41/default/table?lang=en (abgerufen am 6. Oktober 2021).
- eurostat o. J.: Kreislaufwirtschaft. Online unter: <https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/circular-economy> (abgerufen am 30. Juli 2021).
- Flores, Ismael Vemdrume et al. 2019: Evaluation of spent pot lining (SPL) as an alternative carbonaceous material in ironmaking processes. In: Journal of Materials Research and Technology 8 (1), S. 33–40.
- Fona 2021: Carbon2Chem. In: Forschung für Nachhaltigkeit. Online unter: <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/carbon2chem.php> (abgerufen am 23. Juli 2021).
- Fona o. J.: Integration des Elektrolyseausbruchs der Primäraluminium-Gewinnung in die Aluminiumrecycling-Technologie (IEPALT). Forschung für Nachhaltigkeit. Online unter: https://www.fona.de/medien/pdf/Projektbeschreibung_Brasilien_IEPALT_bf.pdf?m=1558345788&.
- Fraunhofer UMSICHT 2021: Verbundprojekt SaveCO₂ - Neuartige Schlacken aus der Stahlindustrie als Ressource nutzbar machen. In: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik. Online unter: <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2021/SaveCO2.html> (abgerufen am 23. Juli 2021).

- Gandenberger, Carsten 2021: Innovationen für die Circular Economy - Aktueller Stand und Perspektiven. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (Hrsg.). Umwelt, Innovation, Beschäftigung 01/2021. Online unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021_01_11_uib_01-2021_innovationen_circular_economy.pdf.
- Gerdes, Thorsten; Zimmermann, Harald 2020: Glasproduktion ohne CO₂-Emissionen: Eine Utopie? Vortrag vom 2. Dezember 2020 auf dem 1. Fachforum „Glas“.
- Hiebel, Markus; Nühlen, Jochen 2016: Technische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Faktoren von Stahlschrott (Zukunft Stahlschrott). Onlinefassung der Kurzstudie im Auftrag der Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. (BDSV). Oberhausen: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT. Online unter: https://www.bdsv.org/fileadmin/service/publikationen/Studie_Fraunhofer_Umsicht.pdf.
- Hydro 2021a: Annual Report 2020. Oslo. Online unter: <https://www.hydro.com/globalassets/download-center/investor-downloads/ar20/annual-report-2020-new.pdf> (abgerufen am 12. August 2021).
- Hydro 2021b: Hydro auf einen Blick. Online unter: <https://www.hydro.com/de-DE/medien/hydro-auf-einen-blick/> (abgerufen am 22. Juli 2021).
- Hydro 2021c: Environment. Online unter: <https://www.hydro.com/en/sustainability/environment/environment/> (abgerufen am 22. Juli 2021).
- IAI 2018: Aluminium for Future Generations – Raw Materials. In: The International Aluminium Institute. Online unter: <https://primary.world-aluminium.org/aluminium-facts/raw-materials/> (abgerufen am 22. Juli 2021).
- IN4climate.NRW (Hrsg.) 2020a: Chemisches Kunststoffrecycling – Potenziale und Entwicklungsperspektiven. Ein Beitrag zur Defossilisierung der chemischen und kunststoffverarbeitenden Industrie in NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy. Gelsenkirchen. Online unter: https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Nachrichten/2020/Diskussionspapier_Chemisches_Kunststoffrecycling/in4climatenrw-diskussionspapier-chemisches-kunststoffrecycling-web.pdf.
- IN4climate.NRW (Hrsg.) 2020b: Industriezukunft konsequent gestalten: Ausbau Erneuerbarer Energien bei wettbewerbsfähigen Strompreisen als wichtiger Faktor für Klimaneutralität. Positionspapier von IN4climate.NRW. Gelsenkirchen. Online unter: <https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Downloads/Ergebnisse/IN4climate.NRW/AG-Papiere/2020/in4climatenrw-positionspapier-erneuerbare-energien.pdf>.
- IN4climate.NRW (Hrsg.) 2021: Chemisches Recycling - Eine Einordnung. Positionspapier von IN4climate.NRW. Gelsenkirchen. Online unter: <https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Downloads/2021/in4climate.nrw-positionspapier-chemisches-recycling-de.pdf>.
- IT.NRW 2020: NRW-Industrie produzierte 2019 Aluminium und Halbzeug daraus im Wert von 4,8 Milliarden Euro. Düsseldorf: Information und Technik Nordrhein-Westfalen. Online unter: <https://www.it.nrw/node/101145/pdf> (abgerufen am 2. August 2021).
- Korhonen, Jouni; Honkasalo, Antero; Seppälä, Jyri 2018: Circular Economy: The Concept and its Limitations. In: Ecological Economics (143), S. 37–46.
- Kreislaufwirtschaft Bau 2021: Mineralische Bauabfälle - Monitoring 2018. Berlin: Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V. Online unter: <https://kreislaufwirtschaft-bau.de/> (abgerufen am 22. Juli 2021).

- KRU 2019: Substitutionsquote - Ein realistischer Erfolgsmaßstab für die Kreislaufwirtschaft! Dessau-Roßlau: Ressourcenkommission am Umweltbundesamt (KRU). Online unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/190722_uba_kommp_substitutionsquote_bf.pdf.
- Landtag NRW 2021: Gesetz zur Neufassung des Klimaschutzgesetzes Nordrhein-Westfalen. S. 893–914.
- Martens, Hans; Goldmann, Daniel 2016: Recyclingtechnik - Fachbuch für Lehre und Praxis. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer.
- Material Economics 2018: The Circular Economy - a Powerful Force for Climate Mitigation. Stockholm. Online unter: <https://materialeconomics.com/publications/the-circular-economy-a-powerful-force-for-climate-mitigation-1> (abgerufen am 22. Juli 2021).
- MULNV NRW 2021: Kabinett verabschiedet Gesetzentwurf für ein neues Kreislaufwirtschaftsgesetz. In: Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Online unter: <https://www.land.nrw/de/pressemitteilung/kabinett-verabschiedet-gesetzentwurf-fuer-ein-neues-kreislaufwirtschaftsgesetz> (abgerufen am 16. August 2021).
- MULNV NRW (Hrsg.) 2005: Leitfaden zur energetischen Verwertung von Abfällen in Zement-, Kalk- und Kraftwerken in Nordrhein-Westfalen. 2. Auflage. Düsseldorf: Ministerium für Umwelt und Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Online unter: https://www.th-owl.de/files/webs/umwelt/download_autoren/immissionsschutz/Interpretation/NRW0509yyLeitfEnergVerw02.pdf.
- MWIDE 2021: Carbon Management Strategie NRW. In: Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. Online unter: <https://www.wirtschaft.nrw/carbon-management-strategie-nrw> (abgerufen am 18. September 2021).
- MWIDE 2021: Kohlenstoff kann Klimaschutz - Carbon Management Strategie Nordrhein-Westfalen. Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf.
- Neligan, Adriana et al. 2021: Digitalisierung als Enabler für Ressourceneffizienz in Unternehmen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie - Hauptbericht. Köln: Institut der deutschen Wirtschaft Köln.
- OECD 2019: Business Models for the Circular Economy: Opportunities and Challenges for Policy. Paris. Online unter: <https://doi.org/10.1787/g2g9dd62-en> (abgerufen am 6. Oktober 2021).
- Ragaert, Kim; Delva, Laurens; Van Geem, Kevin 2017: Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. In: Waste Management 69, S. 24–58.
- Ramesohl, Stephan; Berg, Holger 2019: Digitalisierung in die richtige Richtung lenken: Eckpunkte für Wissenschaft und Politik. Wuppertal: Wuppertal Institut. in brief 08/2019. Wuppertaler Impulse zur Nachhaltigkeit. Online unter: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7392/file/7392_Digitalisierung.pdf.
- Remondis 2020: Remondis und Hamburg Wasser recyceln ab Januar Phosphor. In: EUWID Recycling und Entsorgung. Online unter: <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/einzelansicht/Artikel/remondis-und-hamburg-wasser-recyceln-ab-januar-phosphor.html> (abgerufen am 23. Juli 2021).
- Robshaw, Thomas J. et al. 2020: Development of a Combined Leaching and Ion-Exchange System for Valorisation of Spent Potlining Waste. In: Waste and Biomass Valorization 11, S. 5467–5481.

- Rose, Ansgar et al. 2019: Recycling von Flachglas im Bauwesen - Analyse des Ist-Zustandes und Ableitung von Handlungsempfehlungen. Rosenheim: ift Rosenheim, Fraunhofer ISC. Online unter: https://www.irbnet.de/daten/kbf/kbf_d_F_3202.pdf.
- RWE 2021: Anlage zur Gewinnung von Phosphor aus Klärschlamm kurz vor Inbetriebnahme. Online unter: <https://www.rwe.com/presse/rwe-power/2021-06-02-anlage-zur-gewinnung-von-phosphor-aus-klaerschlamm-kurz-vor-inbetriebnahme> (abgerufen am 27. Juli 2021).
- Scheelhaase, Tanja; Zinke, Guido 2016: Potenzialanalyse einer zirkulären Wertschöpfung im Land Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf-Hamburg-Berlin: Ministerium für Wirtschaft, Energie, Industrie, Mittelstand und Handwerk des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.). Online unter: https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/asset/document/potenzialanalyse-zirkulaere-wertschoepfung-nrw_2016.pdf (abgerufen am 12. August 2021).
- Schneidewind, Uwe 2018: Die Große Transformation. Eine Einführung in die Kunst des gesellschaftlichen Wandels. Frankfurt am Main: S. Fischer Verlag GmbH.
- SCI4climate.NRW 2021a: FACT SHEET: Einführung in die Circular Economy. Teil 1 der Fact Sheet-Reihe zur Kreislaufwirtschaft. Köln. Online unter: <https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Downloads/Ergebnisse/SCI4climate.NRW/Rahmenbedingungen/1-factsheet-einf%C3%BChrung-in-die-ce-cr-sci4climatenrw.pdf>.
- SCI4climate.NRW 2021b: FACT SHEET: Abfallhierarchie - Die Stufen der Kreislaufwirtschaft. Teil 2 der Fact Sheet-Reihe zur Kreislaufwirtschaft. Köln. Online unter: <https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Downloads/Ergebnisse/SCI4climate.NRW/Rahmenbedingungen/2-factsheet-abfallhierarchie-cr-schi4climatenrw.pdf>.
- SCI4climate.NRW 2021c: Digitalisierung des Kunststoffrecyclings. Wuppertal. Online unter: https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Downloads/Ergebnisse/SCI4climate.NRW/Produkte_und_Wertsch%C3%B6pfungsketten/digitalisierung-des-kunststoffrecyclings-cr-sci4climatenrw.pdf.
- SCI4climate.NRW o. J.: Rahmenbedingungen der Circular Economy. In: IN4climate.NRW. Online unter: <https://www.in4climate.nrw/ergebnisse/sci4climatenrw/gesetze-verordnungen-programme-fuer-die-kreislaufwirtschaft/> (abgerufen am 30. Juli 2021).
- Sommer, Valentin; Stockschläder, Jan; Walther, Grit 2020: Estimation of glass and carbon fiber reinforced plastic waste from end-of-life rotor blades of wind power plants within the European Union. In: Waste Management 115, S. 83–94.
- Sommer, Valentin; Walther, Grit 2021: Recycling and recovery infrastructures for glass and carbon fiber reinforced plastic waste from wind energy industry: A European case study. In: Waste Management 121, S. 265–275.
- TRIMET 2021: Kurzinformation: Maßnahmen zum Klimaschutz. Essen: TRIMET Aluminium SE. Online unter: https://www.trimet.eu/de/zertifikate_pdf/trimet-tae-sdg-kurzinfo-massnahmen-zum-klimaschutz-2021-05.pdf.
- TRIMET o. J.: Standorte TRIMET Aluminium SE. Online unter: https://www.trimet.eu/de/ueber_trimet/standorte (abgerufen am 22. Juli 2021).
- UBA 2020: Verwertung und Entsorgung ausgewählter Abfallarten - Glas und Altglas. In: Umweltbundesamt. Online unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertungentsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/glas-altglas> (abgerufen am 22. Juli 2021).

- UBA 2021a: Verwertung und Entsorgung ausgewählter Abfallarten - Bauabfälle. In: Umweltbundesamt. Online unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bauabfaelle> (abgerufen am 22. Juli 2021).
- UBA 2021b: Verwertung und Entsorgung ausgewählter Abfallarten - Altpapier. In: Umweltbundesamt. Online unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altpapier> (abgerufen am 23. Juli 2021).
- United Nations 2015: Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development - A/RES/70/1. Online unter: https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf.
- VDP 2021: Papier 2021 - Statistiken zum Leistungsbericht. Bonn: Verband Deutscher Papierfabriken e. V. Online unter: https://www.papierindustrie.de/fileadmin/0002-PAPIERINDUSTRIE/07_Dateien/1_Statistik/2021/08_2021_Statistische_Kurzinformation_D.pdf.
- VDZ 2020a: Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. Eine CO₂-Roadmap für die deutsche Zementindustrie. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V. Online unter: <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/dekarbonisierung-von-zement-und-beton-minderungspfade-und-handlungsstrategien>.
- VDZ 2020b: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2019. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.). Online unter: <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/umweltdaten-der-deutschen-zementindustrie-2019>.
- Weber, Thomas; Stuchtey, Martin 2019: Deutschland auf dem Weg zur Circular Economy - Erkenntnisse aus europäischen Strategien (Vorstudie). München: Circular Economy Initiative Deutschland. Online unter: <https://www.acatech.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-circular-economy/>.
- WIN 2019: Absatz von Steinkohlenflugasche ist 2018 nur leicht gesunken. Aktuelle Daten zur Vermarktung und Prognose zur Verfügbarkeit. Düsseldorf: Wirtschaftsverband Mineralische Nebenprodukte e.V. Online unter: https://www.win-ev.org/fileadmin/win-ev.org/News/2019-10-30_WIN-Marktdaten_2018_Vermarktung_Flugasche_und_Verfuegbarkeit.pdf.
- WV Stahl 2018: Perspektiven der Stahlproduktion in einer treibhausgasneutralen Wirtschaft. Düsseldorf: Wirtschaftsvereinigung Stahl. Online unter: https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Perspektiven_Stahlproduktion_2018_rz_Web.pdf.
- WV Stahl 2020: Circular Economy mit Stahl. Beitrag zum Klimaschutz in Europa. Berlin: Wirtschaftsvereinigung Stahl. Online unter: https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/Circular-Economy_2020-rz_WEB.pdf.



Kontakt: IN4climate.NRW
Munscheidstraße 14
45886 Gelsenkirchen
+49 209 40 85 99-0
post@in4climate.nrw
www.in4climate.nrw