

Bericht

des Ausschusses für Bildung, Forschung und
Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss)
gemäß § 56a der Geschäftsordnung

Technikfolgenabschätzung (TA)

Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes

Inhaltsverzeichnis

| | Seite |
|--|-------|
| Vorwort des Ausschusses | 3 |
| Zusammenfassung | 7 |
| 1 Einleitung | 19 |
| 2 Zirkuläres Wirtschaften: Grundlagen und Rahmenbedingungen | 21 |
| 2.1 Warum Kreislaufwirtschaft? Ziele und Herausforderungen | 21 |
| 2.2 Grundlegende rechtliche Rahmenbedingungen | 24 |
| 2.2.1 Entsorgung und Verwertung von Abfällen – das Kreislaufwirtschaftsgesetz | 25 |
| 2.2.2 Produkthanforderungen..... | 28 |
| 2.3 Verbesserung des Rezyklateinsatzes: Ansatzpunkte und Hemmnisse..... | 30 |
| 2.4 Fazit | 35 |
| 3 Fallstudien zu Abfallströmen | 37 |
| 3.1 Verpackungsabfälle aus Kunststoff | 38 |
| 3.1.2 Stoffströme und Rahmenbedingungen..... | 39 |
| 3.1.3 Recycling von Kunststoffverpackungen: Stand der Technik und innovative Verfahren | 45 |
| 3.1.4 Herausforderungen und Perspektiven | 50 |

| | Seite |
|----------|--|
| 3.2 | Elektro- und Elektronikabfälle..... 57 |
| 3.2.1 | Stoffströme und Rahmenbedingungen..... 58 |
| 3.2.2 | Metallrecyclingverfahren: Stand der Technik und Innovationen 65 |
| 3.2.3 | Herausforderungen und Perspektiven 72 |
| 3.3 | Mineralische Bauabfälle 75 |
| 3.3.1 | Stoffströme und Rahmenbedingungen..... 76 |
| 3.3.2 | Aufbereitung von Bauabfällen: Stand der Technik und Innovationen 87 |
| 3.3.3 | Herausforderungen und Perspektiven 90 |
| 4 | Politikinstrumente zur Steigerung des Rezyklateinsatzes 99 |
| 4.1 | Regulative Instrumente 100 |
| 4.1.1 | Mindesteinsatzquoten für Rezyklate..... 100 |
| 4.1.2 | Vorgaben zum Produktdesign..... 101 |
| 4.1.3 | Vorgabe von Kriterien zum Ende der Abfalleigenschaft..... 103 |
| 4.1.4 | Informationspflichten und digitale Informationswerkzeuge 104 |
| 4.2 | Ökonomische Instrumente 106 |
| 4.2.1 | Produktionsseitige Steuern und Abgaben 106 |
| 4.2.2 | Verbrauchsseitige Steuern und Abgaben 108 |
| 4.2.3 | Öffentliche Beschaffung 111 |
| 4.3 | Kooperative Instrumente..... 113 |
| 4.4 | Fazit 116 |
| 5 | Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes – übergreifende Handlungsfelder 117 |
| 5.1 | Entwicklung eines geeigneten Politikmix..... 119 |
| 5.2 | Systematische Evaluierung von Politikmaßnahmen auf Basis aussagekräftiger Indikatoren 123 |
| 5.3 | Aufbau und Stärkung internationaler Kooperationen 124 |
| 5.4 | Schlussbemerkung 124 |
| 6 | Literatur 127 |
| 6.1 | In Auftrag gegebene Gutachten 127 |
| 6.2 | Weitere Literatur..... 127 |
| 7 | Anhang 149 |
| 7.1 | Abbildungen..... 149 |
| 7.2 | Tabellen 150 |
| 7.3 | Kästen 150 |

Vorwort des Ausschusses

Der schonende Umgang mit natürlichen Ressourcen zählt zu den zentralen Zielen der Umweltpolitik. Auch für seine Industrie ist Deutschland auf die zuverlässige Verfügbarkeit von Ressourcen angewiesen. Allerdings wird der Rohstoffbedarf der deutschen Wirtschaft bislang nur in geringem Umfang durch Sekundärrohstoffe gedeckt, obwohl hierzulande jedes Jahr Hunderte Millionen Tonnen Abfall produziert werden. Ein genauer Blick auf die Recyclingstatistiken legt nahe, dass für manche Abfallströme noch erhebliche Potenziale bei der stofflichen Verwertung vorhanden sind. Dies gilt beispielsweise für Kunststoffverpackungen, aber auch für Elektro- und Elektronikaltgeräte, die wertvolle Metalle enthalten.

Für die Transformation zur Kreislaufwirtschaft ist eine Verbesserung des Rezyklateinsatzes entscheidend. Dafür werden Maßnahmen erforderlich sein, die spezifisch auf die Situation bei den verschiedenen Stoffströmen zugeschnitten sind. Allerdings stellt sich auch die Frage, welche übergreifenden Faktoren und Rahmenbedingungen die Produktion und den Einsatz von Rezyklaten hemmen und mit welchen Strategien und Instrumenten diese Hemmnisse überwunden werden können. Vor diesem Hintergrund wurde das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) vom Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages beauftragt, ein TA-Projekt zum Thema »Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes« durchzuführen.

Der vorliegende Bericht bietet einen ebenso breiten wie differenzierten Überblick über relevante Rahmenbedingungen und typische Hemmnisse für den Einsatz von Sekundärrohstoffen. Einen Schwerpunkt bildet die fallstudienartige Analyse dreier relevanter Produkt- bzw. Abfallbereiche – Kunststoffverpackungen, Elektro- und Elektronikabfälle sowie mineralische Bauabfälle –, für die jeweils Stoffströme sowie Sammel- und Recyclingquoten quantifiziert, der Stand der Technik beim Recycling und innovative Verfahren dargestellt und wesentliche Herausforderungen für den Einsatz von Sekundärrohstoffen beschrieben werden. Für den Bereich der Bauabfälle wird zugleich ein weiterführender Forschungsbedarf sichtbar. Im Fokus des Berichts steht außerdem die Frage, welche Politikinstrumente geeignet sind, zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes beizutragen. Entsprechende Möglichkeiten werden übergreifend systematisiert und mit Blick auf mögliche Nebenwirkungen sowie die Einordnung in den Politikmix diskutiert. Abschließend werden die zentralen Ergebnisse resümiert, wichtige Handlungsfelder identifiziert und politische Optionen aufgezeigt, wie mit den anstehenden Herausforderungen umgegangen werden kann.

Der Deutsche Bundestag erhält mit diesem TAB-Arbeitsbericht eine umfangreiche und fundierte Informationsbasis für die parlamentarische Befassung mit diesem hochaktuellen umwelt- und wirtschaftspolitischen Zukunftsthema.

Berlin, den 31. Januar 2024

Kai Gehring
Vorsitzender

Dr. Holger Becker
Berichterstatter

Lars Rohwer
Berichterstatter

Laura Kraft
Berichterstatterin

Prof. Dr. Stephan Seiter
Berichterstatter

**Prof. Dr.-Ing. habil.
Michael Kaufmann**
Berichterstatter

Christoph Kehl
Pauline Rioussel

**Strategien und Instrumente
zur Verbesserung
des Rezyklateinsatzes**

**Mit Fallstudien zu
Kunststoffverpackungen,
Elektrogeräten sowie Baustoffen**

Endbericht

TAB-Arbeitsbericht Nr. 207

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse in Fragen des wissenschaftlich-technischen Wandels. Das TAB wird seit 1990 vom Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) betrieben. Hierbei kooperiert es seit September 2013 mit dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

Zusammenfassung

Angesichts steigender Abfallmengen und hoher Rohstoffverbräuche gilt der effizientere Umgang mit Ressourcen und Energie als eine der drängendsten Aufgaben moderner Gesellschaften auf dem Weg in eine nachhaltige Zukunft. Ein wichtiges Ziel dabei ist das Schließen von Stoffkreisläufen, wodurch Materialien, die der Natur entnommen wurden, länger im Wirtschaftskreislauf gehalten werden. Gelingt es so, Primärrohstoffe durch Sekundärrohstoffe (Rezyklate) zu substituieren, wird davon ein Beitrag sowohl zur Sicherung der Rohstoffversorgung Deutschlands als auch zur Entlastung der Umwelt erwartet. Allerdings wird bislang nur ein kleiner Teil der für die deutsche Wirtschaft benötigten Rohstoffe durch Sekundärrohstoffe gedeckt.

Für die Erreichung der europäischen und deutschen Kreislaufwirtschaftsziele ist eine Verbesserung des Rezyklateinsatzes entscheidend. Dafür werden Maßnahmen erforderlich sein, die spezifisch auf die Situation bei den verschiedenen Stoffströmen zugeschnitten sind. Auch stellt sich die Frage, welche übergreifenden Faktoren und Rahmenbedingungen die Produktion und den Einsatz von Rezyklaten hemmen und mit welchen Strategien und Instrumenten diese Hemmnisse überwunden werden können. Ziel des vorliegenden Berichts ist es, einen breiten und differenzierten Überblick über relevante Rahmenbedingungen und typische Hemmnisse für den Einsatz von Sekundärrohstoffen zu geben und daraus vielversprechende Strategien und Instrumente abzuleiten, mit denen eine Verbesserung des Rezyklateinsatzes erreicht werden kann.

Grundlagen der Kreislaufwirtschaft

Indem versucht wird, Ressourcen und Materialien im Wirtschaftskreislauf zu halten und endliche Ressourcen damit möglichst effizient zu nutzen, stellt die Kreislaufwirtschaft das Gegenmodell zu dem linearen Wirtschaften dar, das u. a. für den steigenden Ressourcenverbrauch und die wachsenden Abfallmengen verantwortlich gemacht wird. Im Zuge politischer Zielsetzungen, Klimaneutralität bis spätestens 2050 zu erreichen, hat der effiziente und sparsame Umgang mit natürlichen Ressourcen an Aktualität gewonnen und ist heute Gegenstand von Strategien sowohl der Europäischen Kommission als auch der Bundesregierung. Insgesamt sind die übergeordneten politischen Ziele, zu denen die Kreislaufwirtschaft beitragen soll, sehr breit gefächert:

- › *Umweltschutz:* Die Transformation zur Kreislaufwirtschaft soll dazu beitragen, die negativen Umweltauswirkungen zu lindern, die mit der Rohstoffgewinnung und der nicht fachgerechten Entsorgung von Abfällen verbunden sind. Durch sparsamere, effizientere Nutzung von Ressourcen und die Schaffung möglichst geschlossener Materialkreisläufe sollen sowohl die Bedarfe an Primärrohstoffen als auch die Abfallmengen reduziert werden.
- › *Klimaschutz:* Von einer konsequenten Anwendung des Kreislaufprinzips in Produktionsprozessen erhofft man sich durch einen effizienteren Umgang mit Ressourcen und durch Materialeinsparungen in Produktionsprozessen (z. B. durch nachhaltiges Produktdesign) eine erhebliche Senkung der CO₂-Emissionen.
- › *Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit:* Wirtschaftliche Chancen entstehen zum einen durch direkte Kostensenkungen, die durch einen sparsameren Ressourceneinsatz erzielt werden können. Zum anderen enthalten Abfälle wertvolle Rohstoffe, die durch ein hochwertiges Recycling im Wirtschaftskreislauf gehalten werden können, was sich auch gesamtwirtschaftlich in höherer Wirtschaftsleistung und Beschäftigung auszahlen soll.
- › *Sichere Rohstoffversorgung:* Deutschland ist in vielen Rohstoffbereichen auf Importe angewiesen. Recycling kann dazu beitragen, strategische Rohstoffabhängigkeiten zu reduzieren, indem durch Substitution mit Rezyklaten der Bedarf an Primärrohstoffen perspektivisch gesenkt wird.

Ob und in welchem Umfang sich die genannten Ziele realisieren lassen, hängt stark von der konkreten Umsetzung der Kreislaufwirtschaft ab. Traditionell lag der Schwerpunkt vor allem auf dem Recycling bzw. dem Abfallmanagement, was jedoch nicht unbedingt der ressourcenschonendste Weg ist. Der Fokus moderner Konzepte der Kreislaufwirtschaft richtet sich verstärkt auf den umfassenden Ressourcenschutz, der auch Stellschrauben wie die *Wiederverwendung von Produkten* sowie z. B. die *Verlängerung der Produktlebensdauer* und ein *nachhaltiges Produktdesign* beinhaltet. Ziel ist die Optimierung von Stoffkreisläufen aus einer systemischen Perspektive, die

den gesamten Wertschöpfungszyklus berücksichtigt. Entsprechend ist nicht nur der Abfallsektor an diesem Prozess zu beteiligen, sondern es sind auch Produkthersteller, Handel und Konsument/innen einzubeziehen.

Rechtliche Rahmenbedingungen

Da die Kreislaufwirtschaft als gesamtwirtschaftliches Modell alle Branchen und Wirtschaftszweige einschließt, ist sie durch eine Vielzahl von Gesetzen und Verordnungen geprägt. Traditionell im Vordergrund steht dabei das ausdifferenzierte Abfallrecht (Entsorgung und Verwertung von Abfällen). Hinzu kommen aber verstärkt auch Regelungen zur Produktgestaltung – entsprechend der Maßgabe, dass eine moderne Kreislaufwirtschaft den gesamten Produktkreislauf im Blick haben muss. Die Europäische Union (EU) ist dabei die Taktgeberin und setzt durch eine Reihe von Richtlinien und Verordnungen den maßgeblichen rechtlichen Rahmen. Durch den Grünen Deal, der auf EU-Ebene initiiert wurde, sind die rechtlichen Grundlagen zur Kreislauf- und Abfallwirtschaft aktuell durch eine große Dynamik geprägt.

Die allgemeinen Prinzipien und Grundsätze zur Entsorgung und Verwertung von Abfällen werden in der Richtlinie 2008/98/EG¹ (nachfolgend Abfallrahmenrichtlinie) definiert, die durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)² in deutsches Recht umgesetzt wurde. Ein zentrales, rechtlich verankertes Prinzip, das es bei der Abfallbewirtschaftung zu beachten gilt, ist die Abfallhierarchie: Abfälle sind zu vermeiden. Sofern eine Vermeidung nicht möglich ist, hat der Abfallerzeuger oder der Abfallbesitzer die Abfälle zu verwerten. Die Verwertung umfasst prioritär die Vorbereitung zur Wiederverwendung, gefolgt von Recycling und sonstiger, insbesondere energetischer Ressourcennutzung. Erst dann sind die Abfälle auf einer Deponie zu beseitigen. Weitere wichtige Prinzipien zum Umgang mit Abfällen, die im KrWG definiert sind, betreffen Kriterien für das Ende der Abfalleigenschaft, das Gebot der getrennten Sammlung und Behandlung, Regelungen zur Produktverantwortung sowie zur nachhaltigen Beschaffung. Neben diesen allgemeinen Vorschriften zum Umgang mit Abfällen wurden für diverse Produkt- und Abfallbereiche spezifische Regelungen erlassen (beispielsweise für Gewerbe- und Verpackungsabfälle, Elektronikaltgeräte, Altbatterien).

Relevant für den Rezyklateinsatz sind weiterhin rechtliche Regelungen, die Anforderungen für die Produktgestaltung enthalten:

- Zum einen müssen Rezyklate bestimmte rechtliche Vorgaben erfüllen, damit sie in Produkten eingesetzt werden können. Relevant ist hier vor allem die Verordnung (EG) Nr. 1907/2006³ (nachfolgend REACH-Verordnung), die ein hohes Schutzniveau für die menschliche Gesundheit und die Umwelt sicherstellen soll. Die Verordnung bestimmt Verfahren zur Erfassung und Bewertung von Informationen über Eigenschaften und Gefahren von Stoffen. Je nach Verwendungszweck werden außerdem spezifische Anforderungen an die Produkte gestellt (z. B., wenn die Rezyklate in Berührung mit Lebensmitteln kommen). Die Anforderungen der REACH-Verordnung einzuhalten bzw. ihre Einhaltung nachzuweisen, kann für den Rezyklateinsatz eine große Hürde darstellen.
- Zum anderen gibt es gesetzliche Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Produkten, die sowohl ihre Recyclingfähigkeit als auch den Einsatz von Rezyklaten betreffen. Auf EU-Ebene ist diesbezüglich vor allem die Richtlinie 2005/32/EG⁴ (nachfolgend Ökodesign-Richtlinie) relevant, mit der das Prinzip einer umweltgerechten Produktgestaltung etabliert wurde. Sie gilt allerdings nur für energieverbrauchsrelevante Geräte (Waschmaschinen, Kühlschränke, Beleuchtung etc.). Mit dem Grünen Deal kündigte die Europäische Kommission 2020 eine neue Strategie für nachhaltige Produkte an. Im Zuge dessen ist geplant, die Ökodesign-Richtlinie durch eine neue Ökodesign-Verordnung abzulösen, die alle relevanten Produktgruppen einschließt (z. B. Textilien, Möbel, Stahl, Zement und Chemikalien), deren Rezyklierbarkeit stärken und u. a. auch zu einem höheren Rezyklatanteil beitragen soll.

¹ Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, die zuletzt durch die Richtlinie (EU) 2018/851 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle am 14.6.2018 geändert wurde

² Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24.2.2012, zuletzt geändert am 2.3.2023

³ Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94, der Richtlinie 76/769/EWG sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG

⁴ Richtlinie 2005/32/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG sowie der Richtlinien 96/57/EG und 2000/55/EG

Verbesserung des Rezyklateinsatzes: Ansatzpunkte und Hemmnisse

Entlang der Wertschöpfungskette lassen sich stoffstromübergreifend zentrale Ansatzpunkte, nämlich Produktdesign, Sammlung, Recycling und Rezyklateinsatz, identifizieren, die bei der Schließung von Stoffkreisläufen zu beachten sind. Dabei können jeweils unterschiedliche Hemmnisse dem Ziel entgegenstehen, eine Verbesserung des Rezyklateinsatzes zu erreichen.

Ein *Produktdesign*, das sparsam mit Ressourcen umgeht, Langlebigkeit und Wiederverwendbarkeit fördert und am Ende des Produktlebenszyklus eine einfache Demontage und ein effizientes Recycling unterstützt, ist eine zentrale Voraussetzung für das Gelingen einer Kreislaufwirtschaft. Üblicherweise werden jedoch weder die Wiederverwendbarkeit des Produkts oder von Komponenten noch die Recyclingfähigkeit bei der Produktgestaltung systematisch bedacht. Um eine bessere Recyclingfähigkeit von Produkten zu erreichen, wäre vor allem ein ganz neues Ausmaß an Kooperation und Koordination der verschiedenen Akteure entlang der Wertschöpfungskette erforderlich. Denn um aus Produkten nach dem Ende ihres Lebenszyklus qualitativ hochwertige Sekundärrohstoffe zu gewinnen, ist es wichtig, genaue Kenntnisse über deren materielle Zusammensetzung und ihren Aufbau zu haben sowie die Anzahl der verschiedenen Materialien zu verringern und damit den jeweiligen Stoffstrom zu erhöhen. Derartige Informationen werden aber typischerweise nicht über die Wertschöpfungskette weitergegeben (informativische Hemmnisse).

Sammlung: Für das Schließen von Stoffkreisläufen ist entscheidend, dass zum einen möglichst alle Abfälle fachgerecht entsorgt werden und z. B. nicht auf illegalem Wege (z. B. Export) verlorengehen. Zum anderen ist dafür Sorge zu tragen, dass minderwertige Entsorgungsmöglichkeiten (wie die Deponierung oder thermische Verwertung) nur für solche Abfälle genutzt werden, die für eine stoffliche Verwertung (Recycling) nicht infrage kommen. Der Aufbau und die Durchführung trennscharfer Sammelsysteme sind mit einem erheblichen organisatorischen und infrastrukturellen Aufwand verbunden. Je spezifischer die Sammlung und je größer die Produktvielfalt, desto höher die Kosten. Außerdem sind die ökologischen Folgen trennscharfer Systeme aufgrund einer unter Umständen schlechteren Treibhausgasbilanz nicht zwangsläufig positiv. Ein weiteres Hemmnis ist, dass Nutzen und Kosten der Abfallsammlung bei unterschiedlichen Akteuren der Wertschöpfungskette anfallen. Das hat zur Folge, dass im Regelfall die Investitionen in den Aufbau anspruchsvoller Sammelinfrastrukturen unterbleiben, solange einerseits die Verteilung von Kosten und Nutzen nicht klar und verbindlich geregelt wird und andererseits die Wirtschaftlichkeit der Investitionen durch extreme Preissprünge im Sekundärrohstoffmarkt nicht kalkulierbar ist.

Mit dem *Recycling* der Abfälle werden die darin enthaltenen Wertstoffe zurückgewonnen und als Rezyklate bzw. Sekundärrohstoffe wieder nutzbar gemacht. Damit kann ein erheblicher technischer Aufwand verbunden sein, der einerseits von materialspezifischen Eigenschaften des jeweiligen Stoffstroms, andererseits aber auch vom Grad der Recyclingfähigkeit der Produkte sowie der Qualität der Abfallsammlung abhängt. Die Recyclingbranche investiert nur dann in innovative Technologien und Anlagen, wenn dies auch betriebswirtschaftlich darstellbar ist. Das Recycling ist deshalb üblicherweise auf die Rückgewinnung von solchen Rohstoffen optimiert, die mit ausreichendem Erlös vermarktet werden können. Diese Situation kann Innovationen hemmen, die zur Schließung von Stoffkreisläufen erforderlich wären.

Der letzte Schritt zur Schließung der Materialkreisläufe ist der *Einsatz der gewonnenen Rezyklate* in neuen Produkten. Ob das in ausreichendem Maße gelingt, hängt von bestimmten wettbewerblichen Randbedingungen ab. Relevant sind vor allem Preis und Qualität. Die Qualität von Rezyklaten kann gesteigert werden, indem der ganze Kreislaufprozess – wie zuvor beschrieben – beginnend mit dem Produktdesign optimiert wird. Der entsprechend erhöhte Aufwand schlägt sich jedoch in Preissteigerungen nieder, welche sich wiederum negativ auf die Rezyklatnachfrage auswirken können. Dieses Problem wird häufig dadurch verschärft, dass Sekundärrohstoffe durch Preisverzerrungen Wettbewerbsnachteilen ausgesetzt sind. Denn Umweltkosten der Extraktion und ggf. Verarbeitung von Primärrohstoffen schlagen sich häufig nicht im Rohstoffpreis nieder (negative Externalitäten), während bei Sekundärmaterialien der hiesige Aufwand für Sammlung und Aufbereitung voll angerechnet wird. Außerdem können sich auch regulatorische Vorgaben (wie z. B. Dokumentation der Herkunft und Zusammensetzung von Sekundärmaterialien) hemmend auf den Rezyklateinsatz auswirken.

Fallstudien zu Abfallströmen

Um die Anforderungen an den verbesserten Rezyklateinsatz differenziert zu beleuchten, werden im vorliegenden Bericht drei verschiedene Produkt- bzw. Abfallbereiche (Kunststoffverpackungen, Elektro- und Elektronikgeräte, mineralische Bauabfälle) vertieft untersucht. Ziel ist jeweils eine Bestandsaufnahme technischer, rechtlicher sowie wirtschaftlicher Rahmenbedingungen, die für die Gewinnung und die Vermarktung von Rezyklaten maßgeblich sind. Alle drei Bereiche gehören zu den Produktwertschöpfungsketten, die auch im neuen EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft als zentral hervorgehoben und für die Beförderung einer Kreislaufwirtschaft somit als besonders wichtig angesehen werden:

- Kunststoffverpackungen (aus Polyethylen – PE, Polyethylenterephthalat – PET, Polypropylen – PP etc.), die beim privaten Verbraucher anfallen, machen etwa 39% der Kunststoffabfälle aus, werden bislang aber nur zu etwa 60% recycelt. Neben der heterogenen Zusammensetzung der Abfälle sind es vor allem der wachsende Anteil von Verbundmaterialien (z.B. Mehrschichtmaterialien bestehend aus Papier, Kunststoff und Metall) sowie der hohe Verunreinigungsgrad durch Produktreste oder auch Etiketten, Klebstoffe und Lackierungen, die eine hochwertige stoffliche Verwertung von Kunststoffen aus Verpackungen erschweren.
- Elektro- und Elektronikabfälle stellen eine der am schnellsten wachsenden Abfallarten dar. Eine besondere Herausforderung für das Recycling bildet der kleinteilige, komplexe Aufbau der Geräte. Betrachtet werden in der Fallstudie Stand und Perspektiven des Metallrecyclings aus Elektroschrott. Von besonderer rohstoffpolitischer Bedeutung sind kritische Metalle wie Seltene Erden, die allerdings nur in geringen Konzentrationen in Elektro- und Elektronikprodukten vorkommen und daher besonders schwer zurückzugewinnen sind.
- Bauabfälle sind die mengenmäßig größte Abfallgruppe in Deutschland. Da Bauabfälle sehr heterogen zusammengesetzt sind, liegt der Fokus der Fallstudie auf mineralischen Abfallfraktionen. Im Vordergrund steht die Frage, wie Aufbereitung und Nutzung mineralischer Bau- und Abbruchabfälle qualitativ verbessert und der Einsatz von Recyclingbaustoffen gestärkt werden können.

Die drei Fallstudien sind nach dem gleichen Grundmuster aufgebaut: Erst wird der aktuelle Wissensstand (auf Basis vorliegender Daten) bezüglich jährlich anfallender Abfallmengen sowie aktueller Sammel- und Recyclingquoten dargelegt und es wird der jeweils bestimmende Rechtsrahmen für Abfallentsorgung und -verwertung umrissen. Anschließend erfolgt ein systematischer Überblick über den Stand der Technik und technologische Entwicklungstrends in der jeweiligen Recyclingindustrie, wobei auf technische und infrastrukturelle Hürden eingegangen wird. In den Abschlusskapiteln werden die Herausforderungen für den Einsatz von Sekundärrohstoffen zusammengefasst und entlang des Produktlebenszyklus Ansatzpunkte für eine perspektivische Verbesserung des Rezyklateinsatzes in den Bereichen Design für Recycling, Sammlung, Wirtschaftlichkeit und Vorgaben für den Rezyklateinsatz identifiziert und beschrieben.

Übergreifende Ergebnisse

Die drei Fallstudien zeigen, dass Deutschland über eine gut ausgestattete und leistungsfähige Abfallwirtschaft verfügt. So sind deutsche Unternehmen beim Multimetallrecycling weltweit führend, während sie im Bereich des Kunststoffrecyclings den höchsten Anteil an internationalen Patentfamilien aufweisen. Doch eine starke Abfallwirtschaft resultiert nicht unbedingt in einer starken Kreislaufwirtschaft – auch dies wird durch die Fallbeispiele veranschaulicht. Status quo, Hemmnisse und Potenziale der bei Rückgewinnung sowie dem Einsatz von Rezyklaten lassen sich für die drei Bereiche wie folgt zusammenfassen:

- *Verpackungsabfälle aus Kunststoff*: Um die im Verpackungsgesetz (VerpackG)⁵ vorgeschriebene werkstoffliche Verwertungsquote für Kunststoffe von 70 Massen-% zu erreichen, sind verstärkte Anstrengungen notwendig. Insbesondere liegt der Stand der Technik bei Recyclingunternehmen teils weit hinter dem technisch Machbaren zurück. Erforderlich wären vor allem Investitionen in moderne Sortiertechniken (Sortierung nach Kunststoffsorte, Materialform und Farbe), die zu einer höheren Sortierquote beitragen, insbesondere wenn eine Reduzierung der Materialvielfalt und von schwer rezyklierbaren Materialien (z.B. Verbundmaterialien) parallel erfolgt. Als Investitionshürde erweisen sich jedoch die niedrigen bzw. volatilen Preise von Primärrohstoffen, die sich – in Kombination mit kostengünstigen thermischen Verwertungsverfahren und

⁵ Verpackungsgesetz vom 5.7.2017, zuletzt geändert am 25.10.2023

teils hohen regulatorischen Anforderungen an den Rezyklateinsatz – negativ auf die Wirtschaftlichkeit des werkstofflichen Recyclings auswirken. Für Verpackungsabfälle, die für das werkstoffliche Recycling nicht geeignet sind, kommen perspektivisch innovative Verfahren wie das chemische oder das bioenzymatische Recycling für ausgewählte Kunststofftypen infrage. Dennoch sind die ökologischen Vorteile insbesondere der bestehenden chemischen Verfahren mit hohen Unsicherheiten behaftet und die Datenlage für eine Bewertung ist derzeit noch äußerst lückenhaft. Stellschrauben sind aber nicht nur auf technischer Ebene zu sehen. Als zentrale Hemmnisse für ein hochwertiges Recycling erweisen sich die komplexe Zusammensetzung der Verpackungen sowie die fehlende Transparenz bezüglich Produktinformationen. Hier braucht es höhere Anreize für ein recyclingfähiges Verpackungsdesign zusammen mit dem systematischen Einsatz von Markern zur Kennzeichnung und automatischen Erkennung von Kunststoffen bzw. Verpackungen. Ein weiteres Hemmnis besteht darin, dass die Sammlung über duale Systeme zu heterogenen Abfallgemischen führt, die nur mit hohem Aufwand sortenrein zu trennen sind. Hohe Rezyklateinsatzquoten sind deshalb vor allem dort vorzufinden, wo durch spezifische Sammelsysteme eine hochgradig sortenreine Abfallerfassung erfolgt (z. B. PET-Pfandsysteme). Zu überlegen wäre deshalb, inwiefern solche Lösungen auf weitere Verpackungsprodukte erweitert werden können. Zusätzlich sind auch die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für werkstoffliches Recycling zu verbessern, beispielsweise über Maßnahmen, die zu einer Verteuerung von Primärkunststoffen führen.

- *Elektro- und Elektronikabfälle:* Nominal werden die geforderten Recyclingquoten bei den verschiedenen Gerätekategorien zwar erreicht und bei den Massenmetallen (Kupfer, Aluminium, Eisen) vergleichsweise hohe Rückgewinnungsquoten erzielt. Allerdings ist die Sammlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten unvollständig und die geforderte Sammelquote von 65 % wird deutlich verfehlt. Daneben behindern vor allem die bislang kaum demontage- und recyclinggerechte Gestaltung der Produkte sowie die komplexe Materialzusammensetzung von Elektroschrott ein hochwertiges Recycling. Durch Schreddern der Materialien (bei der Demontage) gehen hauptsächlich gering konzentrierte Metalle verloren. Die anschließenden Recyclingprozesse basieren auf metallurgischen Verfahren, sind technisch äußerst anspruchsvoll und für gering konzentrierte Metalle besonders aufwendig. Entsprechend sind die Rückgewinnungsquoten bei kritischen Metallen (bis auf Ausnahmen wie Gold, Silber und Palladium) meist marginal. Verbesserungen des Recyclings könnten zum einen durch innovative Sortiertechnologien erreicht werden, die eine zielgenaue, legierungsspezifische Trennung der Stoffströme ermöglichen. Für die Rückgewinnung kritischer Metalle (z. B. Seltene Erden), die mit den bestehenden metallurgischen Verfahren nicht effizient durchführbar ist, müssen zum anderen innovative Verfahren weiterentwickelt werden. Die Verbesserung der Recyclingprozesse ist für sich alleine genommen aber nicht ausreichend, um die Rückgewinnungsquoten metallischer Wertstoffe zu erhöhen. Vielmehr müssen sie Hand in Hand gehen mit Verbesserungen bei Produktgestaltung und -information (Design für Recycling) sowie bei den Sammelsystemen (z. B. Einführung eines Pfandsystems).
- *Mineralische Bau- und Abbruchabfälle:* Hier werden die EU-Zielvorgaben für die Verwertung zwar klar übertroffen. Dennoch spielen hochwertige Verwertungswege, insbesondere der Einsatz von Recyclingbaustoffen im Hochbau, noch eine untergeordnete Rolle und liegen teils weit hinter den Möglichkeiten zurück. Das liegt nicht an limitierten Aufbereitungstechniken, die hauptsächlich auf mechanischen Verfahren beruhen und deutlich weniger anspruchsvoll sind als bei den beiden anderen Bereichen. Die hauptsächlichsten Barrieren sind vielmehr darin zu sehen, dass – neben billigen Entsorgungsoptionen (Verfüllungen etc.) und einer in der Praxis mangelhaft umgesetzten Getrennthaltungspflicht – Sekundärrohstoffe nicht mit Primärrohstoffen konkurrieren können. Das ist sowohl auf preisliche Nachteile als auch auf Akzeptanzprobleme zurückzuführen. Die Folge ist eine Gemengelage, in der der Konkurrenzdruck von aufbereitungsarmen und kostengünstigen Entsorgungsoptionen so hoch ist, dass für die Betreiber von Aufbereitungsanlagen kein ausreichender wirtschaftlicher Anreiz besteht, hochwertige Recyclingbaustoffe aufwendig zu produzieren. Zur Überwindung dieser Hemmnisse wäre zum einen die Optimierung der Sammlung von Bauabfällen (sortenreine Erfassung und Aufbereitung) wichtig, zum anderen eine Stärkung der Abnahmemärkte für Recyclingbaustoffe, z. B. über eine öffentliche Beschaffung mit Vorbildfunktion.

Die Beispiele Elektro- sowie Bau- und Abbruchabfälle machen exemplarisch deutlich, dass die Recycling- bzw. Verwertungsquote kein besonders guter Indikator für erfolgreiches zirkuläres Wirtschaften ist. Beide Abfallbereiche weisen beeindruckende Recyclingraten auf (jeweils über 80 %), die sich jedoch nicht in einer entsprechend hohen zirkulären Materialnutzungsrate (Circular Material Use Rate – CMU) widerspiegeln. Die CMU (ein von der EU eingeführter Indikator für die Kreislaufwirtschaft) bildet das Verhältnis der im Kreislauf geführten Materialien zur gesamten Rohstoffnutzung ab und lag 2019 bei den metallischen Erzen bei 32,9 % und bei den nicht

metallischen Mineralien sogar nur bei 17,5%. Das zeigt, dass anhand der Recyclingquote die Nutzung von Sekundärrohstoffen und damit der Erfolg der Kreislaufwirtschaft überschätzt werden. Die Recyclingquote hat keinerlei Aussagekraft darüber, wie viel recyceltes Material tatsächlich in das Wirtschaftssystem zurückfließt. Da auch die Berechnung der CMU auf den Recyclingquoten basiert, ist zu konstatieren, dass die statistische Datengrundlage für eine differenzierte Beurteilung des tatsächlichen Rezyklateinsatzes in den verschiedenen Materialbereichen bislang nicht ausreichend ist.

Zu beachten ist, dass die Fallstudien der exemplarischen Darstellung relevanter Fragestellungen dienen, die sich bei der Verbesserung des Rezyklateinsatzes stellen. Sie bieten keinen vollständigen Überblick über die komplexen technischen, rechtlichen sowie wirtschaftlichen Rahmenbedingungen bei den jeweiligen Abfallströmen. Aus wissenschaftlicher Sicht ist vor allem bei den Bauabfällen eine Vertiefung notwendig, um Lösungsansätze zur Steigerung des Rezyklateinsatzes angemessen beleuchten zu können.

Politikinstrumente zur Steigerung des Rezyklateinsatzes

Der übergreifende Blick auf die Fallbeispiele zeigt – bei allen Unterschieden zwischen den Produktbereichen – deutliche Parallelen bezüglich typischer Hemmnisse für eine erfolgreiche Kreislaufführung. Dazu gehören ein Produktdesign, das nicht auf Langlebigkeit und Recyclingfähigkeit ausgerichtet ist, eine unzureichende bzw. nicht sortenreine Sammlung der Abfälle sowie insgesamt ungünstige ökonomische sowie rechtliche Rahmenbedingungen, die das Recycling bzw. den Rezyklateinsatz unattraktiv oder gar unwirtschaftlich machen. Vor diesem Hintergrund sind steuernde Maßnahmen erforderlich, um die Kreislaufwirtschaft zu optimieren. Benötigt werden dafür neue Politikinstrumente, die weit über das bestehende abfallrechtliche Instrumentarium hinausgehen.

Politikinstrumente sind Werkzeuge, die dazu dienen, politisch definierte Ziele zu erreichen. Sie lassen sich in verschiedene Typen oder Klassen einteilen, abgestuft nach Grad des staatlichen Zwangs, der mit dem jeweiligen Instrumententyp verbunden ist. Üblich ist die Dreiteilung nach regulativen, ökonomischen sowie kooperativen Instrumenten (freiwillige Vereinbarungen), die auch im vorliegenden Bericht zugrunde gelegt wird:

- *Regulative Instrumente* setzen auf direkte Steuerung zur Beeinflussung gesellschaftlichen Handelns. Unter diese Kategorie fallen alle Arten von rechtlich gesetzten Vorschriften, Geboten, Verboten, Verordnungen, Erlassen etc. sowie Regeln, Normen oder Standards. Zu den regulativen Instrumenten zur Steigerung der Nachfrage nach Rezyklaten zählen zum einen gesetzliche Produktstandards, mit denen verpflichtende Anforderungen an spezifische Produktgruppen definiert werden, wie beispielsweise Vorgaben zu Mindesteinsatzquoten für Rezyklate (um die Nachfrage nach Sekundärrohstoffen zu erhöhen), Vorgaben zum Produktdesign (z. B. zur Demontierbarkeit und Recyclingfähigkeit, um werkstoffliches Recycling zu erleichtern) sowie Vorgabe von Kriterien zum Ende der Abfalleigenschaft von Sekundärrohstoffen (um diese aus dem Abfallregime zu entlassen und rechtlich als verkehrsfähiges Produkt anzuerkennen). Zum anderen gehören zu den regulativen Instrumenten auch informatorische Instrumente, die dazu dienen, notwendiges Wissen für die Erfüllung staatlicher Aufgaben zu generieren oder Informationsflüsse zwischen verschiedenen Adressaten sicherzustellen.
- Im Unterschied zu regulativen Instrumenten entfalten *ökonomische Instrumente* eine indirekte Steuerungswirkung, indem über finanzielle Anreize versucht wird, das Verhalten zu beeinflussen. Es sind Steuern und Abgaben, die bei der Produktion ansetzen und dazu genutzt werden, Preissignale an Produzenten und Verbraucher/innen zu senden. Entsprechende Instrumente zielen hauptsächlich darauf ab, die externen Effekte einzupreisen, die bei der Ressourcengewinnung und-nutzung sowie der Entsorgung nach der Nutzungsphase auftreten. Indem Primärrohstoffe (bzw. Produkte aus diesen) besteuert werden, lassen sich ggf. vorhandene Preisnachteile rezyklathaltiger Produkte gegenüber Neuware aus Primärrohstoffen ausgleichen. Im Unterschied zu den produktionsseitig belastenden ökonomischen Instrumenten belasten verbrauchsseitige Instrumente nicht die Produktion von Gütern oder Dienstleistungen, sondern setzen am Ende des Produktlebenszyklus an (Nutzung, Verwertung, Entsorgung). Beispiele für Instrumente in dieser Kategorie sind Verbrauchssteuern (z. B. Steuern auf Plastiktüten oder Zement), Abgaben/Gebühren (z. B. auf Verpackungen oder Elektro- und Elektronikgeräte) oder Pfandpflichten. Darüber hinaus zählen Maßnahmen zur Förderung der Nachfrage nach rezyklathaltigen Produkten im Rahmen der öffentlichen Beschaffung ebenfalls zu den zentralen ökonomischen Stellschrauben.

- › Um bestimmte Umweltziele zu verwirklichen, kann der Staat *kooperative Instrumente* einsetzen, um freiwillige Vereinbarungen mit Akteuren der Wirtschaft zu treffen. Der Fokus liegt auf dem Verhandlungsansatz, bei dem die beteiligten Akteure sich kooperativ auf ein einerseits machbares und andererseits effektives Zielniveau verständigen und Spielräume abstecken, wie bestimmte Ziele erreicht werden sollen. Beispiele sind Vereinbarungen über Mindesteinsatzquoten für Rezyklate mit derzeit verfügbaren Technologien und Rezyklatmengen. Dabei werden Produktgruppen und Quotenhöhe bestimmt. Auch Standards für ein recyclingfreundliches Produktdesign können mithilfe von freiwilligen Vereinbarungen etabliert werden. Darüber hinaus eignet sich das Instrument insbesondere, um informatorische Hemmnisse zu adressieren. Akteure, die normalerweise unabhängig voneinander auf dem Markt agieren (z. B. Hersteller und Recycler), können sich im Rahmen von freiwilligen Vereinbarungen zu Informationsbedarfen austauschen und gemeinsam Lösungen suchen. Die Maßnahmen setzen die Marktakteure anschließend weitgehend in Eigenverantwortung um. Dadurch bestehen gute Chancen, dass der gefundene Lösungsansatz von ihnen akzeptiert und mitgetragen wird.

Auf Basis der vorhandenen Sekundärliteratur und des jeweiligen Forschungsstandes werden im vorliegenden Bericht für jede Instrumentenkategorie (regulativ, ökonomisch, kooperativ) relevante Politikinstrumente zur Steigerung des Rezyklateinsatzes beschrieben und Anforderungen an die Umsetzung skizziert. Eingegangen wird auf den jeweiligen Stand der Einführung in Deutschland und es werden Praxisbeispiele aus dem Ausland vorgestellt. Außerdem wird die Einordnung in den Politikmix diskutiert sowie auf mögliche flankierende Maßnahmen hingewiesen, durch die etwaige Nebenwirkungen gemildert werden können.

Ergebnisse der Instrumentenanalyse

Aus einer ökonomischen Perspektive bremsen verschiedene Hemmnisse die Nutzung von Sekundärrohstoffen und führen zu einem Marktversagen. Drei Hemmnisse sind besonders relevant:

- › Negative Externalitäten, d. h. soziale sowie nicht eingepreiste Umweltwirkungen, entlang der Wertschöpfungskette verändern die relativen Preise auf dem Markt zugunsten von Primärmaterialien und zulasten von Sekundärrohstoffen.
- › Geteilte Anreize: Von kreislauffähigen Produkten sowie der Sammlung und Verarbeitung von Sekundärrohstoffen profitieren nur bestimmte Akteure, sodass oft kein übergreifendes Interesse besteht, gemeinsam optimierte Lösungen zu entwickeln und Vorgaben einzuhalten.
- › Informatorische Hemmnisse hindern Akteure daran, ressourcenschonende Lösungsansätze umzusetzen, da ihnen das Wissen zu Umweltwirkungen und Effizienzpotenzialen entlang der Wertschöpfungskette fehlt.

Die untersuchten Instrumententypen sind unterschiedlich gut geeignet, diese Hemmnisse spezifisch anzugehen. Während gesetzliche Produktstandards und die öffentliche Beschaffung je nach Ausgestaltung unterschiedliche Hemmnisse adressieren können, kommen ökonomische Instrumente besonders dafür infrage, die relativen Preisvorteile der ökologisch problematischen Nutzung von Primärmaterialien auszugleichen (negative Externalitäten). Kooperative Instrumente hingegen sind hauptsächlich zur Überwindung informatorischer Hemmnisse geeignet.

Beim Blick auf tatsächlich genutzte Instrumente in Deutschland fällt auf, dass Preissignale (wie z. B. Steuern auf Primärkunststoffe oder -baustoffe) wenig eingesetzt wurden und wenn doch, haben sie kaum eine Lenkungswirkung erzielen können (z. B. Beteiligungsentgelte für Verpackungen). Die Potenziale kooperativer Instrumente – in verbindlicher Form – wurden bislang gar nicht, diejenige der öffentlichen Beschaffung kaum ausgeschöpft. Zwar ermöglicht es die Rechtslage prinzipiell, Umweltwirkungen bei Beschaffungsentscheidungen zu berücksichtigen, jedoch sind die Verfahren unverbindlich und mit höheren Aufwänden verbunden, sodass sie in der Praxis kaum zur Anwendung kommen. Vorreiter ist Deutschland hingegen bei Pfandsystemen im Getränkebereich, die bereits Anfang der 2000er Jahre eingeführt wurden. Eine Ausdehnung der Pfandpflicht auf andere Produkte fand jedoch nicht statt.

Durch Produktstandards, ökonomische Instrumente etc. können Märkte für Sekundärrohstoffe geschaffen oder gestärkt werden, die Innovationswirkungen erzeugen. Die Transformation zur Kreislaufwirtschaft wird politisch intensiv diskutiert, viele Maßnahmen sind auch hierzulande auf der politischen Agenda oder zumindest im Gespräch. Mit einer dynamischen Weiterentwicklung des Steuerungsrahmens ist also zu rechnen. Zu vielen Instrumenten liegen in anderen Ländern bereits Erfahrungen vor, z. B. zu Primärbaustoffsteuern, Abgaben auf Müllverbrennung oder Deponierung, Besteuerung von Kunststoffverpackungen aus Primärkunststoff, Mindestquoten für den Rezyklateinsatz oder freiwillige Vereinbarungen mit verpflichtendem Charakter. Weitere Instrumente werden

in den kommenden Jahren aufgrund von EU-Vorgaben auch hierzulande eingeführt werden, z. B. Produktpass und Ökodesignvorgaben.

Wichtig erscheint bei der Einführung und Weiterentwicklung der Steuerungsmaßnahmen vor allem, in einem gut aufeinander abgestimmten Politikmix verschiedene Instrumente einzusetzen, die gezielt die bestehenden Hemmnisse für den Rezyklateinsatz angehen. Denn kein einzelnes Instrument ist in der Lage, alle bestehenden Hemmnisse zu adressieren und somit für sich allein eine substantielle Steigerung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen zu bewirken. Daher ist es erforderlich, in Kombinationen von Instrumenten zu denken. Da sich die jeweilige Ausprägung und das Ausmaß der Hemmnisse zudem nach Problemfeldern bzw. Materialströmen unterscheiden, muss ein Politikmix sehr differenziert den jeweiligen Spezifika von Materialien, Akteuren und dem Zeitverlauf Rechnung tragen: Während etwa bei Baumaterialien die negativen Externalitäten im Vordergrund stehen, geht es bei Hightechmaterialien wie Elektrogeräten vor allem darum, Hemmnisse für Innovationen bezüglich Sammlung und Recycling zu adressieren. Dabei sollten grundsätzlich solche Instrumente zum Zug kommen, die mit den größten Wirkungen und geringsten Kosten oder Nachteilen verbunden sind. Zudem können Wechselwirkungen zwischen Instrumenten, die sich gegenseitig verstärken, genutzt werden.

Übergreifende Handlungsfelder

Zu konstatieren ist, dass es bislang nur wenige Materialbereiche gibt, in denen das Schließen von Stoffkreisläufen schon relativ gut funktioniert. Beispiele hierfür sind Massenmetalle (Eisen, Kupfer etc.) sowie bestimmte Typen von Verpackungen (z. B. PET- und Glasflaschen). Aufgrund der Vielfalt der stoffstromspezifischen Rahmenbedingungen und der sehr unterschiedlichen Hemmnisse müssen Lösungsansätze für einen verbesserten Rezyklateinsatz sehr differenziert auf die einzelnen Abfallbereiche zugeschnitten sein. Traditionell wird dabei vor allem auf Innovationen im Bereich der Abfall- und Recyclingtechnik gesetzt. Deutschland gehört hier weltweit zu den Technologieführern und verfügt über eine starke Forschungs- und Entwicklungslandschaft. Neben der Entwicklung ganz neuer, innovativer Lösungen, z. B. für die Rückgewinnung gering konzentrierter Metalle, für die Befreiung der Abfälle von Fremdstoffen oder Additiven, die Trennung von Materialverbänden oder auch die Rückgewinnung der Grundbausteine von Kunststoffpolymeren (chemisches oder enzymatisches Recycling), müssen auch die bestehenden Verfahren effizienter und umweltfreundlicher gestaltet werden. Die Forschungsförderung hat sich des Themas angenommen und fördert technische Innovationen für eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft im Rahmen verschiedener Programme.

Förderprogramme zur Unterstützung der Forschungs- und Entwicklungsbemühungen in der Recyclingbranche und darüber hinaus sind zweifelsohne auch zukünftig unerlässlich. Es wäre jedoch deutlich zu kurz gegriffen, die Verbesserung des Rezyklateinsatzes primär als technische Optimierungsaufgabe aufzufassen. Die Analyse der Fallbeispiele im vorliegenden Bericht zeigt, dass die wesentlichen Stellschrauben für die Verbesserung des Rezyklateinsatzes nicht auf technischer, sondern auf rechtlicher sowie wirtschaftlicher Ebene liegen. So ist vieles an technischen Verbesserungen schon vorhanden (z. B. im Bereich moderner Sortiertechnologien bei Verpackungsabfällen), wird von den Unternehmen aber nicht umgesetzt, da keine ausreichende Investitionssicherheit gegeben ist. Um innovative Technologien und Prozesse für ein ressourceneffizientes und kreislauforientiertes Wirtschaftssystem in die Praxis zu überführen, bedarf es deshalb vor allem veränderter Rahmenbedingungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

Entwicklung eines geeigneten Politikmix

Bislang wird in Deutschland das sich bietende Repertoire an Politikinstrumenten nicht ausgenutzt. Um ausreichende Lenkungswirkungen zu entfalten, ist von zentraler Bedeutung, dass Instrumente gut ineinandergreifen und zusammengedacht werden. Der Politikmix sollte zu den ökonomischen auch informatorische und kooperative Instrumente und verbindliche Produktstandards enthalten, um die notwendige Wissensbasis für zirkuläre Wirtschaftskonzepte zu schaffen.

Ökonomische Instrumente können dafür genutzt werden, Fehlanreize wie negative Externalitäten oder die ungleiche Verteilung von Nutzen und Kosten bei der Abfallsammlung und -verwertung auszugleichen. Bis auf wenige Ausnahmen spielen sie zur Stärkung des Rezyklateinsatzes in Deutschland eher eine untergeordnete Rolle. Zu prüfen wäre, in welchen Bereichen die Einführung produktions- und verbrauchsseitig belastender ökonomischer Instrumente hierzulande sinnvoll sein könnte. Für die in den Fallstudien beleuchteten Abfallbereiche wäre etwa zu erwägen:

- › bei mineralischen Bauabfällen die Einführung einer Primärbaustoffsteuer zur Steigerung der Nachfrage nach Sekundärbaustoffen;
- › bei Kunststoffverpackungen durch eine deutlichere Gebührenstaffelung bei den Lizenzentgelten der dualen Systeme sowie eine Ausweitung von Pfandsystemen wirkungsvolle Anreize für ressourcenschonende und recyclingfähige Verpackungen zu setzen;
- › bei Elektrogeräten durch Einführung von Pfandsystemen und/oder einer vorgezogenen Recyclinggebühr Verbraucher/innen stärker zu animieren, ihre Altgeräte zurückzubringen und so einer hochwertigen Verwertung zuzuführen.

Im Unterschied zu ökonomischen Instrumenten werden *gesetzliche Vorgaben* in der Regel dazu eingesetzt, bestimmte Mindeststandards zu sichern. Zur Stärkung des Rezyklateinsatzes erscheinen hier Maßnahmen auf drei Ebenen besonders vielversprechend:

- › die Konkretisierung der Pflichten zur Produktverantwortung über produktspezifische Regelungen; Vorgaben zum kreislauffähigen Produktdesign (insbesondere Materialzusammensetzung, Demontage- und Recyclingfähigkeit) kommt dabei besondere Bedeutung zu;
- › die Festlegung verbindlicher Informations- und Kennzeichnungspflichten (z. B. zu den verwendeten Materialien) für bestimmte Abfallströme in Verbindung mit der konsequenten praxisorientierten Förderung digitaler Technologien (z. B. Sensorsysteme);
- › Regelungen zum Ende der Abfalleigenschaft von aufbereiteten Sekundärmaterialien. Hier wäre zu prüfen, welche Abfallbereiche neben mineralischen Ersatzbaustoffen – wofür eine Verordnung derzeit erarbeitet wird – vordringlich zu behandeln sind.

Die *Stärkung der Nachfrage* nach Rezyklaten ist für die Rückgewinnung hochwertiger Sekundärmaterialien essenziell. Verlässliche Absatzmärkte geben Akteuren Planungssicherheit und helfen dabei, Investitionen in moderne Infrastrukturen sowie Anpassungen von Produktionsabläufen anzureizen. Infrage kommen dafür vor allem Mindestrezyklatquoten sowie die öffentliche Beschaffung:

- › Die Einführung von Mindestrezyklatquoten setzt viel Wissen aufseiten des Gesetzgebers voraus, da die Verfügbarkeit von Rezyklaten in ausreichender Menge sowie die technische Machbarkeit gegeben sein müssen. Besonders sinnvoll erscheinen Mindestvorgaben für den Rezyklateinsatz für Beton sowie bei Kunststoffverpackungen.
- › Bei der öffentlichen Beschaffung wären verbindliche Vorgaben möglichst auch auf die Länder- und Kommunalebene auszuweiten. Ein Fokus sollte dabei vor allem auf den Bausektor gelegt werden, da die öffentliche Verwaltung in diesem Bereich einen großen Anteil an der Gesamtnachfrage ausmacht.

Mithilfe von *freiwilligen Vereinbarungen* zwischen staatlichen und wirtschaftlichen Akteuren können schließlich schneller Lösungsansätze erarbeitet und umgesetzt werden, die auch das erforderliche Detailwissen wirtschaftlicher Akteure berücksichtigen. Auch Grundlagen für die Entwicklung von verbindlichen Produktstandards und freiwilligen Gütesiegeln lassen sich so schaffen. Prinzipiell empfiehlt es sich, auch in Deutschland freiwillige Vereinbarungen gezielt einzusetzen, um zirkuläre Systeme zu fördern. Diese haben hierzulande jedoch keinen verpflichtenden Charakter und sind daher nicht wirkungsvoll genug, um die skizzierten Ziele zu erreichen. Um freiwillige Vereinbarungen mit einem stärker verbindlichen, ggf. vertraglichen Charakter (sowie Sanktionsmaßnahmen) einzuführen, wäre zunächst ihre Rechtskonformität zu prüfen. Eine Möglichkeit wäre, sich stärker am Format der niederländischen Green Deals zu orientieren. Dabei sollten Pilotprojekte und Erprobungsphasen ein integraler Bestandteil der Vereinbarungen sein.

Systematische Evaluierung von Politikmaßnahmen auf Basis aussagekräftiger Indikatoren

Überall in der EU und auch weltweit werden Instrumente entwickelt und eingesetzt, um die Mengen anfallender Abfälle zu reduzieren bzw. zu verwerten und den Einsatz von Rezyklaten zu steigern. Allerdings bestehen erhebliche Wissenslücken darüber, ob die Instrumente die erzielte Wirkung auch tatsächlich erreicht haben. Für ein Monitoring der Lenkungswirkungen von Politikmaßnahmen, die spezifisch auf eine Verbesserung des Rezykla-

teinsatzes abzielen, werden vor allem Statistiken zur tatsächlich genutzten Menge an Sekundärrohstoffen benötigt – aufgeschlüsselt nach Materialien/Produktgruppen. Dazu gibt es bislang jedoch keine aussagekräftigen Indikatoren, sodass eine evidenzbasierte Politikentwicklung kaum möglich ist. Erfolge der Kreislaufwirtschaft werden in der EU vor allem anhand von Recyclingquoten beurteilt, die jedoch keinerlei Aussagekraft hinsichtlich der tatsächlich genutzten Menge an Sekundärrohstoffen haben.

Erforderlich wäre deshalb die Entwicklung geeigneter Indikatoren, die den Erfolg der Kreislaufwirtschaft bzw. den tatsächlichen Rezyklateinsatz realistischer bemessen. In der Diskussion ist insbesondere die Einführung einer Substitutions- bzw. Rezyklateinsatzquote, welche die eingesetzte Menge Sekundärrohstoffe an der insgesamt nachgefragten Menge an Primär- und Sekundärrohstoffen auf Produkt- oder Rohstoffebene bestimmt. Zu prüfen wäre daher, welche Optionen es zur Einführung einer Substitutionsquote gibt und welche empirischen sowie methodischen Fragen für eine konsistente Berechnung zu klären wären. Dabei könnte auf bereits vorliegenden Untersuchungen aufgebaut werden. Eine Weiterentwicklung der bestehenden Abfallstatistik auf europäischer Ebene wäre grundsätzlich zu befürworten. Deutschland könnte aber auch mit gutem Beispiel vorangehen und auf nationaler Ebene verlässliche Datengrundlagen für ein Monitoring der Kreislaufwirtschaft schaffen.

Aufbau und Stärkung internationaler Kooperationen

Angesichts einer global hochgradig vernetzten Wirtschaft sowie der hohen Handelsintensität und Rohstoffabhängigkeit Deutschlands haben Maßnahmen zur Entwicklung der Kreislaufwirtschaft auf nationaler Ebene nur eine begrenzte Reichweite. Wichtig erscheint, auf internationaler Ebene darauf hinzuwirken – auch über den EU-Binnenmarkt hinaus –, dass ein möglichst klarer und einheitlicher Rahmen für die Erzeugung von und den Handel mit Rezyklaten geschaffen wird. Ansatzpunkte bieten sich auf folgenden Ebenen:

- › Über internationale Kooperationen (wie z.B. das bis Ende 2024 auszuarbeitende UN-Plastikabkommen) kann Einfluss auf das Design bzw. die Recyclingfähigkeit von Produkten genommen werden, die außerhalb der EU gehandelt werden.
- › Der internationale Handel von Abfällen könnte so reguliert werden, dass diese nur noch in Länder exportiert werden dürfen, die in der Lage sind, sie hochwertig zu recyceln und über ausreichende Kapazitäten für die Verwertung der importierten Abfälle verfügen. Hierfür wäre das Basler Übereinkommen⁶ in passender Weise weiterzuentwickeln.
- › Eine Möglichkeit zur Förderung von Sammlungs- und Verwertungsinfrastrukturen in Importländern bieten bilaterale Rohstoffpartnerschaften. Diese sollen als Instrument der Rohstoffstrategie der Bundesregierung der Versorgung der deutschen Industrie mit Rohstoffen dienen, aber auch einen nachhaltigen Umgang mit Rohstoffen fördern und einen entwicklungspolitischen Beitrag leisten. Sie könnten zum einen auf Länder erweitert werden, wo rohstoffhaltige Produkte als Abfall anfallen, und zum anderen verstärkt die produzierende Industrie und die Recyclingwirtschaft einbeziehen.

Schlussbemerkung

Bei der Erarbeitung von Strategien und Instrumenten zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes muss berücksichtigt werden, dass das Recycling und die Nutzung von Rezyklaten nur einen Baustein in einer ressourcenschonenden Kreislaufwirtschaft darstellen. Gemäß dem Leitbild der Abfallhierarchie ist das stoffliche Recycling nachrangig nach der Abfallvermeidung und Wiederverwendung einzuordnen. Das bedeutet, dass Maßnahmen zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes im Einklang gebracht und kombiniert werden sollten mit weiteren Kreislaufwirtschaftsstrategien, wie beispielsweise einer langen Nutzungsdauer von Produkten und Materialien oder durch ein Recht auf Reparatur.

Die damit verbundene grundlegende Umstellung des Wirtschaftsmodells ist eine äußerst herausfordernde Aufgabe, bei der für Steuerung und Rahmensetzung vor allem die Politik gefragt ist. Gebraucht werden sehr spezifische, kleinteilige Maßnahmen, die auf die relevanten Abfallströme zugeschnitten sind, sich dabei jedoch zu einem stimmigen, kohärenten Ganzen zusammenfügen müssen. Zu schaffen sein dürfte all das nur im Rahmen eines breiten, strategisch angelegten Politikansatzes, mit dem die Transformation zur Kreislaufwirtschaft nicht als ausschließlich umweltpolitische Angelegenheit aufgefasst wird, sondern alle Ressorts z. B. mit Sektorzielen in die

⁶ Basler Übereinkommen über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung vom 14.10.1994

Pflicht genommen werden. Mit der derzeit in Erarbeitung befindlichen Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie bietet sich die Chance, eine konsistente, ambitionierte Gesamtstrategie zur Kreislaufwirtschaft für Deutschland zu entwickeln, die sich an verbindlichen Zielen und klaren Indikatoren ausrichtet und alle Akteure an Bord holt, um einen systemischen Wandel zu vollziehen.

1 Einleitung

Mehr als 2,5 Mrd. t Abfall wurden 2020 in der EU produziert, davon allein in Deutschland 356 Mio. t (EP 2018; Statista o.J.a). Auch wenn seit 2016 eine Stabilisierung des Abfallaufkommens hierzulande festzustellen ist, wird in vielen Regionen der Welt ein weiterer erheblicher Anstieg bis 2050 prognostiziert. Wirtschaftliche Aktivitäten stellen zusammen mit dem Bevölkerungswachstum die Haupttreiber dieser Entwicklung dar. Denn wirtschaftliches Handeln sowie die Errichtung und Instandhaltung der dafür erforderlichen Infrastruktur hängen von einem permanenten Durchsatz an Rohstoffen ab, die für die Produktion von Gütern erforderlich sind. Während sich das Pro-Kopf-Bruttoinlandsprodukt zwischen 1970 und 2017 weltweit mehr als verdoppelt hat, wuchs der Materialverbrauch um rund zwei Drittel. Als einer der zehn größten Importeure von Primärmaterialien weltweit trägt Deutschland maßgeblich zu dieser Entwicklung bei.

Mit dem Materialverbrauch gehen negative ökologische Auswirkungen einher. Sie treten auf allen Stufen der Wertschöpfungskette auf: bei der Extraktion von Rohstoffen, der Herstellung von Gütern, dem Handel, der Nutzung sowie bei der Entsorgung von Produkten. Mit der weltweit wachsenden Nachfrage nach Materialien nehmen auch die negativen Folgen für die Umwelt zu. Der schonende Umgang mit natürlichen Ressourcen zählt deshalb zu den zentralen Zielen der Umweltpolitik. Aber auch aus wirtschaftspolitischer Sicht ist der hohe Materialverbrauch problematisch, da die Industrie in Deutschland auf die zuverlässige Verfügbarkeit von Ressourcen angewiesen ist. Die EU importiert etwa die Hälfte der von ihr verbrauchten Rohstoffe (Eurostat o.J.b). In Deutschland beträgt der Anteil der Importe am gesamten Rohstoffeinsatz rund 65 % (Jahr 2019; Lutter et al. 2022, S. 25). Mit dem Ausbau von Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien, von Speicherinfrastrukturen und mit dem verstärkten Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien bei gleichzeitiger Abkehr von fossilen Brennstoffen dürfte die Nachfrage nach kritischen Rohstoffen in den kommenden Jahren geradezu explodieren (Statista o.J.g). Für einzelne dieser Rohstoffe konzentriert sich fast die gesamte Produktion auf einzelne Länder. Bei 14 der 27 von der EU als kritisch identifizierten Rohstoffe ist Deutschland zu 100 % von Importen abhängig (Menkhoff/Zeevaert 2022).

Um die negativen Auswirkungen auf die Umwelt zu reduzieren und die Rohstoffsicherheit Deutschlands zu stärken, wird angestrebt, das Wirtschaftswachstum vom Materialeinsatz so weit wie möglich zu entkoppeln. Ein wichtiges Vorhaben dabei ist das Schließen von Stoffkreisläufen, wodurch Materialien länger im Wirtschaftskreislauf gehalten werden. Ziel ist es, Primärrohstoffe durch Sekundärrohstoffe (Rezyklate) zu substituieren. Allerdings wird bislang nur ein kleiner Teil der für die deutsche Wirtschaft benötigten Rohstoffe durch Sekundärrohstoffe gedeckt, wobei die Anteile je nach Materialart stark variieren (knapp 10 % für Kunststoffe bis 75 % für Glas; Statista o.J.b).

Ein genauer Blick auf die Recyclingstatistiken deutet an, dass für manche Abfallströme noch erhebliche Potenziale bei der werkstofflichen Verwertung vorhanden sind. Dies gilt beispielsweise für Textilien, Kunststoffe oder Elektro- und Elektronikaltgeräte, einen der am schnellsten wachsenden Abfallströme Europas. Je nach Abfallstrom und vorgesehener Anwendung der Rezyklate bestimmen unterschiedliche Faktoren den Grad der Rückgewinnung der einzelnen Stoffe und Materialien. Beispielsweise bremst die technische Machbarkeit den Ausbau von Recyclinginfrastrukturen für Alttextilien. Der komplexe Aufbau von Elektro- und Elektronikaltgeräten erschwert das Recycling der enthaltenen Metalle, während hohe Personalkosten die Rückgewinnung von Kunststoffen aus Altfahrzeugen erschweren. An Kunststoffrezyklate, die in Lebensmittelverpackungen eingesetzt werden sollen, werden wiederum besonders hohe Qualitätsansprüche gestellt.

Für die Transformation zur Kreislaufwirtschaft ist eine Verbesserung des Rezyklateinsatzes entscheidend. Dafür werden Maßnahmen erforderlich sein, die spezifisch auf die Situation bei den verschiedenen Stoffströmen zugeschnitten sind. Allerdings stellt sich auch die Frage, welche übergreifenden Faktoren und Rahmenbedingungen die Produktion und den Einsatz von Rezyklaten hemmen und mit welchen Strategien und Instrumenten diese Hemmnisse überwunden werden können. Vor diesem Hintergrund wurde das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) vom Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages beauftragt, ein TA-Projekt zum Thema »Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes« durchzuführen.

Ziel und Struktur des Berichts

Ziel des vorliegenden Berichts ist es, einen breiten und differenzierten Überblick über relevante Rahmenbedingungen und typische Hemmnisse für den Einsatz von Sekundärrohstoffen zu geben und daraus vielversprechende Strategien und Instrumente abzuleiten, mit denen eine Verbesserung des Rezyklateinsatzes erreicht werden kann.

In Kapitel 2 werden allgemeine Grundlagen und Rahmenbedingungen zirkulären Wirtschaftens behandelt. Vorgestellt werden Politikstrategien der EU und Deutschlands, die sich mit der Kreislaufwirtschaft befassen, sowie die dahinterliegenden Ziele. Anschließend folgt ein Überblick über grundlegende rechtliche Rahmenbedingungen im Bereich Kreislaufwirtschaft, bevor prinzipielle Ansatzpunkte und Hemmnisse für eine Verbesserung des Rezyklateinsatzes entlang der Wertschöpfungskette diskutiert werden.

Die Erfolgchancen für die Gewinnung sowie den Einsatz von Rezyklaten hängen stark von materialspezifischen Eigenschaften der einzelnen Abfallströme und den sich daraus ergebenden technischen Anforderungen an Recyclingprozesse, aber auch von stoffstromspezifischen Rahmenbedingungen ab. Deshalb werden in Kapitel 3 drei relevante Produkt- bzw. Abfallbereiche fallstudienartig analysiert:

- › Kunststoffverpackungen machen etwa 39% der Kunststoffabfälle aus, werden allerdings nur zu etwa 60% recycelt. Ihre Produktion und nicht fachgerechte Entsorgungen gehen mit hohen Umweltbelastungen einher. Neben der heterogenen Zusammensetzung der Abfälle ist es vor allem der hohe Verunreinigungsgrad, der eine hochwertige stoffliche Verwertung erschwert.
- › Elektro- und Elektronikabfälle gehören zu den am schnellsten wachsenden Abfallströmen. Das Recycling der im Elektroschrott enthaltenen Metalle ist rohstoffpolitisch von großer Bedeutung, aber technisch eine Herausforderung. Denn die komplex aufgebauten Elektrogeräte enthalten zwar viele wertvolle Metalle, jedoch nur in geringen Mengenanteilen.
- › Mineralische Bauabfälle bilden die mengenmäßig größte Abfallgruppe in Deutschland. Bislang gelingt es nicht in ausreichendem Maße, durch hochwertiges Recycling dieser Abfälle den primären Rohstoffbedarf des Bausektors – und mithin auch dessen großen ökologischen Fußabdruck – zu senken.

Zunächst werden die jeweiligen Stoffströme sowie Sammel- und Recyclingquoten quantifiziert und relevante Rahmenbedingungen für Abfallentsorgung und -verwertung beschrieben, anschließend der Stand der Technik beim Recycling und innovative Verfahren dargestellt. Die Fallstudien enden jeweils mit einer Darstellung wesentlicher Herausforderungen für den Einsatz von Sekundärrohstoffen sowie zentraler Handlungsfelder für eine perspektivische Verbesserung des Rezyklateinsatzes.

In Kapitel 4 werden anknüpfend an die stoffstromspezifischen Betrachtungen in den Fallbeispielen instrumentelle Möglichkeiten zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes übergreifend systematisiert und diskutiert. Analysiert werden die Potenziale regulativer, ökonomischer sowie kooperativer Instrumente. Auf Basis der vorhandenen Sekundärliteratur und des jeweiligen Forschungsstandes werden relevante Politikinstrumente zur Steigerung des Rezyklateinsatzes beschrieben und Anforderungen an die Umsetzung skizziert. Eingegangen wird auf den jeweiligen Stand der Einführung in Deutschland und es werden Praxisbeispiele aus dem Ausland vorgestellt. Außerdem wird die Einordnung in den Politikmix diskutiert sowie auf mögliche flankierende Maßnahmen hingewiesen, durch die etwaige Nebenwirkungen abgemildert werden können.

In Kapitel 5 werden abschließend die zentralen Ergebnisse resümiert, wichtige Handlungsfelder identifiziert und politische Optionen aufgezeigt, wie mit den anstehenden Herausforderungen umgegangen werden kann.

Zusammenarbeit mit Gutachtern und Danksagung

Zur fachlichen Fundierung des vorliegenden TA-Berichts wurden vier Gutachten vergeben:

- › Technikrends und Entwicklungsmöglichkeiten für einen verstärkten Einsatz von Rezyklaten (Themenfeld 1: Kunststoffverpackungen). Mathias Seitz, Beate Langer, Uwe Saueremann, Markus Klätte; Steinbeis GmbH & Co. KG für Technologietransfer, Stuttgart, Steinbeis-Transferzentrum Ressourcen-Technologie und Management, Halle

- › Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes; Themenfeld 3: Elektro- und Elektronikabfälle. Dr. Simone Raatz, Dr. Adam Balinski, Dr. Stefan Dirlich; Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechologie (HIF), Dresden
- › Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes. Themenfeld: Bauabfälle. Nadine Muchow, Florian Knappe, Joachim Reinhardt; ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH, Heidelberg/Berlin
- › Politikinstrumente zur Steigerung des Einsatzes von Rezyklaten. Mandy Hinzmann, Linda Mederake, Klaus Jacob, Hannes Schritt; Ecologic Institut, Berlin

Die Verantwortung für die Auswahl, Strukturierung und Interpretation der Gutachtenergebnisse liegt bei der Autorin, Dr. Pauline Rioussel, und dem Autor, Dr. Christoph Kehl, des vorliegenden Berichts. An dieser Stelle sei den Gutachter/innen für die Bereitschaft zur Kooperation und Kommunikation herzlich gedankt. Dank gebührt ebenfalls Dr. Matthias Achternbosch, Dr. Christoph Revermann und Dr. Arnold Sauter für Durchsicht und Kommentierung von Entwurfsversionen sowie Carmen Dienhardt und Brigitta-Ulrike Goelsdorf für die redaktionelle Bearbeitung des Manuskripts und die Erstellung des Layouts.

2 Zirkuläres Wirtschaften: Grundlagen und Rahmenbedingungen

Angesichts steigender Abfallmengen und hoher Rohstoffverbräuche gilt der effizientere Umgang mit Ressourcen und Energie als eine der drängendsten Aufgaben moderner Gesellschaften auf dem Weg in eine nachhaltige Zukunft. Zunehmend richtet sich das Augenmerk dabei auf eine deutliche bessere Aufbereitung und Wiedernutzung sekundärer Rohstoffe in neuen Produkten. Abfälle als wertvolle Ressourcen zu betrachten, die möglichst wieder nutzbar gemacht und also nicht einfach weggeworfen werden, ist der Grundgedanke der Kreislaufwirtschaft, deren Grundlagen und Rahmenbedingungen im Folgenden dargelegt werden. In Kapitel 2.1 werden Politikstrategien der EU und Deutschlands vorgestellt, die sich mit der Kreislaufwirtschaft befassen, sowie die dahinterliegenden Ziele besprochen. Anschließend folgt ein Überblick über grundlegende rechtliche Rahmenbedingungen (Kap. 2.2), bevor Ansatzpunkte und Hemmnisse für eine Verbesserung des Rezyklateinsatzes entlang der Wertschöpfungskette diskutiert werden (Kap. 2.3).

2.1 Warum Kreislaufwirtschaft? Ziele und Herausforderungen

Der nicht nachhaltige Umgang mit natürlichen Ressourcen und die damit zusammenhängenden Umweltprobleme rückten spätestens zu Beginn der 1970er Jahre – als der Club of Rome auf die materiellen Grenzen des Wachstums aufmerksam machte – in das gesellschaftliche Bewusstsein. In den politischen Fokus geriet damit auch die Abfallproblematik. 1972 wurde in Deutschland erstmals mit dem Abfallbeseitigungsgesetz⁷ ein bundeseinheitliches Abfallrecht geschaffen und damit die Abfallbeseitigung zu einer öffentlichen Aufgabe des Umweltschutzes gemacht (Thärichen 2022, S. 34 ff.). Der Schwerpunkt lag dabei jedoch noch auf der *Beseitigung* und *Entsorgung* von Abfällen. Erst allmählich in den 1980er Jahren und endgültig dann mit dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG)⁸ von 1994 fand eine Neufokussierung auf die *Abfallverwertung* statt. Abfälle wurden damit auch auf rechtlicher Ebene als zu nutzende Ressource betrachtet, die möglichst wieder in den Wirtschaftskreislauf zurückgeleitet werden sollen.

Die zugrundeliegende Idee einer Kreislaufwirtschaft wurde u. a. von den Umweltökonominnen Pearce und Turner (1989) Anfang der 1990er Jahre propagiert. Indem versucht wird, Ressourcen und Materialien im Wirtschaftskreislauf zu halten und endliche Ressourcen damit möglichst effizient zu nutzen, stellt die Kreislaufwirtschaft das Gegenmodell zu dem linearen Wirtschaften dar, das sich in industriellen Gesellschaften standardmäßig entwickelt hatte

⁷ Gesetz über die Beseitigung von Abfällen (Abfallbeseitigungsgesetz – AbfG)

⁸ Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG), 2012 außer Kraft gesetzt

und u. a. für den steigenden Ressourcenverbrauch und die wachsenden Abfallmengen verantwortlich gemacht wird. Im Zuge politischer Zielsetzungen, Klimaneutralität bis spätestens 2050 zu erreichen, gewann der effiziente und sparsame Umgang mit natürlichen Ressourcen erneut an Aktualität und ist heute Gegenstand von Strategien sowohl der Europäischen Kommission als auch der Bundesregierung.

So wurde 2020 auf der EU-Ebene der *zweite EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft* als wichtiger Teil des europäischen Grünen Deals verabschiedet, der den strategischen Fahrplan zur Klimaneutralität im Jahr 2050 definiert. Der Aktionsplan hat zum Ziel, »das Wirtschaftswachstum von der Ressourcennutzung zu entkoppeln«, und soll damit die klimaneutrale Umgestaltung der europäischen Wirtschaft vorantreiben (Ballester/Zaroffe 2022). Dem liegt ein breites Verständnis von Kreislaufwirtschaft zugrunde, das nicht nur die Abfallwirtschaft, sondern alle Phasen der Wertschöpfung insbesondere der produzierenden Industrie einschließt (Oexle/Lammers 2022, S. 165 f.). Vorgeschlagen werden ehrgeizige Maßnahmen in verschiedenen Handlungsfeldern, die u. a. die Bereiche nachhaltige Produktpolitik, Abfallpolitik sowie Schaffung eines gut funktionierenden EU-Marktes für Sekundärrohstoffe umfassen (EK 2020a). Konkret sollen bis 2030 der Beitrag kreislauffähiger verwendeter Materialien zur Deckung der Rohstoffnachfrage (Indikator CMU; Kap. 2.3) verdoppelt und die Menge der (nicht recycelten) Restsiedlungsabfälle halbiert werden. Um die Kreislauffähigkeit von Produkten zu erhöhen, wird auf eine nachhaltige Produktpolitik besonderer Wert gelegt. Schwerpunkt des Aktionsplans bilden sieben, als besonders relevant identifizierte Produktwertschöpfungsketten oder Stoffströme – Elektronik und IT, Batterien und Fahrzeuge, Verpackungen, Kunststoffe, Textilien, Bauwirtschaft sowie Lebensmittel und Nährstoffe –, zu denen Maßnahmen über den gesamten Produktzyklus hinweg angekündigt werden.

Eine Strategie, die explizit auf die Beförderung zirkulären Wirtschaftens ausgerichtet ist, existiert in Deutschland bislang nicht. Eine Stärkung der Kreislaufwirtschaft wird jedoch im Rahmen des *Deutschen Ressourceneffizienzprogramms III* (ProgRess III) (BMU 2020b), die in der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie verankert ist, zumindest als Teilziel verfolgt. Bei ProgRess III handelt es sich um die zweite Fortschreibung des 2012 initiierten Programms, das der nachhaltigen Nutzung und dem Schutz der natürlichen Ressourcen gewidmet ist. Identifiziert werden Möglichkeiten entlang der gesamten Wertschöpfungskette – »also von der Rohstoffgewinnung über Produktgestaltung, Produktion und Konsum bis hin zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen« (BMU 2020b, S. 27) –, die zur Steigerung der Ressourceneffizienz beitragen sollen. Insgesamt werden 118 Maßnahmen definiert, von denen 16 sich direkt auf die Kreislaufwirtschaft beziehen und den Themen Abfallvermeidung, Wiederverwendung und Vorbereitung zur Wiederverwendung, Verwertung von Abfällen sowie Nachhaltiges Management des anthropogenen Lagers zugeordnet sind. Neben Ansatzpunkten entlang der Wertschöpfungskette werden auch drei Alltags- und Wirtschaftsbereiche vertieft betrachtet, die für den Weg in eine ressourcenschonende Gesellschaft wichtig sind, nämlich »Bauen, Arbeiten und Wohnen«, »Mobilität« sowie »Digitalisierung der Gesellschaft«.

Neben ProgRess III weisen noch diverse andere Strategien der Bundesregierung Bezüge zum Thema Kreislaufwirtschaft auf, die jedoch lediglich auf einzelne Aspekte einer Kreislaufwirtschaft hinweisen. Zu nennen sind etwa die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie, die Rohstoffstrategie, das Abfallvermeidungsprogramm des Bundes unter Beteiligung der Länder, das Nationale Programm für nachhaltigen Konsum oder die Zukunftsstrategie Forschung und Innovation. Kritisiert wird, dass durch die verschiedenen strategischen Ansätze kein »konsistentes Gesamtbild« entstehe, wie Deutschland die Transformation zur Kreislaufwirtschaft angehen möchte (Wilts 2021, S. 10). Dies könnte sich jedoch absehbar ändern. Denn die Bundesregierung hat angekündigt, »Ziele, grundlegende Prinzipien und strategische Maßnahmen zum zirkulären Wirtschaften aus allen relevanten Strategien« im Rahmen einer *Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie* zu bündeln, die derzeit am Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV o.J.c) erarbeitet wird und 2024 fertiggestellt werden soll. Explizit soll der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie ein Konzept der Kreislaufwirtschaft zugrunde gelegt werden, das sich – anders als etwa das engere, auf Abfallvermeidung und -verwertung beschränkte Verständnis in ProgRess III (BMU 2020b, S. 14) – an dem breiten Leitbild des EU-Aktionsplans orientiert und »alle Phasen von Material- und Produktlebenszyklen betrachtet« (BMUV o.J.c).

Eine übergreifende Strategie ist nicht nur aus konzeptionellen Gründen wichtig, sondern auch deshalb, weil die übergeordneten politischen Ziele, zu denen die Kreislaufwirtschaft beitragen soll, sehr breit gefächert sind (Wilts 2016, S. 9):

- › *Umweltschutz:* Sowohl die Rohstoffgewinnung⁹ am Anfang der Wertschöpfungskette als auch die nicht fachgerechte Entsorgung oder der Export der Abfälle am Ende haben negative Folgen für Natur und Umwelt. Der Rohstoffabbau ist mit massiven, teils irreversiblen Eingriffen in Ökosysteme verbunden, außerdem können dabei toxische Stoffe freigesetzt werden (z.B. bei der Erzgewinnung) (Lutter et al. 2022, S. 56 f.). Deutschland ist beim Großteil der Rohstoffe, insbesondere bei Metallerzen und fossilen Rohstoffen (Lutter et al. 2022, S. 30), auf Importe aus dem Ausland angewiesen – dabei meist aus Ländern, die über keine hohen Umwelt- oder Arbeitsschutzstandards verfügen. Bei der nicht fachgerechten Entsorgung von Abfällen stellt aktuell besonders Kunststoffmüll ein globales Problem dar, da Kunststoffe kaum abbaubar sind und sich als Mikroplastik in der Umwelt ansammeln (Huber-Humer 2020).¹⁰ Die Transformation zur Kreislaufwirtschaft soll dazu beitragen, die geschilderten Auswirkungen zu lindern, indem durch sparsamere, effizientere Nutzung von Ressourcen und die Schaffung möglichst geschlossener Materialkreisläufe sowohl die Bedarfe an Primärrohstoffen als auch die Abfallmengen reduziert werden (UBA o.J.a).
- › *Klimaschutz:* Die EU stellt mit dem Grünen Deal die Kreislaufwirtschaft in den Mittelpunkt ihrer Anstrengungen zur Klimaneutralität und auch die Bundesregierung betont in ProgRes III den Beitrag der Ressourceneffizienz zur Erreichung der Klimaschutzziele. Bereits Gewinnung und Verarbeitung natürlicher Ressourcen verursachen erhebliche Treibhausgasemissionen, die laut dem International Resource Panel der Vereinten Nationen ungefähr die Hälfte der weltweiten Emissionen ausmachen (IRP 2020, S. 27). Hinzu kommen die Emissionen, die durch die industrielle Weiterverarbeitung der Rohstoffe, Materialien und Produkte entstehen. Von einer konsequenten Anwendung des Kreislaufprinzips in Produktionsprozessen erhofft man sich durch einen effizienteren Umgang mit Ressourcen und durch Materialeinsparungen in Produktionsprozessen (z.B. durch nachhaltiges Produktdesign) eine erhebliche Senkung der CO₂-Emissionen – die auch deshalb erforderlich ist, weil die Dekarbonisierung der Wirtschaft selbst einen zusätzlichen Rohstoff-, Material- und Energieeinsatz bedingt (BMU 2020b, S. 7). Zu beachten ist dabei jedoch, dass das Recycling von Wertstoffen mit einem großen Energieaufwand und zusätzlichen Umweltbelastungen verbunden sein kann.
- › *Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit:* Ein effizienteres Wirtschaften, wie es durch eine kreislauforientierte Wirtschaftsweise unterstützt wird, trägt nicht nur zur Einsparung von Treibhausgasemissionen bei, sondern kann auch wirtschaftliche Chancen eröffnen. Diese entstehen zum einen durch direkte Kostensenkungen, die durch einen sparsameren Ressourceneinsatz erzielt werden können. Zum anderen enthalten Abfälle wertvolle Rohstoffe, die durch ein hochwertiges Recycling im Wirtschaftskreislauf gehalten werden können, was sich auch gesamtwirtschaftlich in höherer Wirtschaftsleistung und Beschäftigung auszahlen soll (UBA 2010, S. 6). Insgesamt ist ein wichtiges politisches Ziel, durch den Wandel hin zu einer Kreislaufwirtschaft das Wirtschaftswachstum vom Rohstoffeinsatz zu entkoppeln und so »grünes Wachstum« anzuregen.
- › *Sichere Rohstoffversorgung:* Deutschland ist – wie zuvor dargelegt – in vielen Rohstoffbereichen auf Importe angewiesen. Die dadurch entstehenden Abhängigkeiten werden durch Digitalisierung sowie Dekarbonisierung noch verstärkt, da diese Entwicklungen den Bedarf insbesondere an Metallen wie Lithium und Kobalt (etwa für die Herstellung von Energiespeichern; (ifo Institut 2022; KU Leuven 2022) massiv erhöhen. Nicht zuletzt angesichts zunehmender geopolitischer Spannungen wird als dringend notwendig erachtet, Maßnahmen zu ergreifen, um strategische Rohstoffabhängigkeiten zu reduzieren.¹¹ Dazu gehört das Recycling, das dazu beitragen kann, durch Substitution mit Rezyklaten den Bedarf an Primärrohstoffen perspektivisch zu senken. Aber auch langlebigere Produkte, die repariert, wiederverwertet und wiederverwendet werden können, sollen dabei helfen, den Rohstoffeinsatz und damit die Abhängigkeit von Rohstoffimporten zu reduzieren.

Ob und in welchem Umfang sich die genannten Ziele realisieren lassen, hängt stark von der konkreten Umsetzung der Kreislaufwirtschaft ab. Hier können verschiedene Wege eingeschlagen werden, je nachdem, wie die drei Hauptelemente zirkulären Wirtschaftens – Reduktion des Ressourcenverbrauchs, Wiederverwendung von Produkten und Materialien und Verwertung von Abfällen – priorisiert werden. Bislang lag der Schwerpunkt bei der

⁹ In Deutschland werden jährlich ca. 337 Mio. t Rohstoffe importiert sowie 1 Mrd. t Rohstoffe der Natur entnommen (Lutter et al. 2022, S. 14).

¹⁰ In Deutschland fielen 2019 353 Mio. t Kunststoffabfälle an, davon wurden 1,1 Mio. t exportiert, darunter 0,38 Mio. t in Nicht-OECD-Staaten (Lutter et al. 2022, S. 33).

¹¹ Laut einer Analyse des ifo Institut (2022) ist dies bei den Rohstoffen Cobalt, Bor, Silicium, Graphit, Magnesium, Lithium, Niob, Seltene Erden, Titan besonders prioritär, da sie für viele Schlüsseltechnologien benötigt werden und gleichzeitig große Abhängigkeiten von wenigen Exportländern bestehen.

Umsetzung vor allem auf dem Recycling bzw. dem Abfallmanagement (Wilts/von Gries 2017), also dem Schließen von Stoffkreisläufen. Im Gegensatz dazu ist es nicht gelungen, den gesamtwirtschaftlichen Verbrauch an Ressourcen sowie die Abfallmengen maßgeblich zu reduzieren. Auch fehlen einheitliche quantitative Ziele oder Indikatoren zur Messung der Abfallvermeidung in der EU (EEA 2023b).

Die Konzentration auf das Ende der Wertungskette ist insofern problematisch, als für das hochwertige Recycling von Abfällen (inklusive Sammlung und Sortierung) – je nach Stoffstrom und Recyclingverfahren –, erstens ein erheblicher *logistischer, infrastruktureller und technischer Aufwand* zu betreiben ist. Das kann so weit führen, dass hochwertiges Recycling zu einem wirtschaftlich vertretbaren Aufwand nicht mehr realisierbar ist und/oder die produzierten Sekundärrohstoffe einen größeren ökologischen Rucksack mit sich führen als die Primärrohstoffe, die sie substituieren sollen (z. B. Lebensmittelverpackungen unter bestimmten Bedingungen). Zweitens ist mit *Reboundeffekten* zu rechnen: So kann das Forcieren von Recyclinglösungen den Ressourcenverbrauch unter bestimmten Bedingungen sogar erhöhen, beispielsweise indem der Konsum von Einwegprodukten steigt und nachhaltigere Mehrwegprodukte aus dem Markt gedrängt werden (Kwon 2023). Zu beachten ist drittens, dass in Recyclingprozessen *Materialverluste* technisch bedingt unvermeidlich sind (Reuter 2018), sodass vollständig geschlossene Stoffkreisläufe letztlich eine bloße Vision bleiben werden.

Während sich das Abfallmanagement ausschließlich auf Sammlung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen konzentriert, liegt der Fokus moderner Konzepte der Kreislaufwirtschaft (wie sie auch dem EU-Aktionsplan zugrunde liegen) auf dem umfassenden Ressourcenschutz und beruht auf der Erkenntnis, dass Recycling nicht ausreichend sein wird, um Material- und Stoffkreisläufe zu schließen (Ellen MacArthur Foundation 2021). Recycling bleibt fraglos auch zukünftig ein zentrales Element einer Kreislaufwirtschaft, andere Stellschrauben wie die Wiederverwendung von Produkten sowie z. B. die Verlängerung der Produktlebensdauer und ein nachhaltiges Produktdesign gewinnen jedoch ressourcenpolitisch an Bedeutung. Als hinderlich für die Beförderung von Abfallvermeidung und Wiederverwendbarkeit von Produkten können sich jedoch die umfangreichen Infrastrukturen erweisen, die in den letzten Jahrzehnten für Abfallentsorgung und Recycling aufgebaut wurden und durch die Lock-in-Effekte entstehen und Pfadabhängigkeiten geschaffen werden (Syberg 2022; Wilts/von Gries 2017).

Das verweist darauf, dass ökologische und ökonomische Ziele zirkulären Wirtschaftens nicht immer kongruent sein müssen. Einmal getätigte Investitionen legen Produktions- und Verhaltensmuster zumindest für den Zeitraum fest, bis diese abgeschrieben sind und im Rahmen neuer Investitionszyklen ersetzt werden können (Hinzmann et al. 2022, S. 14). Dies betrifft Infrastrukturen der Entsorgungsbranche, die auf eine thermische Verwertung von Abfällen befördern (z. B. Müllverbrennungsanlagen), aber auch Produktionstechnologien und Produktdesigns von Herstellern, die nicht nachhaltig sind (z. B. aufgrund mangelnder Reparierbarkeit). Die Aufwände dafür sind nicht rückgängig zu machen – Infrastrukturen, Produktionstechnologien, das Wissen zu Produktdesigns oder Qualifikationen können nicht wieder verkauft werden. Somit ist die Transformation in Richtung geschlossener Stoffkreisläufe unter Umständen mit hohen Betriebskosten und Innovationsbedarfen verbunden, was die Umstellung behindern kann. Dabei darf nicht nur das Schließen von Stoffkreisläufen und die Abfallverwertung im Vordergrund stehen, da dies nicht immer der nachhaltigste und ressourcenschonendste Weg ist. Stattdessen sollte die Optimierung von Stoffkreisläufen aus einer systemischen Perspektive erfolgen, die den gesamten Wertschöpfungszyklus berücksichtigt. Entsprechend ist nicht nur der Abfallsektor an diesem Prozess zu beteiligen, sondern es sind auch Produkthersteller, Handel und Konsument/innen einzubeziehen. Was früher klassische Aufgabe der Kommunen war – nämlich das Abfallmanagement –, ist zur sektorübergreifenden Aufgabe einer Vielzahl von Akteuren geworden.

2.2 Grundlegende rechtliche Rahmenbedingungen

Da die Kreislaufwirtschaft als gesamtwirtschaftliches Modell alle Branchen und Wirtschaftszweige einschließt, ist sie durch eine Vielzahl von Gesetzen und Verordnungen geprägt. Traditionell im Vordergrund steht dabei das ausdifferenzierte Abfallrecht (Entsorgung und Verwertung von Abfällen), hinzu kommen aber verstärkt auch Regelungen zur Produktgestaltung – entsprechend der Maßgabe, dass eine moderne Kreislaufwirtschaft den gesamten Produktkreislauf im Blick haben muss. Die EU ist dabei die »Taktgeber[in]« (Wilts 2021, S. 10) und setzt durch eine Reihe von Richtlinien und Verordnungen den maßgeblichen rechtlichen Rahmen. Abfallrechtlich ist das die Richtlinie 2008/98/EG¹² (nachfolgend Abfallrahmenrichtlinie) von 2008, die mit dem KrWG in deutsches

¹² Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, die zuletzt durch die Richtlinie (EU) 2018/851 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle am 14.6.2018 geändert wurde

Recht umgesetzt wurde. Neben diesen allgemeinen Vorschriften zum Umgang mit Abfällen wurden für diverse Produkt- und Abfallbereiche spezifische Regelungen erlassen (beispielsweise für Gewerbe- und Verpackungsabfälle, Elektronikaltgeräte, Altbatterien etc.). Weiterhin gibt es diverse Vorschriften zur Abfallbehandlung, etwa zur Deponierung von Abfällen (festgelegt in der Deponieverordnung – DepV¹³) (BMUV o.J.c).

Durch den Grünen Deal, der auf EU-Ebene initiiert wurde, sind die rechtlichen Grundlagen zur Kreislauf- und Abfallwirtschaft aktuell durch eine große Dynamik geprägt. Im Folgenden wird zum einen das KrWG vorgestellt, das die allgemeinen Prinzipien und Grundsätze zur Entsorgung und Verwertung von Abfällen definiert; eine letzte größere Novellierung des KrWG erfolgte 2020, anlässlich der 2018 geänderten Abfallrahmenrichtlinie. Zum anderen wird dargelegt, welche rechtlichen Regelungen Anforderungen enthalten, die bei der Produktgestaltung zu berücksichtigen sind.

2.2.1 Entsorgung und Verwertung von Abfällen – das Kreislaufwirtschaftsgesetz

1994 wurde durch den Deutschen Bundestag das KrW-/AbfG erlassen, welches das alte Abfallgesetz ersetzte (dazu und zum Folgenden Raatz et al. 2022a, S. 11). Das Konzept der Kreislaufwirtschaft wurde damit abfallrechtlich verankert, was bedeutete, dass die Abfallwirtschaft nun nicht mehr nur »die umweltverträgliche Beseitigung von Abfällen«, sondern auch »die Schonung der natürlichen Ressourcen« als Aufgabe anzustreben hatte (§ 1 KrW-/AbfG). Schon in dieser Fassung wurde die Produktverantwortung durch den Hersteller betont, der seine Produkte »möglichst so zu gestalten [hat], dass bei deren Herstellung und Gebrauch das Entstehen von Abfällen vermindert wird und die umweltverträgliche Verwertung und Beseitigung der nach deren Gebrauch entstandenen Abfälle sichergestellt ist« (§ 22 KrW-/AbfG). Außerdem wurde die duale Entsorgungsordnung etabliert, die auch heute noch gilt und besagt, dass Abfallerzeuger und -besitzer grundsätzlich selbst zur Entsorgung verpflichtet sind – neben der öffentlichen Abfallentsorgung (primär zuständig für Haushaltsabfälle) entwickelte sich so ein privater Entsorgungsmarkt (insbesondere für gewerbliche Abfälle) (Thärichen 2022, S. 39 ff.).

Das KrW-/AbfG wurde 2012 vom KrWG abgelöst, das die Vorgaben der Abfallrahmenrichtlinie ins deutsche Recht umsetzt und regelt, wie Abfälle zu entsorgen oder zu verwerten sind. Erklärter Zweck des Gesetzes ist es, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen (§ 1 KrWG). Dabei wird Kreislaufwirtschaft definiert als »Vermeidung und Verwertung von Abfällen« (§ 3), was zeigt, dass das aktuell gültige rechtliche Verständnis eher eng gefasst und nach wie vor stark abfallwirtschaftlich geprägt ist.

¹³ Deponieverordnung vom 27.4.2009, zuletzt geändert am 9.7.2021

Abb. 2.1 Die 5-stufige Abfallhierarchie nach § 6 KrWG am Beispiel der Bau- und Abbruchabfälle



Quelle: Muchow et al. 2022, S. 61; WEEE Forum 2020

Abbildung 2.1 zeigt am Beispiel von Bau- und Abbruchabfällen die Abfallhierarchie (§ 6 KrWG), die es bei der Abfallbewirtschaftung zu beachten gilt (Muchow et al. 2022, S. 61): Abfälle (im Sinne des § 3 Abs. 1 KrWG) sind zu vermeiden. Sofern eine Vermeidung nicht möglich ist, hat der Abfallerzeuger oder der Abfallbesitzer die Abfälle zu verwerten (§ 7 Abs. 2 bis 4 KrWG). Die Verwertung umfasst prioritär die Vorbereitung zur Wiederverwendung, gefolgt von Recycling und sonstiger, insbesondere energetischer Ressourcennutzung. Erst dann sind die Abfälle auf einer Deponie zu beseitigen (§ 15 Abs. 1 KrWG). Für die Vorbereitung zur Wiederverwendung und das Recycling von Siedlungsabfällen legt das KrWG quantitative Ziele fest, die teilweise schärfer sind als die europäischen Vorgaben (§ 14). So sind aktuell mindestens 50 Gewichts-% und ab dem 2025 mindestens 55 Gewichts-% der Siedlungsabfälle zu recyceln. Die Quote soll bis 2035 auf 65% steigen.

Weitere wichtige Prinzipien zum Umgang mit Abfällen, die im KrWG definiert sind, betreffen Kriterien für das Ende der Abfalleigenschaft (§ 4), das Gebot der getrennten Sammlung und Behandlung (§ 9), Regelungen zur Produktverantwortung (§ 23) sowie zur nachhaltigen Beschaffung.

Ende der Abfalleigenschaft

Rechtliche Festlegungen dazu, wann Stoffe das Ende der Abfalleigenschaft erreicht haben, sind für die gesamte Verwertungskette essentiell, da Abfälle als solche nicht wieder in Verkehr gebracht werden dürfen (Seitz et al. 2022, S. 38). Vom Ende der Abfalleigenschaft hängt also ab, ob ein Stoff aus dem Abfallregime entlassen wird und rechtlich als verkehrsfähiges Produkt zu behandeln ist (was mit einem deutlich geringeren Genehmigungs- und Verwaltungsaufwand verbunden ist). Nach § 5 Abs. 1 KrWG endet die Abfalleigenschaft, wenn ein Stoff oder ein Gegenstand ein Recycling oder ein anderes Verwertungsverfahren durchlaufen hat und so beschaffen ist, dass

- > er üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird,
- > ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht,
- > er alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt sowie
- > seine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt führt.

Da Abfall nicht verschwinden, sondern nur in ein Produkt umgewandelt oder abschließend entsorgt werden darf, muss die Entlassung aus der Abfalleigenschaft unter Nachweis der Einhaltung der genannten vier Kriterien dokumentiert und bei der zuständigen Umweltbehörde angezeigt werden (Seitz et al. 2022, S. 39). Die Abfalleigenschaft endet bei der Erfüllung dieser Voraussetzungen prinzipiell automatisch, eine behördliche Feststellung

durch einen Verwaltungsakt ist nicht erforderlich (bvse 2020a; dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 63). Trotzdem gibt es in der Praxis nur wenige Beispiele, dass Altmassen nach der Aufbereitung und zur Rückführung in den Wirtschaftskreislauf aus dem Abfallregime entlassen und damit zu einem Produkt werden. Häufig kommen eher allgemeine Einwände von den Abfallrechtsbehörden, dass schädliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt nicht ausgeschlossen werden können.¹⁴

Darüber hinaus ermächtigt § 5 Abs. 2 KrWG die Bundesregierung durch Rechtsverordnung näher zu bestimmen, unter welchen Bedingungen für bestimmte Stoffe oder Gegenstände die Abfalleigenschaft entfällt. Doch diese Ermächtigungsgrundlage wurde bislang nicht in Anspruch genommen (Lammers 2022, S. 22).¹⁵

Sammelsysteme

Um einen möglichst hohen Reinheitsgrad bei der Sammlung der einzelnen Abfallfraktionen zu erreichen, präferiert das KrWG möglichst getrennte Sammelsysteme (§ 9). Insbesondere sind die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger verpflichtet, bestimmte Abfälle getrennt zu sammeln (§ 20 Abs 2). Die Getrenntsammlungspflicht wurde mit der Novellierung des KrWG im Jahr 2020 gestärkt und umfasst nun Papier, Pappe und Kartonagen, Bioabfälle, Kunststoffabfälle, Metallabfälle, Glas, Textilabfälle (ab 2025), Sperrmüll und gefährliche Abfälle. Zugleich werden aber auch Kriterien fixiert, nach denen die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger im Zusammenwirken mit den Entsorgungsunternehmen auf andere Systeme wie z. B. die einheitliche Wertstofftonne oder ein vergleichbares einheitliches Wertstofffassungsmodell abstellen können, wo das Vermischungsverbot aufgehoben wird (Seitz et al. 2022, S. 40). Als Kriterien dafür werden u. a. genannt (§ 9 Abs. 3 KrWG):

- › Das Potenzial zur Vorbereitung zur Wiederverwendung, zum Recycling oder zu sonstigen Verwertungsverfahren muss in einer vergleichbaren Qualität wie mit einer getrennten Sammlung erreicht werden.
- › Die getrennte Sammlung ist unter Berücksichtigung guter Praxis der Abfall-sammlung technisch nicht möglich oder mit zu hohen Kosten verbunden.

Dieser Entscheidungsspielraum hat zunächst den Vorteil, dass verschiedene systemische Ansätze, z. B. Hol- oder Bringsysteme, Getrenntsammlung (Gelbe Tonne) oder einheitliche Abfalltonne, an lokale oder regionale Gegebenheiten angepasst und zugleich wettbewerbsfähig auf ihre Eignung geprüft und evaluiert werden können (dazu und zum Folgenden Seitz et al. 2022, S. 40 f.). Andererseits sind die genannten Kriterien weit auslegbar und nicht mit messbaren Parametern untersetzt, sodass oftmals nur Kostenvorteile und nicht Qualitäts- oder ökologische Ansprüche bei der Wertstofftrennung den Ausschlag für die Vergabe der Entsorgungsaufträge geben. Dies ist als Tendenz vor allem dort zu beobachten, wo die Träger der Sammelsysteme von den nachfolgenden Prozessen der Abfallbehandlung und -verwertung abgekoppelt sind.

Produktverantwortung

Damit die regelmäßig steigenden Ziele des Recyclings erreicht werden können, regelt § 23 KrWG die Produktverantwortung. Diese ergänzt die Entsorgungsverantwortung der kommunalen Entsorgungsträger und soll dazu beitragen, dass Hersteller eine Verantwortung für die Umweltauswirkungen ihrer Produkte entlang der Wertschöpfungskette übernehmen (Hinzmann et al. 2022, S. 18 f.). Entsprechend werden sie dazu verpflichtet, das Entstehen von Abfällen zu minimieren sowie die Voraussetzungen für eine Wiederverwendung von Produkten bzw. eine umweltverträgliche Verwertung oder Beseitigung der zu Abfall gewordenen Güter zu schaffen. Ziel ist es, ökonomische Anreize zur Abfallvermeidung und -verwertung zu setzen, da die dafür aufzubringenden Kosten in den Produktpreis integriert werden (anders als bei der kommunalen Entsorgung, die über die Abfallgebühren bezahlt wird). Hersteller haben damit ein wirtschaftliches Interesse, ihre Produkte so zu gestalten, dass ein möglichst geringer Entsorgungsaufwand entsteht (Thärichen 2022, S. 55).

¹⁴ Der Bayerische Verwaltungsgerichtshof mahnte dieses Vorgehen in einem Gerichtsurteil im Jahr 2020 deutlich an. Behörden tragen die Beweislast, wenn etwa durch einen Verwaltungsakt das Fortbestehen der Abfalleigenschaft geregelt werden soll. Eine Vermutung allein sei nicht ausreichend, die Behörde ist beweispflichtig für das Vorliegen der Voraussetzungen der Abfalleigenschaft (Muchow et al. 2022, S. 63).

¹⁵ Auf Basis von Art. 6 der Abfallrahmenrichtlinie hat auch die EU-Kommission die Möglichkeit, stoffstromspezifische Abfallendeckungsordnungen zu erlassen, die unmittelbar in allen Mitgliedstaaten gelten (dazu Lammers 2022, S. 21). Bislang wurden drei solcher Verordnungen erlassen: für Eisen-, Stahl- und Aluminiumschrott, für Bruchglas und für Kupferschrott. Der neue Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft sieht vor, dass weitere Abfallendeckungsordnungen geprüft werden, ohne infrage kommende Stoffströme zu benennen.

Insbesondere umfasst die Produktverantwortung die Einrichtung von Rücknahmesystemen nach Ende der Nutzungsdauer und Lenkung in geeignete Verwertungswege sowie die Übernahme der finanziellen Kosten oder der finanziellen und organisatorischen Verantwortung für die Bewirtschaftung der Abfälle. In der 2020 novellierten KrWG wurden die Vorgaben erweitert und um neue Aspekte ergänzt wie die Reparierbarkeit von Produkten, der vorrangige Einsatz von Rezyklaten bei der Herstellung, der Umgang mit kritischen Rohstoffen oder die Förderung von Systemen zur Wiederverwendung und Reparatur (§ 23 Abs. 2). Neu hinzugefügt wurde außerdem eine Obhutspflicht (§ 23 Abs. 2), der zufolge die Hersteller beim Vertrieb von Erzeugnissen dafür zu sorgen haben (auch bei deren Rücknahme oder Rückgabe), dass die Gebrauchstauglichkeit der Erzeugnisse erhalten bleibt und diese nicht zu Abfall werden. Damit soll vor allem verhindert werden, dass Retouren oder Lagerbestände vernichtet werden, was mit der Zunahme des Onlinehandels ein wachsendes Problem geworden ist (FAZ 2018).¹⁶

Öffentliche Beschaffung

Mit der Novellierung des KrWG wurde auch § 45 neu gefasst, der die Pflichten von Bundesbehörden (sowie der Aufsicht des Bundes unterstehenden juristische Personen des öffentlichen Rechts) bei der Beschaffung regelt. Bislang galt für die öffentliche Auftragsvergabe nur die Pflicht zu prüfen, inwiefern nachhaltige und ressourceneffiziente Erzeugnisse eingesetzt werden können (Heinemann & Partner Rechtsanwälte 2020). Diese Prüfpflicht wurde zu einer Bevorzugungspflicht aufgewertet. Das heißt, bei der Beschaffung oder Verwendung von Material und Gebrauchsgütern, bei Bauvorhaben und sonstigen Aufträgen ist Erzeugnissen den Vorzug zu geben, die z. B.

- › durch Vorbereitung zur Wiederverwendung oder durch Recycling von Abfällen, insbesondere unter Einsatz von Rezyklaten, hergestellt worden sind,
- › oder sich durch Langlebigkeit, Reparaturfreundlichkeit, Wiederverwendbarkeit und Recyclingfähigkeit auszeichnen (§ 45 Abs. 2).

Solche Produkte müssen nun anderen vorgezogen werden – allerdings nur dann, wenn sie eine gleichwertige Qualität und Funktionalität im Hinblick auf den vorgesehenen Einsatzzweck haben und keine unzumutbaren Mehrkosten entstehen. Diese Einschränkung könnte nach Auffassung des NABU (Bax et al. o.J.) dazu führen, dass auf den herkömmlichen, eingespielten Beschaffungswegen beharrt wird (Seitz et al. 2022, S. 41).

2.2.2 Produkthanforderungen

Mit Blick auf den Rezyklateinsatz sind Produkthanforderungen in zweierlei Hinsicht relevant:

- › Zum einen müssen Rezyklate bestimmte rechtliche Vorgaben erfüllen, damit sie in Produkten eingesetzt werden können.
- › Zum anderen gibt es gesetzliche Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Produkten, die sowohl ihre Recyclingfähigkeit als auch den Einsatz von Rezyklaten betreffen.

Bestimmungen zum Rezyklateinsatz

Damit Rezyklate in Produkten zum Einsatz kommen können, müssen sie neben bestimmten produktspezifischen Qualitätsanforderungen auch Vorgaben aus dem Chemikalien- und Umweltrecht erfüllen. Relevant ist hier vor allem die REACH-Verordnung, die ein hohes Schutzniveau für die menschliche Gesundheit und die Umwelt sicherstellen soll (dazu und zum Folgenden Seitz et al. 2022, S. 107 f.). Die darin enthaltenen Regularien dienen dazu, die Auswirkungen von Stoffen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt zu minimieren. REACH beruht auf dem Grundsatz, dass Hersteller, Importeure und nachgeschaltete Anwender garantieren müssen, dass »Chemikalien, die sie herstellen und in Verkehr bringen, sicher verwendet werden« (UBA o.J.d). Sie tragen dafür die Beweislast. Die Verordnung bestimmt Verfahren zur Erfassung und Bewertung von Informationen über Ei-

¹⁶ Die praktische Umsetzung, die in der Verantwortung der Länder liegt, ist jedoch bislang mangelhaft, wie Recherchen ergeben haben (Randerrath/Odenthal 2022).

enschaften und Gefahren von Stoffen – je nach Verwendungszweck werden außerdem spezifische Anforderungen an die Produkte gestellt (z. B. wenn die Rezyklate in Berührung mit Lebensmitteln kommen). Stoffe, die in Mengen von 1 t pro Jahr oder mehr hergestellt oder importiert werden, müssen registriert werden, basierend auf Informationen über die Eigenschaften und Verwendungen der Stoffe sowie einer Beurteilung möglicher Gefahren und Risiken (ECHA o.J.b). Für Stoffe, die für Mensch und Umwelt besonders besorgniserregend sind, besteht eine Zulassungspflicht.

Abfall ist gemäß der REACH-Verordnung nicht als Stoff definiert und entsprechend von den Pflichten ausgenommen. Für Stoffe, die mittels Recycling aus Abfall zurückgewonnen wurden, gelten hingegen bestimmte Privilegien (Recyclingprivileg; Zühlsdorff 2022). Laut Art. 2 Abs. 7 d) besteht keine Registrierungspflicht, wenn der aus dem Rückgewinnungsverfahren hervorgegangene Stoff mit einem bereits registrierten Stoff chemisch identisch ist und Informationen zu Gefährlichkeitsmerkmalen vorliegen (Gadermann et al. 2021, S.4). In der Konsequenz bedeutet das, dass Anwender von Rezyklaten garantieren und belegen müssen, dass das Rezyklat mit einem bereits registrierten Stoff identisch ist; andernfalls greift die Registrierungspflicht. Diese Anforderungen einzuhalten bzw. ihre Einhaltung nachzuweisen, kann eine große Herausforderung darstellen und ist praktisch nur auf zwei Wegen möglich (zum Folgenden Seitz et al. 2022, S. 108):

- › mittels eines lückenlosen Produktpasses, der die Herkunft der Ausgangsstoffe sowie alle Stufen des Recyclingprozesses dokumentiert und Ergebnisse zwischenzeitlicher Materialanalysen enthält;
- › durch zertifizierte Stoffanalysen der Rezyklate bzw. der rezyklathaltigen Produkte zum Ausschluss von enthaltenen REACH-Chemikalien.

Da Produktpässe bisher nicht verpflichtend sind, sind Rezyklatanwender in der Regel davon abhängig, dass sich Hersteller und Händler von Rezyklaten freiwilligen Qualitäts- und Zertifizierungsregeln oder -strukturen unterwerfen, z. B. RAL-Gütegemeinschaften (dazu und zum Folgenden Seitz et al. 2022, S. 108). Zusätzlich zu den stofflichen Konformitätserklärungen müssen meist noch weitere Prüfungen durchgeführt werden, um nachzuweisen, dass bestimmte innerbetriebliche Produktstandards für die eingesetzten Werkstoffe erfüllt werden (z. B. für das mechanische Einsatzverhalten). Wird eine Rezeptur durch die Zugabe von Rezyklatanteilen verändert, zieht das dementsprechend zunächst eine umfangreiche betriebsinterne Kontrolle nach sich, bevor z. B. eine europäische Zulassung beantragt wird. Beides – also sowohl Stoffanalysen und Informationspflichten im Rahmen von REACH als auch innerbetriebliche Produktprüfungen – kann hohe Kosten entlang der Wertschöpfungskette verursachen und so den Rezyklateinsatz verteuern. Hinzu kommt insbesondere bei Kunststoffen, dass partielle Verunreinigungen erhalten bleiben, trotz intensiver Kontrollschritte über den gesamten Prozess der Gewinnung von Rezyklaten, und daher sowohl Hersteller als auch Verwender von Kunststoffrezyklaten einem schwer beeinflussbaren Restrisiko unterliegen.

Haftungsfragen regelt in Deutschland das Produkthaftungsgesetz¹⁷, ohne den Ursprung der eingesetzten Materialien zu unterscheiden. Um bei der Haftung für fehlerhafte Produkte u. a. aus der Kreislaufwirtschaft erwachsende Risiken besser zu berücksichtigen, hat die EU 2022 einen Vorschlag für eine Richtlinie über die Haftung für fehlerhafte Produkte vorgelegt. Die neue Richtlinie soll insbesondere Klarheit für Produkte schaffen, die im Rahmen von kreislauforientierten Geschäftsmodellen geändert oder aktualisiert wurden. Der Vorschlag befindet sich derzeit im ordentlichen Gesetzgebungsverfahren (EK 2022d).

Umweltgerechte Produktgestaltung (Ökodesign)

Für das Funktionieren der Kreislaufwirtschaft ist elementar, dass bereits beim Produktdesign angesetzt wird. Darauf soll auch die im KrWG festgelegte Produktverantwortung hinwirken, indem die Hersteller dazu verpflichtet werden, ihre Produkte möglichst ressourceneffizient und kreislauffähig zu gestalten (Kap. 2.2.1). Hierbei handelt es sich jedoch nur um abstrakte Grundpflichten, die durch Gesetze und Verordnungen »weiter [zu] konkretisieren und für die Praxis erst vollzugsfähig [zu] machen« sind (Heinemann & Partner Rechtsanwälte 2020). Auf EU-Ebene ist diesbezüglich vor allem die Ökodesign-Richtlinie relevant, mit der das Prinzip einer umweltgerechten Produktgestaltung 2005 etabliert wurde.¹⁸

¹⁷ Produkthaftungsgesetz vom 15.12.1989, zuletzt am 17.7.2017 geändert

¹⁸ Die Ökodesign-Richtlinie wurde als Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz (vom 27.2.2008, zuletzt am 19.6.2020 geändert) in deutsches Recht umgesetzt.

Die Ökodesign-Richtlinie wurde 2009 umfassend umgestaltet und zuletzt 2012 novelliert (dazu und zum Folgenden Raatz et al. 2022a, S. 15 f.). Sie gilt für »energieverbrauchsrelevante Geräte«, also Produkte, deren »Nutzung den Verbrauch von Energie in irgendeiner Weise beeinflusst«, »einschließlich Teilen, die zum Einbau in ein unter diese Richtlinie fallendes energieverbrauchsrelevantes Produkt bestimmt sind« (Art. 2). Dazu gehört ein weites Spektrum von Produkten wie Waschmaschinen, Kühlschränke, TV-Geräte, Beleuchtung und Motoren. Obwohl der Schwerpunkt auf der Energieeffizienz von Produkten liegt, die gemäß der Richtlinie so zu gestalten sind, dass sie einen geringen Energieverbrauch in der Nutzungsphase haben, werden auch weitere Umweltwirkungen wie die Ressourcennutzung betrachtet. So setzt die Richtlinie bei der Verminderung der Umweltwirkungen insbesondere auf die Phase der Produktgestaltung, da diese die Auswirkungen in den weiteren Lebenszyklusphasen determiniert. Dies gilt für den Energieverbrauch ebenso wie für die Demontage und das Recycling am Ende des Produktlebenszyklus. Entsprechend der Richtlinie sollen die Hersteller den Verbrauch an Ressourcen wie Energie, Wasser und Rohstoffe, potenzielle Emissionen in Wasser, Luft und Boden, Verschmutzungen durch physikalische Effekte wie Lärm, Strahlung, Vibrationen oder elektromagnetische Felder, die erwartete Menge an Abfall und die Möglichkeiten der Wiederverwendung, der Verwertung und Rückgewinnung von Rohstoffen in den Blick nehmen.

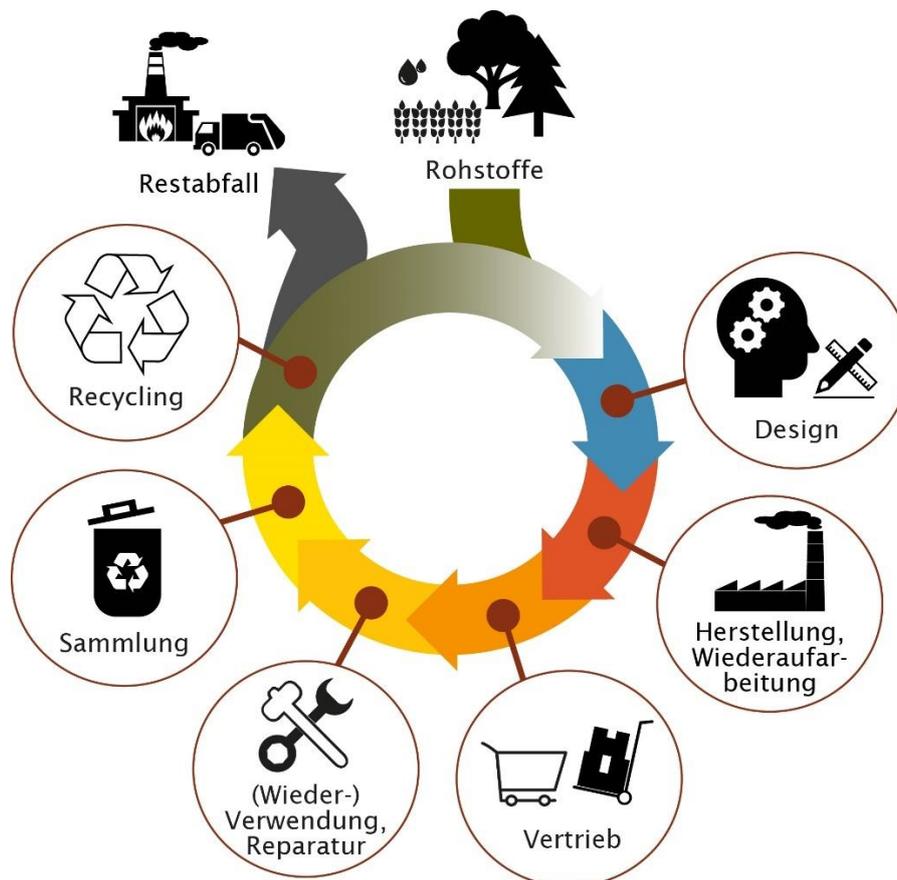
Mit dem Grünen Deal kündigte die Europäische Kommission 2020 eine neue Strategie für nachhaltige Produkte und die Stärkung der Herstellerverantwortung an (EK 2019, S. 11). Im Zuge dessen ist geplant, die Ökodesign-Richtlinie durch eine neue Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte (EK 2022e) abzulösen, die alle relevanten Produktgruppen, also nicht nur die energieverbrauchsrelevanten, einschließt (also auch Textilien, Möbel, Stahl, Zement und Chemikalien). Mit der Verordnung selbst sollen keine produktspezifischen Anforderungen festgelegt, sondern vorgegeben und spezifiziert werden, welche Maßgaben hinsichtlich Umwelt- und Ressourcenschutz »in zukünftigen Produktverordnungen verankert werden sollen und können« (EU-Recycling 2022). Der gesamte Produktlebenszyklus soll dabei im Fokus stehen. Vorgesehen ist u. a., dass Produkte erst vermarktet oder in Betrieb genommen werden dürfen, wenn ein digitaler Produktpass vorliegt (EK 2022e, Kap. III. Art. 8). Der Vorschlag sieht auch vor, dass Ökodesignprinzipien festgelegt werden, die die Rezyklierbarkeit von Produkten stärken und zu einem höheren Anteil an Rezyklaten in Produkten beitragen sollen (Art. 5).

2.3 Verbesserung des Rezyklateinsatzes: Ansatzpunkte und Hemmnisse

Um möglichst geschlossene Stoffkreisläufe im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu erhalten, lassen sich entlang des Produktlebenszyklus mehrere kritische Phasen identifizieren, die in Abbildung 2.2 dargestellt sind. Das eigentliche Recycling ist dabei nur der letzte Schritt in einem komplexen Prozess, der bereits beim Produktdesign beginnt und weitere Zwischenschritte (insbesondere Reparatur/Wiederverwendung, Sammlung) enthält.

Obwohl die Steigerung des Rezyklateinsatzes in modernen Konzepten zirkulären Wirtschaftens nur noch ein Ansatzpunkt unter mehreren ist, um effizienter und verantwortungsbewusster mit Ressourcen umzugehen, ist es ein zentraler Erfolgsmaßstab für die Kreislaufwirtschaft. Entsprechend schlägt die Ressourcenkommission am Umweltbundesamt (KRU 2019, S. 10) vor, die Substitutionsquote – also das »Verhältnis von eingesetzten Sekundärrohstoffen zum insgesamt genutzten Materialaufwand (Primärrohstoffe und Sekundärrohstoffe)« – als Indikator dafür zu nehmen, wie weit die Umsetzung zur Kreislaufwirtschaft vorangeschritten ist.

Abb. 2.2 Modell der Kreislaufwirtschaft

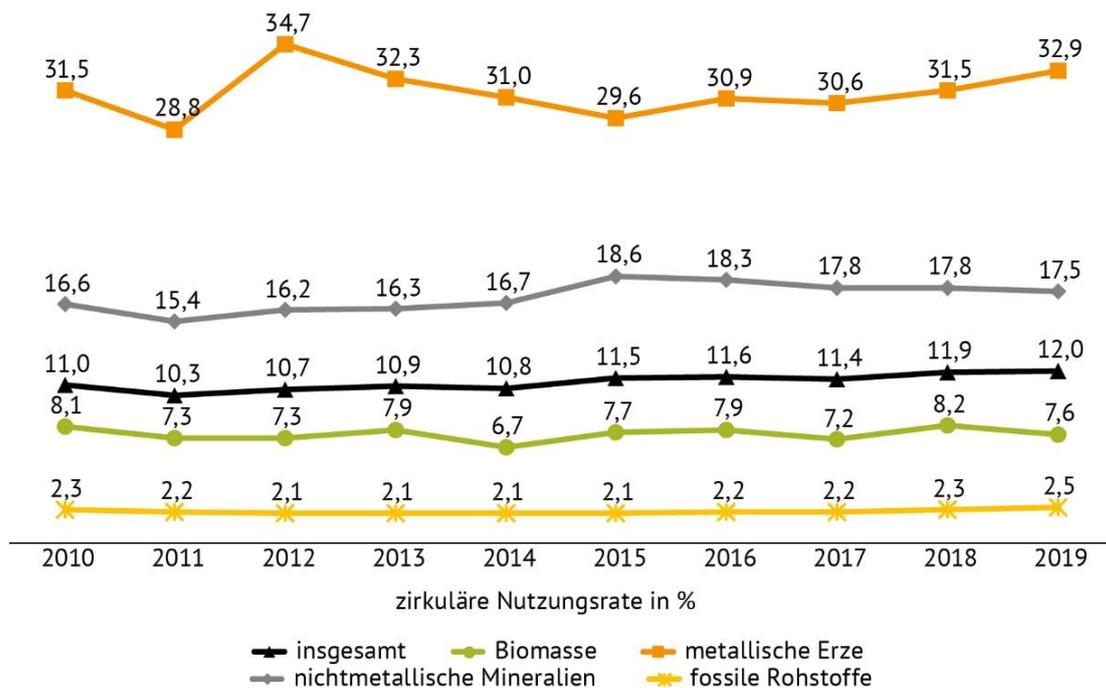


Quelle: Eigene Darstellung

In eine ähnliche Richtung geht die EU mit der zirkulären Nutzungsrate (CMU). Die CMU soll abbilden, welchen Beitrag Sekundärrohstoffe zur Deckung der Rohstoffnachfrage leisten, und dient auf EU-Ebene als zentraler Indikator für die Entwicklung der Kreislaufwirtschaft. Laut Aktionsplan Kreislaufwirtschaft ist das Ziel, die CMU von 11,7% im Jahr 2021 auf 23,4% im Jahr 2030 zu verdoppeln (EEA 2023a). Im Unterschied zur Substitutionsquote, die den tatsächlichen Rezyklateinsatz zugrunde legt, basiert die Berechnung der CMU auf der Recyclingquote (KRU 2019, S. 10). Dadurch, dass die CMU auf den statistisch erfassten Recyclingquoten basiert, ist sie einfach ermittel- und vergleichbar (anders als die Substitutionsquote, für deren Berechnung es noch keine zuverlässige Datengrundlage gibt). Nachteilig ist jedoch, dass die CMU den tatsächlichen Rezyklateinsatz überschätzt (Dittrich et al. 2021, S. 23).

Die durchschnittliche CMU in Deutschland für 2019 lag bei 12,9% und somit ziemlich nah beim EU-Durchschnitt von 12% (Eurostat o.J.a). Seit 2010 (CMU 11%) ist die Rate relativ konstant geblieben, sodass bei der Schließung von Stoffkreisläufen im betrachteten Zeitraum offensichtlich kaum Fortschritte zu verzeichnen waren. Diese Beobachtung gilt für alle betrachteten Materialgruppen, wobei die Höhe der CMU deutlich differiert und beispielsweise bei Metallen einen Wert von knapp 33% erreicht, bei den fossilen Rohstoffen jedoch nur 2,5%. Diese markanten Abweichungen sind auf die unterschiedliche Rezyklierbarkeit der Materialien, aber auch verschiedene wirtschaftliche, rechtliche sowie infrastrukturelle Rahmenbedingungen zurückzuführen. Deutlich wird damit, dass für die Verbesserung des Rezyklateinsatzes stoffstromspezifische Betrachtungen erforderlich sind (Abb. 2.3).

Abb. 2.3 Die CMU in Deutschland für verschiedene Materialgruppen



Quelle: Dittrich et al. 2021, S. 33

Trotzdem lassen sich entlang der Wertschöpfungskette stoffstromübergreifend zentrale Ansatzpunkte – nämlich Produktdesign, Sammlung, Recycling und Rezyklateinsatz – identifizieren, die bei der Schließung von Stoffkreisläufen zu beachten sind. Wie im Folgenden gezeigt wird, können dabei jeweils unterschiedliche Hemmnisse dem Ziel entgegenstehen, eine Verbesserung des Rezyklateinsatzes zu erreichen.

Produktdesign

Ein Produktdesign, das sparsam mit Ressourcen umgeht, Langlebigkeit und Wiederverwendbarkeit fördert und am Ende des Produktlebenszyklus eine einfache Demontage und ein effizientes Recycling unterstützt, ist eine zentrale Voraussetzung für das Gelingen einer Kreislaufwirtschaft. Sowohl auf rechtlicher Ebene (Ökodesign-Richtlinie, Produktverantwortung im KrWG) als auch in den aktuellen Politikstrategien zum Thema (EU-Aktionsplan Kreislaufwirtschaft) kommt dem Design für Recycling inzwischen eine große Bedeutung zu (Kap. 2.1 u. 2.2). Üblicherweise werden jedoch weder die Wiederverwendbarkeit des Produkts oder von Komponenten noch die Recyclingfähigkeit bei der Produktgestaltung systematisch bedacht, nicht zuletzt, da auch Produktrends wie die zunehmende Miniaturisierung von Komponenten (insbesondere bei Elektronikartikeln), der Einsatz von Verbundwerkstoffen, das Interesse an einem möglichst individuellen Design (auch bei Verpackungen) oder bestehende Patentrechte dem zuwiderlaufen.

Um eine bessere Recyclingfähigkeit von Produkten zu erreichen, wäre vor allem auch ein »ganz neues Ausmaß an Kooperation und Koordination« (Wilts/von Gries 2017) der verschiedenen Akteure entlang der Wertschöpfungskette erforderlich, um den Produktlebenszyklus so zu optimieren, dass möglichst geschlossene Stoffkreisläufe entstehen. Dies gestaltet sich jedoch schwierig, da die Wertschöpfungsketten von der Extraktion von Rohstoffen über deren Verarbeitung bis hin zum Konsum und dann weiter zum Recycling lang sind und zahlreiche Unternehmen und Akteure betreffen, die zudem auch vielfach in unterschiedlichen Ländern und damit Jurisdiktionen angesiedelt sind (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2022, S. 13 f.). Eine wichtige Rolle spielen dabei auch *informativische Hemmnisse*. Um aus Produkten nach Ende ihres Lebenszyklus qualitativ hochwertige Sekundärrohstoffe zu gewinnen, ist es wichtig, genaue Kenntnisse über deren materielle Zusammensetzung und ihren Aufbau zu haben sowie die Anzahl der verschiedenen Materialien zu verringern und damit den jeweiligen Stoffstrom zu erhöhen. Derartige Informationen werden aber typischerweise nicht über die Wertschöpfungskette

weitergegeben. Denn damit sind nicht nur Aufwände verbunden, sondern auch Geschäftsgeheimnisse zum Design von Produkten könnten betroffen sein. Das Problem intransparenter Informationen verschärft sich vor allem bei solchen Produkten, die eine lange Lebensdauer aufweisen und bei denen unerwünschte Beimischungen und Schadstoffe nicht ausgeschlossen werden können (wie z. B. bei Gebäudeteilen). Dafür wären eine zentrale Erfassung und Auswertung von Materialien notwendig (z. B. Materialinventare im Baubereich), wofür die Anforderungen an die Datenübergabe und datenschutztechnische Voraussetzungen zu klären wären.

Sammlung

Für das Schließen von Stoffkreisläufen ist entscheidend, dass zum einen möglichst alle Abfälle fachgerecht entsorgt werden und also z. B. nicht auf illegalem Wege (z. B. Export) verlorengehen. Zum anderen ist dafür Sorge zu tragen, dass minderwertige Entsorgungsmöglichkeiten (wie die Deponierung oder thermische Verwertung) nur für solche Abfälle genutzt werden, die für ein hochwertiges Recycling nicht infrage kommen. Um dies zu erreichen und Abfälle möglichst zielgenau den beabsichtigten Verwertungswegen zuzuführen, wurden für die verschiedenen Abfallströme unterschiedliche Sammelsysteme entwickelt. Seit Etablierung der dualen Entsorgungsordnung in den 1990er Jahren, mit der sich in Deutschland eine differenzierte Abfallwirtschaft entwickelt hat, ist die Verantwortung dafür zwischen öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern und privaten Entsorgungsunternehmen aufgeteilt (Kap. 2.2.1). Grundsätzlich zu unterscheiden sind bei der Sammlung Hol- oder Bringsysteme:

- Im *Holsystem* werden Wertstoffe in der unmittelbaren Nähe des Anfallsortes gesammelt und von den Entsorgungsunternehmen dort abgeholt. Dies erfolgt beispielsweise über eine gelbe Tonne, einen gelben Sack oder Wertstofftonne.
- Im *Bringsystem* werden Wertstoffe an Sammelstellen gebracht. Dazu gehören z. B. Wertstoffhöfe sowie Einweg- und Mehrwegpfandsysteme des Handels oder auch an zentralen Stellen aufgestellte Erfassungsbehälter (Glas, Textilien, Kleinschrott).

Die Art des Rücknahmesystems bestimmt die Rezyklatausbeute maßgeblich mit, da eine sortenreine Erfassung von Abfällen den Aufwand und die Qualität des nachfolgenden Recyclings maßgeblich beeinflusst – je spezifischer das Sammelsystem, desto höher ist in der Regel die werkstoffliche Verwertung. Werden z. B. Verpackungsabfälle über Rücknahmesysteme (Branchenlösungen oder Pfandsysteme) gesammelt, werden sie in höherem Maße werkstofflich rezykliert als wenn sie nicht trennscharf über ein Holsystem erfasst werden.

Der Aufbau und die Durchführung trennscharfer Sammelsysteme ist mit einem erheblichen organisatorischen und infrastrukturellen Aufwand verbunden. Je spezifischer die Sammlung, desto höher die Kosten. Ein Hemmnis dabei ist, dass Nutzen und Kosten der Abfallsammlung bei unterschiedlichen Akteuren der Wertschöpfungskette anfallen (*geteilte Anreize*; dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2022, S. 11). Anders als Entsorgungsunternehmen haben Industrie und Verbraucher/innen kein genuines Interesse an einer hochwertigen Abfallsammlung. Das hat zur Folge, dass im Regelfall die Investitionen in den Aufbau anspruchsvoller Sammelinfrastrukturen unterbleiben, solange einerseits die Verteilung von Kosten und Nutzen nicht klar und verbindlich geregelt wird und andererseits die Wirtschaftlichkeit der Investitionen durch extreme Preissprünge im Sekundärrohstoffmarkt nicht kalkulierbar ist. Beispiele sind die Vorgaben zur Sammlung von Verpackungsabfällen (Kap. 3.1.1) oder von gebrauchten Elektrogeräten (Kap. 3.2.1). In anderen Bereichen fehlen entsprechende Vorgaben, die insbesondere auch die Verteilung der Kosten für die Sammlung regeln, z. B. bei Möbeln, Textilien oder Kunststoffen über Verpackungen hinaus. Obwohl durch die sortenreine Sammlung dieser Abfälle erhebliche Werte zustande kämen, wird das entsprechende Potenzial nicht ausgenutzt. Auch hier könnten Rücknahmepflichten schon bei Inverkehrbringenden ansetzen und ihnen die dafür notwendigen Kosten auferlegen (Circular Economy Initiative Deutschland 2021).

Recycling

Mit dem Recycling der Abfälle werden die darin enthaltenen Wertstoffe zurückgewonnen und in Form von Rezyklaten bzw. Sekundärrohstoffen wieder nutzbar gemacht. Damit kann ein erheblicher technischer Aufwand verbunden sein, der einerseits von materialspezifischen Eigenschaften des jeweiligen Stoffstroms, andererseits aber auch vom Grad der Recyclingfähigkeit der Produkte sowie der Qualität der Abfallsammlung abhängt. In der Regel ist dem eigentlichen Recyclingprozess eine relativ aufwendige Vorbehandlung vorgeschaltet, um sortenreine Materialströme zu erhalten. Grundsätzlich ist das Ziel einer Kreislaufwirtschaft, möglichst alle Wertstoffe im Kreislauf zu

halten – bei allen Recyclingverfahren sind jedoch Materialverluste schon aus technischen Gründen unvermeidbar und komplett geschlossene Stoffkreisläufe somit nicht realisierbar.

Hinzu kommen wirtschaftliche Restriktionen, die eine Rückgewinnung von Rohstoffen, die nur in kleineren Mengen vorhanden sind, oft nicht lohnenswert machen. Die Recyclingbranche (Kasten 2.1) investiert nur dann in innovative Technologien und Anlagen, wenn dies auch betriebswirtschaftlich darstellbar ist. Das Recycling ist deshalb üblicherweise auf die Rückgewinnung von solchen Rohstoffen optimiert, die mit ausreichendem Erlös vermarktet werden können. Diese Situation kann Innovationen hemmen, die zur Schließung von Stoffkreisläufen erforderlich wären (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2022, S. 12 f.). Der Grund dafür ist, dass die erstmalige Einführung innovativer Recyclingtechnologien für Unternehmen mit Kosten bzw. Risiken verbunden ist – abzuwarten und Innovationen nachzuziehen, hat oft Vorteile, weil so die Einführungs- und Lernkosten eingespart werden können. Die unternehmerischen Anstrengungen für Forschung, Entwicklung und Markteinführung von neuen Technologien bleiben in der Folge unter dem Niveau, das volkswirtschaftlich eigentlich wünschenswert wäre. Selbst wenn die erforderlichen Aufbereitungstechnologien durchaus vorhanden wären (z. B. proteinbasierte Verfahren zur Abtrennung von Seltenen Erden; Dong et al. 2021), werden Kleinstmengen von Rohstoffen mit den großtechnisch genutzten Recyclingverfahren häufig nicht erfasst und die enthaltenen Rohstoffe gehen verloren (z. B. Seltene Erden in Elektrogeräten; Kap. 3.2). Entsprechende Innovationshemmnisse machen sich vor allem dann bemerkbar, wenn sich noch gar kein Markt für Sekundärmaterialien etabliert hat. Ein Beispiel ist das Recycling von Batterien für Elektroautos (z. B. Gaines 2018). Hier sollten eigentlich schon mit der aktuellen Marktausweitung batterieelektrischer Fahrzeuge Innovationen und Infrastrukturen für das Batterierecycling aufgebaut werden, obwohl erst in einigen Jahren mit einem wesentlichen Aufkommen an gebrauchten Batterien zu rechnen ist.

Kasten 2.1 Struktur der Recyclingbranche

Die Recyclingbranche ist Teil der Entsorgungswirtschaft, die sich mit Sammlung, Behandlung, Beseitigung sowie Recycling von Abfällen befasst. Die Entsorgungswirtschaft ist in Deutschland ein wirtschaftlich starker Sektor, der in den letzten zehn Jahren sichtbar gewachsen ist. Sowohl Umsatz (2010: 22,1 Mrd. Euro; 2020: 40,5 Mrd. Euro; Statista o.J.e), Anzahl der Beschäftigten (2010: 102.200; 2020: 181.000; Statista o.J.d) als auch Anzahl der Unternehmen (2010: 989; 2020: 1.705; Statista o.J.f) haben deutlich zugenommen. Der Wachstumstrend zeigt sich auch in der Recyclingbranche, die vorwiegend privatwirtschaftlich organisiert ist:¹⁹

- › Unternehmen: Zwischen 2010 und 2020 ist die Anzahl der Recyclingunternehmen von 239 auf 502 angestiegen (Statista o.J.j).
- › Beschäftigte: 2020 beschäftigten die Unternehmen der Recyclingbranche 35.179 Personen, was ungefähr einer Verdopplung gegenüber 2010 gleichkommt (Statista o.J.i).
- › Umsatz: Im Jahr 2020 erzielten Recyclingunternehmen einen Umsatz in Höhe von rund 14,5 Mrd. Euro, womit sich der Umsatz in 10 Jahren ebenfalls fast verdoppelte. Die Recyclingbranche hatte damit einen Anteil von ungefähr 36 % (Statista o.J.k) am Umsatz der Entsorgungswirtschaft.

2019 betragen die Innovationsausgaben im Sektor »Abfallbehandlung/Recycling« 0,3 Mrd. Euro (Statista 2021, S. 2), die von einem Drittel der Unternehmen getätigt wurden (ZEW 2021, S. 2). Der Anteil der Innovationsausgaben am Gesamtumsatz (Innovationsintensität) war mit 0,8 % im Sektorvergleich deutlich unterdurchschnittlich (Durchschnitt aller Sektoren: 3,3 %) (Statista 2021, S. 35). Die Ausgaben für Forschung und Entwicklung machten 17 % der Innovationsausgaben aus, knapp die Hälfte betraf Investitionen in Anlagen.

Quelle: Statista o.J.l

¹⁹ Die Angaben beziehen sich jeweils ausschließlich auf privatwirtschaftliche Unternehmen.

Rezyklateinsatz

Der letzte Schritt zur Schließung der Materialkreisläufe ist der Einsatz der gewonnenen Rezyklate in neuen Produkten. Ob das in ausreichendem Maße gelingt, hängt von bestimmten wettbewerblichen und rechtlichen Randbedingungen ab – relevant sind vor allem Preis und Qualität. So müssen die produzierten Sekundärrohstoffe über eine angemessene Qualität verfügen, um bei Herstellern und Verbraucher/innen auf Akzeptanz zu stoßen. Die Qualität von Rezyklaten kann gesteigert werden, indem beginnend mit dem Produktdesign der ganze Kreislaufprozess – wie bereits beschrieben – optimiert wird. Der entsprechend erhöhte Aufwand schlägt sich jedoch in Preissteigerungen nieder, welche sich wiederum negativ auf die Rezyklatnachfrage auswirken können. Dieses Problem wird häufig durch *Externalitäten* verschärft (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2022, S. 9 f.). Damit sind Kosten gemeint, die nicht bei den Verursachenden anfallen, sondern von unbeteiligten Marktteilnehmer/innen getragen (also externalisiert) werden. Umweltwirkungen, die bei der Extraktion, Verarbeitung, Transport etc. zustande kommen, werden bei vielen Materialien vor allem in frühen Phasen der Wertschöpfung externalisiert. Dieser Mechanismus hat oft Wettbewerbsnachteile für Sekundärrohstoffe durch Preisverzerrungen zur Folge. Das ist besonders bei Primärrohstoffen der Fall, die im Ausland abgebaut werden, wo die Umweltauflagen geringer sind als hierzulande. Kosten der Extraktion und ggf. Verarbeitung schlagen sich dann also nicht im Rohstoffpreis nieder, während bei Sekundärmaterialien der hiesige Aufwand für Sammlung und Aufbereitung voll angerechnet wird. Selbst wenn Sekundärrohstoffe im Endeffekt Kostenvorteile aufweisen, würden diese ohne diese Externalitäten noch höher ausfallen und die Nachfrage weiter stärken.

Hemmend auf den Rezyklateinsatz können sich auch regulatorische Vorgaben auswirken. Die Nutzung von Materialien unterliegt einer Reihe von Normen und Regulationen (Kap. 2.2.2; dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2022, S. 17 f.). Dies umfasst Normen im Hinblick auf die Stabilität und Sicherheit von Endprodukten (z. B. Verarbeitungsnormen von Baumaterialien), von Arbeitssicherheit (z. B. Vorgaben zu Emissionen aus Materialien und ihrer Verarbeitung) und Umweltschutz (Gefährdungspotenziale für Mensch und Umwelt). Für die Verwendung von Primärmaterialien gibt es dafür jeweils etablierte Regelwerke und Abschätzungen von Risiken. Bei Sekundärmaterialien ist dies (noch) nicht durchgängig der Fall. Beispielsweise müssen Normen zu Baumaterialien überarbeitet werden, um die Verwendung von Rezyklaten zu ermöglichen (Orth et al. 2022). Problematisch für bestimmte Verwendungen können Verunreinigungen sein, die in Sekundärmaterialien enthalten sind und die im Konflikt mit den Zielen von Regulationen im Bereich Arbeits- und Umweltschutz stehen können. Hier ist erstens erforderlich, dass Informationen darüber bereitgestellt werden, welche Verunreinigungen tatsächlich enthalten sein könnten, zweitens Technologien genutzt werden, um diese abzutrennen, und drittens langfristig auf eine Entgiftung von Materialströmen hingewirkt wird.

In einer Studie, in der eine Reihe unterschiedlicher europäischer Rechtsnormen im Hinblick auf ihre Hemmnisse für die Etablierung von Zirkularität untersucht wurde, wurden die fehlende Klarheit und Präzision in den Zielen und Normen als ein wiederkehrendes Hemmnis herausgearbeitet (van Barnevald et al. 2016; dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2022, S. 18). In der Studie wird auf widersprüchliche Vorgaben im Abfallrecht, Chemikalienrecht, Düngemittelrecht und Lebensmittelsicherheit hingewiesen. Entsprechend wäre in vielen Fällen nicht eine Absenkung von Schutzstandards erforderlich, um die Ausgangsbedingungen für Primär- und Sekundärrohstoffe anzugleichen, sondern eine Präzisierung von Normen und Verfahren in den o.g. Rechtsgebieten.

2.4 Fazit

Ressourcenschonung, also die sparsame Nutzung natürlicher Ressourcen mit dem Ziel, ihre Menge und Funktion zu erhalten, hat als Teil einer größeren Ressourcenpolitik in der Vergangenheit über viele Jahre relativ wenig politische Aufmerksamkeit erfahren. Heute ist das Thema jedoch vor allem durch den Klimawandel, die dadurch erforderliche Dekarbonisierung des Industriesektors und die dafür benötigten großen Mengen an kritischen Rohstoffen hoch auf der politischen Agenda. Im Mittelpunkt steht dabei die Beförderung der Kreislaufwirtschaft, mit der – im Gegensatz zum linear ausgerichteten Wirtschaften – nicht nur möglichst geschlossene Stoffkreisläufe, sondern insgesamt ein effizienterer Umgang mit Ressourcen angestrebt wird.

Die übergeordneten Ziele, die mit dem zirkulären Wirtschaften verbunden werden, sind vielfältig, und umfassen neben dem Klima- und Umweltschutz auch die Sicherung der Rohstoffversorgung sowie die Steigerung der wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit. Deutschland, das schon 1994 das KrW-/AbfG erließ, gehört zu den

Vorreitern im Bereich zirkulären Wirtschaftens und verfügt traditionell über eine gut organisierte und starke Abfallwirtschaft mit guten Getrenntsammlungsraten und vergleichsweise hohen Verwertungsquoten. Das heutige Verständnis der Kreislaufwirtschaft fokussiert jedoch nicht nur auf die abfallwirtschaftliche Seite, sondern ist deutlich breiter ausgerichtet und nimmt die gesamte Produktwertschöpfungskette in den Blick. Zum Ausdruck kommt das in der rechtlich verankerten Abfallhierarchie, die der Abfallvermeidung sowie der Wiederverwendung den Vorrang vor dem Recycling zuweist. Eine umfassende Ressourcenpolitik fokussiert somit nicht allein auf die Behandlung von Abfällen, und damit zusammenhängend auf die verstärkte Nutzung von Sekundärrohstoffen, sondern nimmt auch die Reparierbarkeit und Lebensdauererlängerung von Produkten in den Blick und folgt den Leitlinien einer nachhaltigen Rohstoffgewinnung. Doch die Ausbalancierung dieser Dimensionen ist nicht trivial, da beispielsweise durch die bestehenden Recyclinginfrastrukturen auch Pfadabhängigkeiten geschaffen wurden, insofern diese nur wirtschaftlich betrieben werden können, wenn ausreichend Materialien zugeliefert werden. Bislang lag der Fokus politischer Initiativen überwiegend auf der Abfallverwertung und hat die höheren Stufen der Abfallhierarchie vernachlässigt, dabei insbesondere die Vermeidung von Abfällen.

Rückenwind für die Transformation zur Kreislaufwirtschaft gibt es aktuell vor allem durch die EU: mit dem europäischen Grünen Deal, dem Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft und den daraus abgeleiteten Strategien und Gesetzesvorschlägen, wie der »Sustainable products initiative«. Die zentralen Prinzipien für Entsorgung und Verwertung von Abfällen – etwa zur Abfallhierarchie, zum Ende der Abfalleigenschaft oder zur Herstellerverantwortung – werden in der Abfallrahmenrichtlinie definiert, die mit dem KrWG in deutsches Recht umgesetzt wurde. Konkretisiert werden die Anforderungen an den Umgang mit Abfällen durch eine Reihe von Regelungen, die sich auf spezifische Produktgruppen beziehen (z. B. Verpackungen, Elektro- und Elektronikabfälle, Batterien, Altfahrzeuge). Auch relevante Bestimmungen zu Produktanforderungen, die beim Rezyklateinsatz zu beachten sind, wurden hauptsächlich auf EU-Ebene festgelegt. Dazu gehören etwa die REACH-Verordnung oder die Ökodesign-Richtlinie – erstere legt fest, wie die Ungefährlichkeit von Rezyklaten nachgewiesen werden muss, letztere definiert Anforderungen an ein möglichst energieeffizientes Design von bestimmten Produkten. Künftig soll die Ökodesign-Richtlinie durch eine Ökodesign-Verordnung ersetzt werden, die viele Produktgruppen umfassen, weitere Kriterien für das Design von Produkten sowie die Grundzüge für die Einführung von digitalen Produktpässen festlegen soll.

Neben dem effizienteren Einsatz und der Nutzung umweltverträglicherer Ressourcen stellt die Steigerung des Rezyklateinsatzes nach wie vor eine wichtige Säule einer Ressourcenschonungspolitik dar. Deutschland verfügt mit seiner gut organisierten Abfallwirtschaft grundsätzlich über eine gute Ausgangslage dafür. Bisher wird das Potenzial jedoch nicht ausgeschöpft. So lag die durchschnittliche CMU in Deutschland, die als Kenngröße das Verhältnis der im Kreislauf geführten Materialien zur gesamten Rohstoffnutzung abbildet, im Jahr 2019 mit 12,9% in einem niedrigen Bereich, der dem EU-Durchschnitt entspricht. Ansatzpunkte zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes lassen sich entlang des gesamten Produktzyklus identifizieren, mit dem recyclinggerechten Produktdesign, einer sortenreinen Sammlung sowie einem effizienten Recycling als zentralen Stellschrauben. Zu überwinden sind dabei allerdings auch zentrale Hemmnisse vor allem wirtschaftlicher und rechtlicher Art, die der breiteren Nutzung von Sekundärrohstoffen entgegenstehen. Insgesamt zu beachten ist, dass eine Verbesserung des Rezyklateinsatzes nur mit stoffstromspezifischen Maßnahmen erreicht werden kann, da die rechtlichen, wirtschaftlichen sowie technischen Rahmenbedingungen von Produkt zu Produkt unterschiedlich sind.

3 Fallstudien zu Abfallströmen

Die Ausführungen zu den Grundlagen und Rahmenbedingungen zirkulären Wirtschaftens haben gezeigt, dass für einen verbesserten Rezyklateinsatz Faktoren entlang der gesamten Produktwertschöpfungskette entscheidend sind – vom recyclingfähigen Produktdesign über die sortenreine Sammlung der Abfälle und die technisch hochwertige Rückgewinnung der Wertstoffe bis hin zu Marktbedingungen für den Einsatz von Sekundärrohstoffen. Die Erfolgchancen für Gewinnung sowie Einsatz von Rezyklaten hängen dabei stark von materialspezifischen Eigenschaften des jeweiligen Abfallstroms und den sich daraus ergebenden technischen Anforderungen an Recyclingprozesse, aber auch von den rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ab, die für den vorgesehenen Einsatzbereich bestimmend sind.

Um die Anforderungen an den verbesserten Rezyklateinsatz differenziert zu beleuchten, werden in diesem Kapitel drei verschiedene Produkt- bzw. Abfallbereiche untersucht. Ziel ist jeweils eine Bestandsaufnahme technischer, rechtlicher sowie wirtschaftlicher Rahmenbedingungen, die für die Gewinnung und die Vermarktung von Rezyklaten maßgeblich sind. Alle drei Bereiche gehören zu den Produktwertschöpfungsketten, die auch im neuen EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft (EK 2020a) als zentral hervorgehoben und für die Beförderung einer Kreislaufwirtschaft somit als besonders wichtig angesehen werden:

- › *Kunststoffverpackungen* (Polyethylen, PET, Polypropylen etc.), die beim privaten Verbraucher anfallen, machen etwa 39% der Kunststoffabfälle aus, werden bislang aber nur zu etwa 60% recycelt. Neben der heterogenen Zusammensetzung der Abfälle sind es vor allem der wachsende Anteil von Verbundmaterialien (z. B. Mehrschichtmaterialien bestehend aus Papier, Kunststoff und Metall) sowie der hohe Verunreinigungsgrad durch Produktreste oder auch Etiketten, Klebstoffe und Lackierungen, die eine hochwertige stoffliche Verwertung von Kunststoffen aus Verpackungen erschweren. Die Analyse stützt sich auf das Gutachten von Seitz et al. (2022).
- › *Elektro- und Elektronikabfälle* stellen eine der am schnellsten wachsenden Abfallarten dar. Eine besondere Herausforderung für das Recycling stellt der kleinteilige, komplexe Aufbau der Geräte dar. Betrachtet werden, auf Basis des Gutachtens von Raatz et al. (2022a), Stand und Perspektiven des Metallrecyclings aus Elektroschrott. Von besonderer rohstoffpolitischer Bedeutung sind kritische Metalle wie Seltene Erden, die allerdings nur in geringen Konzentrationen in Elektro- und Elektronikprodukten vorkommen und daher besonders schwer zurückzugewinnen sind.
- › *Bauabfälle* sind die mengenmäßig größte Abfallgruppe in Deutschland. Da Bauabfälle sehr heterogen zusammengesetzt sind, liegt der Fokus der Fallstudie auf mineralischen Abfallfraktionen. Im Vordergrund steht die Frage, wie Aufbereitung und Nutzung mineralischer Bau- und Abbruchabfälle qualitativ verbessert und der Einsatz von Recyclingbaustoffen gestärkt werden können. Grundlage bildet das Gutachten von Muchow et al. (2022).

Die Fallstudien sind nach dem gleichen Grundmuster aufgebaut: Erst wird der aktuelle Wissensstand (auf Basis vorliegender Daten) bezüglich jährlich anfallender Abfallmengen sowie aktueller Sammel- und Recyclingquoten dargelegt und es wird der jeweils bestimmende Rechtsrahmen für Abfallentsorgung und -verwertung umrissen. Anschließend erfolgt ein systematischer Überblick über den Stand der Technik und technologische Entwicklungstrends in der jeweiligen Recyclingindustrie, wobei auf technische und infrastrukturelle Hürden eingegangen wird. In den Abschlusskapiteln werden die Herausforderungen für den Einsatz von Sekundärrohstoffen zusammengefasst und entlang des Produktlebenszyklus (Kap. 2.3) Ansatzpunkte für eine perspektivische Verbesserung des Rezyklateinsatzes in den Bereichen Design für Recycling, Sammlung, Wirtschaftlichkeit und Vorgaben für den Rezyklateinsatz identifiziert und beschrieben.

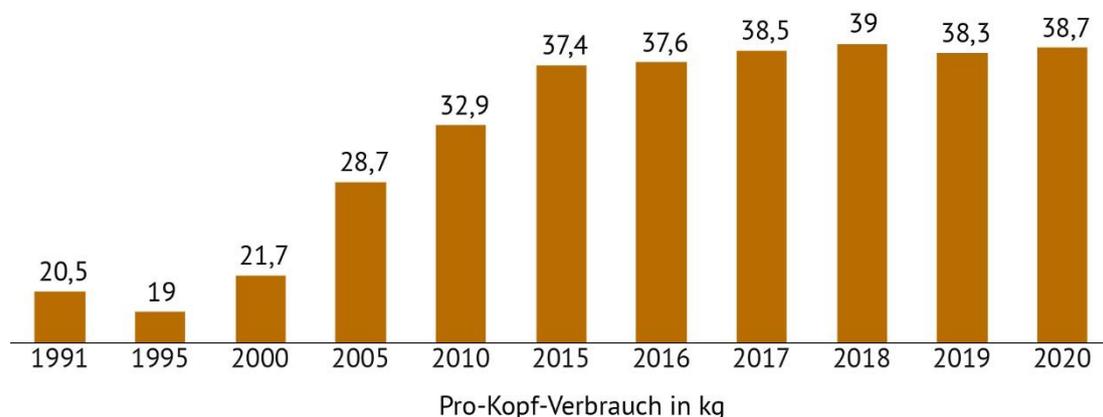
3.1 Verpackungsabfälle aus Kunststoff

Kunststoffe, umgangssprachlich auch Plastik genannt, bezeichnen sehr lange oder verzweigte organische Verbindungen (Makromoleküle), die Polymerwerkstoffe bilden. Sie werden mit geringen Anteilen von Pigmenten, Farbstoffen, Additiven und Füllstoffen vermengt, um je nach Anwendungsbereich passende Eigenschaften (z. B. Undurchlässigkeit, Stabilität, Langlebigkeit) zu erhalten (Seitz et al. 2022, S. 19). Aufgrund ihrer vielfältigen Eigenschaften, ihrem geringen Gewicht und günstiger Produktionskosten werden Kunststoffe in vielen verschiedenen Feldern eingesetzt (Huber-Humer 2020, S. 357). Unterschieden wird zwischen plastischen Kunststoffen (thermoplastische Polymerwerkstoffe), harten Kunststoffen (Duroplaste) und weichen Kunststoffen (Elastomere). Thermoplastische Polymerwerkstoffe stellen mit 70% der weltweiten Kunststoffherstellung den größten Anteil dar (Gehrke et al. 2020, S. 708). Auf ihnen liegt der Fokus dieses Kapitels.

Aktuell wird in Deutschland weniger als die Hälfte der Kunststoffabfälle recycelt – 2019 wurden 46% einer werkstofflichen Verwertung zugeführt (UBA o.J.j). Bei der werkstofflichen Verwertung bleibt der Kunststoff als Material erhalten und wird zu Rezyklat verarbeitet. Kunststoffabfälle, die einen geringen Reinheitsgrad, starke Verschmutzungen, einen hohen Fremdstoffinhalt aufweisen oder bei denen eine werkstoffliche Verwertung aus wirtschaftlichen Gründen ausgeschlossen ist (z. B. Verbundstoffe), werden zur Erzeugung von Wärme und Strom oder als Ersatzbrennstoffe genutzt (Prognos/INFA 2020, S. 125; Seitz et al. 2022, S. 161). Diese energetische Verwertung betraf 2019 53% der anfallenden Kunststoffabfälle (UBA o.J.j).

Die Verpackungsindustrie zählt zu den größten Verbrauchern von Kunststoffen, da diese besonders geeignet sind, um die vielfältigen Funktionen von Verpackungen zu erfüllen (z. B. Schutz und Transport von Konsumgütern) (Prognos/INFA 2020, S. 121). Seit Beginn der 2000er Jahre hat sich der Pro-Kopf-Verbrauch von Kunststoffverpackungen in Deutschland nahezu verdoppelt. 2019 verbrauchte jeder Haushalt im Durchschnitt 39 kg Kunststoffverpackungen (Abb. 3.1). Diese Entwicklung ist u. a. auf den steigenden Verbrauch von Kunststoffflaschen für Getränke, von Kleinverpackungen und Kunststoffdosen, auf den steigenden Einsatz von (aufwendigeren) Kunststoffverschlüssen sowie auf den Onlinehandel zurückzuführen (Burger et al. 2022, S. 56). 2021 machte die deutsche Kunststoffindustrie einen Umsatz von 62,3 Mrd. Euro, davon rund 10,4 Mrd. Euro mit der Herstellung von Verpackungsmitteln (Statista o.J.m).

Abb. 3.1 Entwicklung des Pro-Kopf-Verbrauchs von Kunststoffverpackungen in Deutschland (1991 bis 2020)



Quelle: Burger et al. 2022

Aus ökologischer Perspektive verursacht die Herstellung von Kunststoff(verpackungen) Treibhausgasemissionen, verbraucht Energie und Ressourcen (z. B. Rohöl, Wasser) und setzt Schadstoffe frei. Darüber hinaus finden sich Kunststoffe zunehmend in der Umwelt wieder, beispielsweise in den Meeren und an Stränden. Kunststoffe gelangen aber auch in Binnengewässer, Trinkwasser, Böden und dadurch auch in Organismen. Mit einem effektiven Abfallmanagement und dem möglichst langen Verbleib von Ressourcen in ihren Kreisläufen, u. a. durch Recycling, können die Eintragsmengen in die Umwelt reduziert werden (UBA 2019b, S. 14 ff.). Generell bildet die

Substitution von Primärkunststoffen durch Sekundärkunststoffe eine zentrale Stellschraube, um Umwelt und Ressourcen zu schonen und Treibhausgasemissionen zu senken.

Stark verschmutzte Abfälle, bei denen keine Aussicht auf eine hochwertige Verwertung besteht, wurden in der Vergangenheit vor allem ins Ausland exportiert. In den letzten Jahren hat sich diese Praxis u. a. aufgrund neuer gesetzlicher Regelungen stark verändert. So wurden 2018 z. B. von China die Anforderungen an Importe von Kunststoffabfällen verschärft. Zudem wurden 2021 strengere EU-Regelungen für den Export von Kunststoffen eingeführt (BMU 2021). In der Folge werden heute 33 % weniger Kunststoffabfälle als noch vor 10 Jahren aus Deutschland exportiert (Destatis 2021b). Auch dies führt dazu, dass neue Verwertungswege insbesondere für Kunststoffverpackungen geringerer Qualität gefunden werden müssen.

3.1.2 Stoffströme und Rahmenbedingungen

In Deutschland ist die Organisation der Sammlung und Verwertung von Kunststoffabfällen durch das Prinzip der Produktverantwortung geprägt, nach welchem Hersteller sich an den Kosten der Sammlung und Verwertung zu beteiligen haben. Außerdem werden Anreize gesetzt, Verpackungen recyclingfähig zu gestalten. Wie Sammlung und Verwertung in Deutschland organisiert sind, wie sich die Abfallmengen zusammensetzen und welchen Stand Sammlung, Verwertung und Einsatz von Kunststoffzyklen erreicht haben, ist Gegenstand der folgenden Ausführungen.

Organisation der Sammlung und Verwertung

Die Richtlinie 94/62/EG²⁰ (nachfolgend Verpackungsrichtlinie) bestimmt den gesetzlichen Rahmen für Sammlung und Recycling von Verpackungen. In Deutschland wird mit dem VerpackG die Verpackungsrichtlinie ins deutsche Recht umgesetzt sowie Inverkehrbringen, Rücknahme und hochwertige Verwertung von Verpackungen geregelt. Nach dem Prinzip der erweiterten Herstellerverantwortung (§ 7 VerpackG) sind Hersteller von Verpackungen dazu verpflichtet, sich an der Entsorgung der von ihnen in Verkehr gebrachten Verpackungen finanziell zu beteiligen und müssen sich dafür bei der Zentralen Stelle Verpackungsregister registrieren (§ 9 VerpackG). So sind Verpackungen, die nach Gebrauch typischerweise beim privaten Endverbraucher als Abfall anfallen, getrennt von gemischten Siedlungsabfällen zu sammeln und einer Verwertung zuzuführen (§§ 13 u. 14 VerpackG).²¹ Sie werden in der Regel über die gelbe Tonne oder den gelben Sack gesammelt. Die am Markt aktiven dualen Systeme organisieren im Auftrag der Hersteller die Sammlung, Sortierung und Verwertung von Verpackungen. Dafür beauftragen sie öffentliche oder private Entsorgungsunternehmen, die die Durchführung der Sammlung für sie übernehmen (§ 23 VerpackG). Dies hat in Abstimmung mit den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern – in der Regel Städte oder Landkreise, die für die Erfassung von Siedlungsabfällen zuständig sind – zu erfolgen (§§ 22 u. 23 VerpackG). Einige öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger haben auf Basis des § 22 Abs. 5 VerpackG Wertstofftonnensysteme eingeführt – anstelle von gelben Säcken und gelben Tonnen. Über die Wertstofftonnen können Leichtverpackungen und stoffgleiche Nichtverpackungen (z. B. Kunststoff- oder Metallgegenstände) gemeinsam gesammelt werden.²²

Um die Recyclingfähigkeit von Kunststoffverpackungen zu stärken, fördert das VerpackG die ökologische Gestaltung von Verpackungen. Nach § 21 Abs. 1 VerpackG sind die dualen Systeme verpflichtet, entsprechende Anreize bei der Herstellung von Verpackungen zu schaffen. Es sollen möglichst Materialien und Materialkombinationen verwendet werden, die hochgradig rezyklierbar sind, sowie Rezyklate und nachwachsende Rohstoffe eingesetzt werden. Gesetzlich werden die Anreize über die Beteiligungsentgelte, welche die Hersteller für die Sammlung und Verwertung von systempflichtigen Verpackungen durch die dualen Systeme zu entrichten haben. Darüber hinaus ist gemäß § 21 VerpackG ein (dynamischer) Mindeststandard für die Recyclingfähigkeit von Verpackungen einzuführen, mit welchem ein einheitlicher Rahmen vorgegeben werden soll, um die Recyclingfähigkeit

²⁰ Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle, zuletzt geändert am 4.7.2018 durch die Richtlinie (EU) 2018/852 zur Änderung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle

²¹ Weist ein alternatives System wie beispielsweise eine einheitliche Wertstofftonne ein vergleichbares Potenzial für die Vorbereitung zur Wiederverwendung oder zur Verwertung auf, kann von dieser Regel abgewichen werden.

²² Ist eine gleichwertige Branchenlösung für die Rücknahme seiner Verpackungen vorhanden, ist der Hersteller von der Pflicht ausgenommen, sich an den dualen Systemen zu beteiligen (§ 8 VerpackG).

von Verpackungen zu bemessen. Der Standard wird unter Beteiligung eines Expertenkreises, der sich aus Akteuren entlang der Wertschöpfungskette zusammensetzt, jährlich überprüft und ggf. angepasst und von der Zentralen Stelle Verpackungsregister (ZSVR) herausgegeben. Der Mindeststandard dient den dualen Systemen als Grundlage für die Berechnung der Beteiligungsentgelte.

Das Politikfeld der Abfall- und Kreislaufwirtschaft erweist sich momentan als extrem dynamisch. So dürften sich anstehende Änderungen der Verpackungsrichtlinie künftig auf das deutsche Abfallrecht auswirken (Kasten 3.1).

Kasten 3.1 Geplante europäische Vorschriften für Verpackungen

Im November 2022 schlug die EU-Kommission (EK 2022f) neue Vorschriften für Verpackungen vor, die sich in einer Überarbeitung der Verpackungsrichtlinie niederschlagen sollen. Dabei sollen die Ziele des europäischen Grünen Deals (EK 2019) umgesetzt werden, das heißt überflüssige Verpackungen eingeschränkt, unnötige Verpackungen verboten und für wiederverwendbare Verpackungsoptionen gesorgt werden. Darüber hinaus sollen klare Kennzeichnungen zur Unterstützung des Recyclings von Verpackungen eingeführt werden. Mit der Überarbeitung der Rechtsvorschriften für Verpackungen und Verpackungsabfälle soll der Rahmen dafür geschaffen werden, dass alle Verpackungen auf dem EU-Markt bis 2030 wirtschaftlich recycelt werden können. Zudem sollen verbindliche Ziele bezüglich eines Anteils recycelter Kunststoffe in Verpackungsmaterialien festgeschrieben werden.

Mengenaufkommen und Abfallzusammensetzung

Verpackungen werden aus unterschiedlichen Kunststoffrezepturen hergestellt. Thermoplastische Polymerwerkstoffe kommen am häufigsten in Verpackungen vor (TAB 2020), jedoch mit unterschiedlichen Rezepturen. Besonders häufig werden Polyethylen (PE), Polyethylenterephthalat (PET), Polypropylen (PP) und Polystyrol (PS) in Verpackungen eingesetzt:

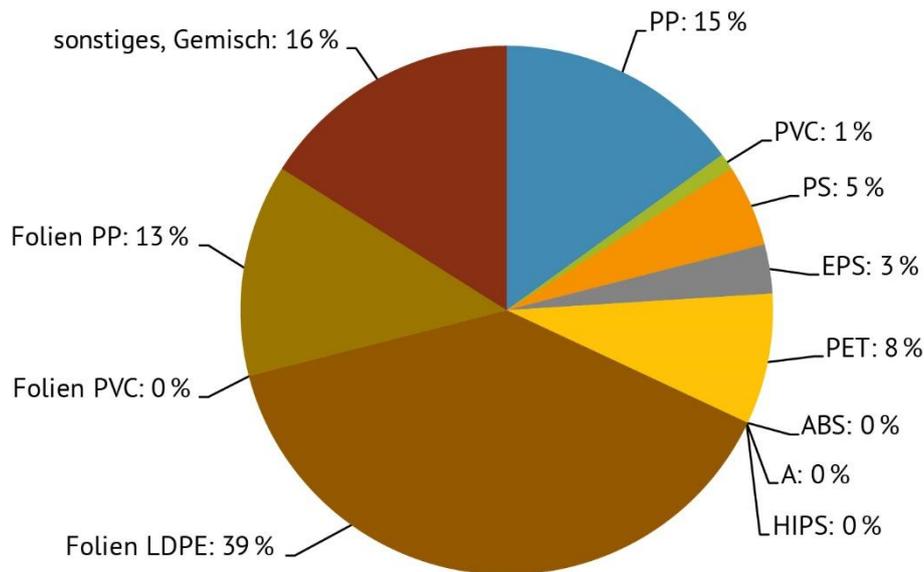
- › PE wird beispielsweise in Frischhaltefolien, Müllbeutel oder Tragetasche eingesetzt.
- › PET kommt vor allem für die Herstellung von Kunststoffflaschen zum Einsatz.
- › PP und PS kommen häufig in Lebensmittelverpackungen vor.

Kunststoffe werden nicht nur als Monomaterialien eingesetzt. Verbundwerkstoffe²³ bestehen aus einer Kombination von mindestens zwei verschiedenen Komponenten bzw. aus mehrschichtigen Materialien (Detzel et al. 2018, S. 7). Im Lebensmittelbereich werden sie insbesondere für das Verpacken von Fleisch, Wurst und Fisch verwendet (Detzel et al. 2018, S. 15).

Wie der Abbildung 3.2 zu entnehmen ist, bestehen Kunststoffverpackungen, die beim privaten Endverbraucher anfallen, mit 39% zum größten Teil aus Folien aus Polyethylen niedriger Dichte (LDPE-Folien). Der Anteil an sonstigen Verpackungen, auch Gemisch genannt, beträgt 15%. Mengenmäßig folgen Polypropylen (14%) und Polypropylenfolien (12%). Der Anteil an PET ist vergleichsweise niedrig, da die meisten PET-Verpackungen in Flaschen vorkommen und über eigene Rücknahmesysteme der Hersteller gesammelt werden und deshalb in der Abfallstatistik zu Leichtverpackungen nicht erfasst werden.

23 Gemäß § 3 VerpackV müssen Monomaterialien zu mindestens 95% aus einem Hauptmaterial bestehen.

Abb. 3.2 Zusammensetzung der Abfallfraktion nach Kunststoffsorten



Eigene Darstellung nach Knappe et al. 2021, S. 124

Aktuelle Verwertungsquoten

Das VerpackG setzt Ziele für die Verwertung von Verpackungen in Deutschland fest. Diese wurden in den letzten Jahren über Novellierungen des VerpackG nach und nach verschärft und dienen u. a. dazu, die europäischen Zielvorgaben der Verpackungsrichtlinie umzusetzen. Die Richtlinie sieht vor, dass alle Verpackungsabfälle jährlich mindestens 65 Massen-% bis 2025 (70 % bis 2030) zu recyceln sind. Für die wichtigsten Materialarten legt das VerpackG genaue Sammel- und Verwertungsziele fest, die teilweise strenger sind als die Ziele, die die Verpackungsrichtlinie vorsieht. Es werden Mindestanteile für die bei den dualen Systemen beteiligten Verpackungen festgelegt, die der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder dem Recycling zuzuführen sind. Für Kunststoffverpackungen gilt insbesondere:

- › Kunststoffe, die durch die dualen Systeme gesammelt werden, sind zu mindestens 90 Massen-% einer Verwertung zuzuführen. Dabei sind mindestens 70 % dieser Verwertungsquote durch werkstoffliche Verwertung sicherzustellen (§ 16 Abs. 2 VerpackG).
- › Einwegkunststoffgetränkeflaschen sind bis auf wenige Ausnahmen ab dem 1. Januar 2025 mindestens zu 77 % und ab dem 1. Januar 2029 mindestens zu 90 % zum Zweck des Recyclings getrennt zu sammeln (§ 1 Abs. 3 VerpackG).

Die über die gelbe Tonne oder den gelben Sack erfassten Verpackungen bestehen durchschnittlich aus ca. 50 % Kunststoffen, wovon zwei Drittel verwertet werden können (Christiani/Beckamp 2020, S. 140). Der Stand der Verwertung ist der Tabelle 3.1 zu entnehmen. Von den 3.219 kt im Jahr 2020 in Deutschland angefallenen Kunststoffverpackungen wurden insgesamt 1.930 kt werkstofflich verwertet (Burger et al. 2022, S. 100 u. 177). Mit einer Verwertungsquote von 59,6 % nach der Berechnung der ZSVR wurde das für 2020 geltende Ziel von 58,5 % werkstofflicher Verwertung (UBA o.J.m) durch die dualen Systeme erreicht. Um die seitdem verschärften Quotenvorgaben zu erfüllen, sind insbesondere bei Kunststoffen und sonstigen Verbunden auf Kunststoffbasis deutliche Steigerungen nötig.

Tab. 3.1 Verwertung von Verpackungsabfällen aus Kunststoffen (2020)²⁴

| | angefallene Kunststoffabfälle | werkstoffliche Verwertung | energetische Verwertung |
|---|----------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| gesamt | 3.219 kt | 1.930 kt | 1.264 kt |
| durch die dualen Systeme einer Verwertung zugeführt | 1.253 kt | 727 kt | 513 kt |

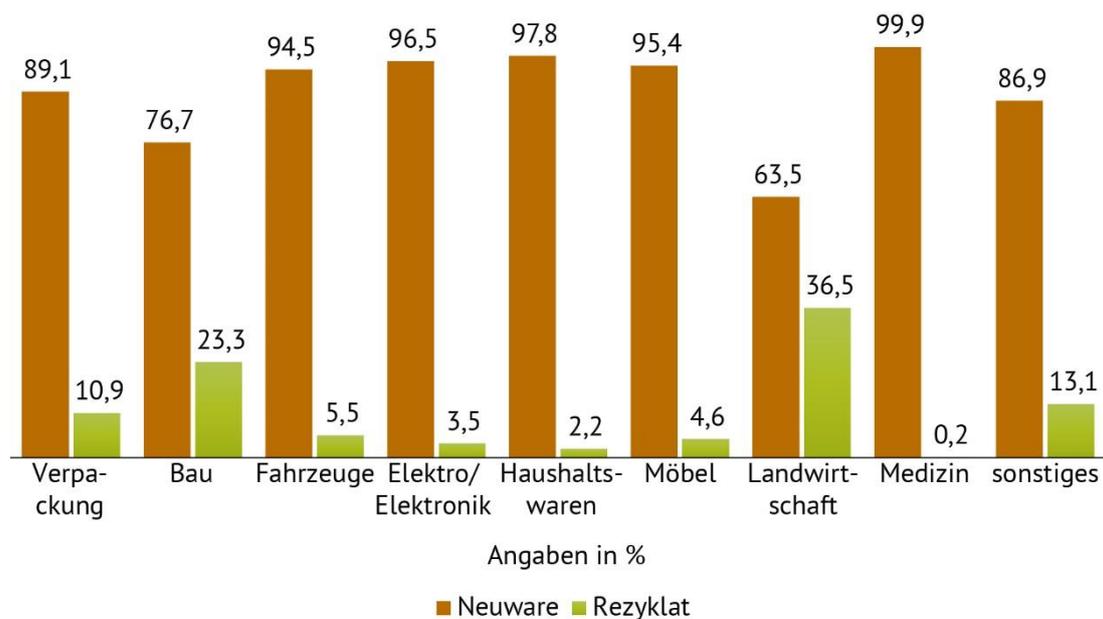
Quelle: Burger et al. 2022, S. 100 u. 177 f.

Verpackungsabfälle, die z.B. über Pfandsysteme, Branchenlösungen oder sonstige Rücknahmesysteme eingesammelt werden, schneiden bei der werkstofflichen Verwertung mit 64% deutlich besser ab als die dualen Systeme, welche Kunststoffe gemischt erfassen (Burger et al. 2022, S. 98). So liegen z.B. die hohen PET-Rückgewinnungswerte daran, dass PET-Flaschen sortenrein über ein Pfandsystem erfasst werden, wodurch eine Kontamination nahezu ausgeschlossen und Rezyklat hoher Qualität erzeugt werden kann.

Einsatz von Sekundärkunststoffen in Verpackungen

2019 lag das Verhältnis von eingesetzten Sekundärkunststoffen zum gesamten Kunststoffmaterialaufwand (Substitutionsquote) bei 13,7% (Lindner et al. 2020, S. 17). Die anteilige Verarbeitung von Kunststoffrezyklaten variiert von einer Branche zur anderen stark. In der Landwirtschaft ist sie mit 36,5% am höchsten. Es folgt der Bausektor mit 23,3%, anschließend die Verpackungsindustrie mit 10,9% (Lindner et al. 2020, S. 16) (Abb. 3.3).

Abb. 3.3 Verarbeitung von Neuware und Rezyklat nach Branchen (2019)



Quelle: Eigene Darstellung nach Lindner et al. 2020, S. 16

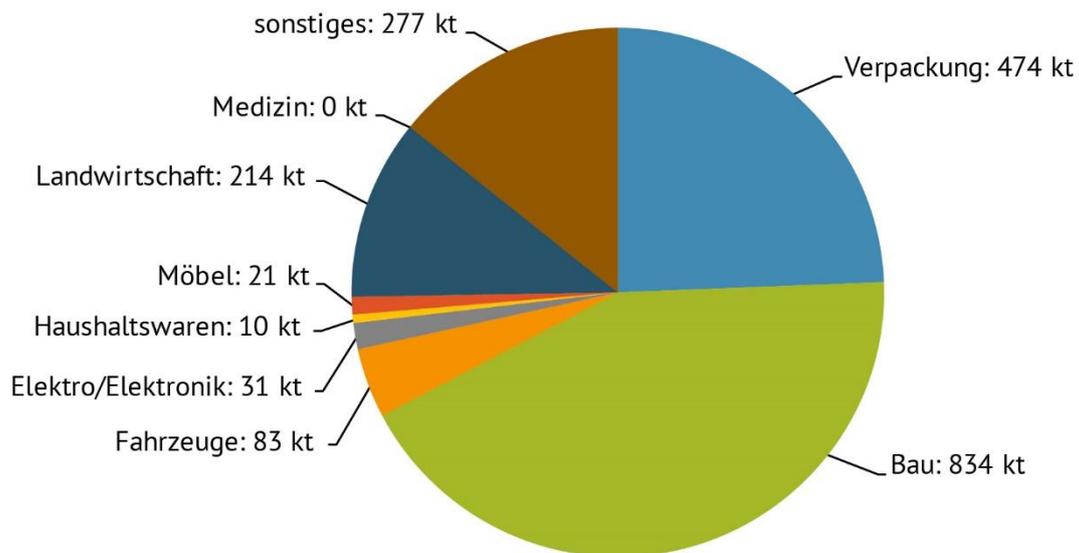
Die Kunststoffbedarfe und -verbräuche sind von Branche zu Branche unterschiedlich und demnach auch die absoluten Rezyklatverbrauchsmengen. Die größten Einsatzmengen von Kunststoffrezyklaten sind für 2019 mit

²⁴ Nach der Berechnungsmethode vor Durchführungsbeschluss

834 kt im Bausektor und mit 474 kt in der Verpackungsindustrie zu verzeichnen, die zugleich von allen Branchen den größten Kunststoffverbrauch aufweisen. Auch in der Landwirtschaft werden vergleichsweise große Mengen an Rezyklaten verarbeitet (2019: 214 kt) (Abb. 3.4).

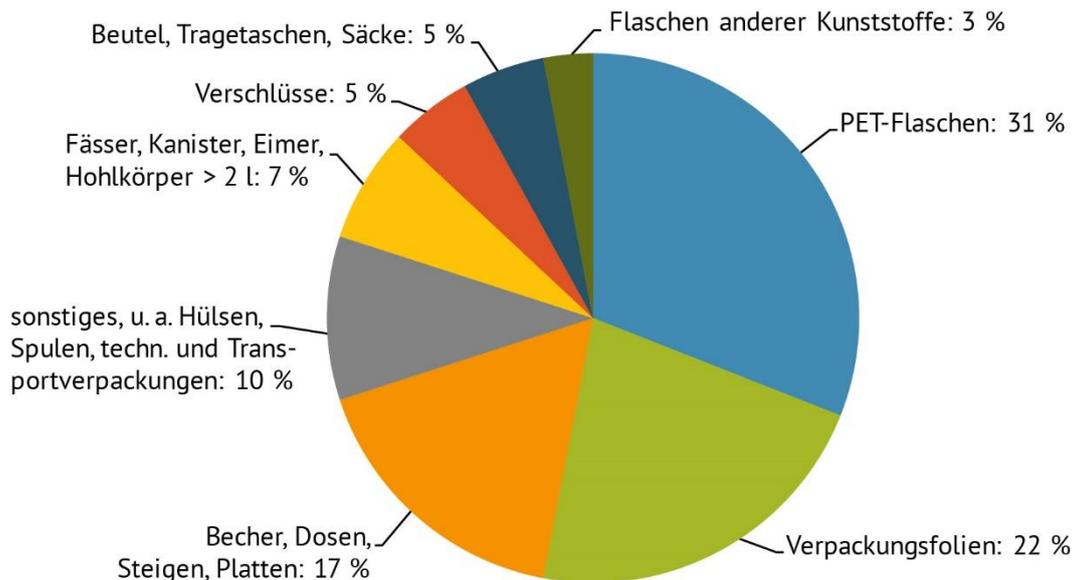
In der Regel werden Kunststoffrezyklate für anspruchslosere Anwendungen eingesetzt als Primärkunststoffe und sind häufig nicht dazu geeignet, im originalen Einsatzbereich wiederverwendet zu werden. Dies hindert die Schließung von Kreisläufen – man spricht auch von Downcycling (Seitz et al. 2022, S. 35). Dies liegt daran, dass Kunststoffabfälle, die nicht sortenrein gesammelt werden bzw. wofür keine produktspezifischen Rücknahmesysteme vorhanden sind, in der Regel ein extrem heterogenes Gemisch darstellen (Roosen et al. 2020). Durch die Kontaminationen und Verunreinigungen können genaue Funktionalitäten und Farben von Rezyklaten nicht immer genau bestimmt werden. Dies ist besonders problematisch, wenn für den vorgesehenen Einsatzzweck der Kunststoffe klar definierte Eigenschaften notwendig sind (z. B. Geruchsneutralität), die bei Kunststoffrezyklaten nicht immer garantiert werden können (Seitz et al. 2022, S. 35).

Abb. 3.4 Verarbeitung von Rezyklat nach Branchen (2019)



Quelle: Eigene Darstellung nach Lindner et al. 2020, S. 16

Abb. 3.5 Verarbeitung von Rezyklat in Verpackungen nach Produkt in Deutschland (2019)



Quelle: IK 2021, S.40

Da bereits geringe Kontaminationen die Produkteigenschaften empfindlich stören können (Seitz et al. 2022, S.25), schmälert dies die Einsatzmöglichkeiten von Kunststoffrezyklaten entsprechend. Die Folge ist, dass Rezyklate häufig in Anwendungsbereichen eingesetzt werden, wo Anforderungen an Geruch und Farbe niedrig sind (Knappe et al. 2021, S.107). Wenn sie in Verpackungen verarbeitet werden, dann meist für die Herstellung von PET-Flaschen (31 %), Folien (22 %) sowie Becher oder Dosen (17 %) (Abb. 3.5).

Sobald die Abfalleigenschaft beendet ist und die Rezyklate in neue Produkte zur Anwendung kommen sollen, greifen die geltenden Regularien für das Chemikalien- bzw. Produktrecht. Die REACH-Verordnung, welche die Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung von Chemikalien in der EU regelt, verpflichtet Hersteller, Vertreiber und Anwender von Rezyklaten, die Ungefährlichkeit der von ihnen hergestellten bzw. in Verkehr gebrachten Produkte nachzuweisen (Kap. 2.2.2).

Der Einsatz von Kunststoffrezyklaten in Lebensmittelverpackungen im Speziellen unterliegt Anforderungen, die darüber hinausgehen. Relevant ist hier insbesondere die Verordnung (EU) 2022/1616²⁵. Demnach dürfen Kunststoffrezyklate nur dann direkten Kontakt zu Lebensmitteln haben, wenn sie folgende Kriterien erfüllen:

- > Die Verpackungen wurden über EFSA-zertifizierte Recyclingverfahren hergestellt.
- > Ein Herkunftsnachweis der Rezyklate liegt vor.
- > Ein Nachweis, dass nicht nur die Rezyklate, sondern auch die Lebensmittelverpackungen selbst frei von REACH-Chemikalien und sonstigen Kontaminationen sind, liegt ebenfalls vor.
- > Aufgrund dieser hohen Anforderungen an den Einsatz von Rezyklaten in Lebensmittelverpackungen werden Lebensmittelverpackungen – mit der Ausnahme von Getränkekartons und PET-Flaschen – in der Regel aus Primärkunststoffen hergestellt (Christiani/Beckamp 2020, S.142; Prognos/INFA 2020, S.128). 40 % (1,2 Mio. t.) der eingesetzten Kunststoffverpackungen entfallen auf den Lebensmittelbereich (Detzel et al. 2018, S. 17). Davon entfallen 580 kt auf Getränkeverpackungen, die sortenrein gesammelt werden und wieder im gleichen Segment eingesetzt werden. Die restlichen 724 kt Kunststoffabfälle, die im Lebensmittelbereich jährlich entstehen (Detzel et al. 2018, S. 16 f.), werden downcycelt oder energetisch verwertet (Seitz et al. 2022, S. 33).

²⁵ Verordnung (EU) 2022/1616 über Materialien und Gegenstände aus recyceltem Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen, und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 282/2008

3.1.3 Recycling von Kunststoffverpackungen: Stand der Technik und innovative Verfahren

Kunststoffe setzen sich häufig aus mehreren Komponenten zusammen. Zudem weisen sie häufig als Abfallfraktion einen hohen Fremd- und Begleitstoffanteil auf. Als *Fremdstoffe* versteht man solche Stoffe, die zusammen mit dem Kunststoff entsorgt werden. Es handelt sich dabei um Produktreste (z. B. Reinigungsmittel, Lebensmittelreste mit Biokulturen) oder um Abfälle, die nicht zum Recycling bestimmt waren. *Begleitstoffe* sind hingegen eng mit dem Kunststoffprodukt verbunden. Dazu gehören Etiketten, Klebstoffe und Lackierung. Kunststoffe können aber auch *zusätzliche Komponenten* enthalten, wie solche, die zur Erfüllung der Produktspezifikationen (z. B. Undurchlässigkeit, Festigkeit, Farbigkeit, Robustheit) oder zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit eingesetzt werden. Verunreinigungen durch Fremd-, Begleitstoffe oder zusätzliche Komponenten können die Qualität und so das Einsatzspektrum des jeweiligen Rezyklats beeinträchtigen (Seitz et al. 2022, S. 19). Qualitativ hochwertige Rezyklate weisen wenig solche Verunreinigungen auf und sind geruchslos.

Um als Rezyklate verarbeitet werden zu können, müssen gesammelte Kunststoffabfälle folglich aufbereitet und sortiert werden. Welche Schritte genau notwendig sind, hängt von der Herkunft bzw. der Qualität der Ausgangsstoffe ab:

- › *Typenreine Sortierung von Kunststoffen*: Die Ausgangsstoffe (Leichtverpackungen oder Kunststoffe je nach Sammelsystem) werden so sortiert, dass jede einzelne Kunststofffraktion eine möglichst einheitliche Kunststoffrezeptur aufweist (Seitz et al. 2022, S. 25). Sind die Ausgangsstoffe sehr heterogen, wirkt es sich negativ auf die Qualität der Rezyklate aus (Seitz et al. 2022, S. 73).
- › *Entfernung von Fremd- und Begleitstoffen*: Durch Sortierung und Behandlung der Abfälle wird darauf abgezielt, Produktreste oder auch Etiketten, Klebstoffe und Lackierungen aus dem Ausgangsmaterial abzutrennen bzw. zu entfernen.

Die Behandlung von Verbundwerkstoffen, die aus mindestens zwei verschiedenen Komponenten bestehen (z. B. Multilayerfolie mit Undurchlässigkeitseigenschaften im Lebensmittelbereich), stellt eine besondere Herausforderung dar. Die Abtrennung der Komponenten ist mit einem hohen Mehraufwand verbunden, da Lösungsmittel eingesetzt oder thermochemische Prozesse angewendet werden müssen (Seitz et al. 2022, S. 24).

Im Folgenden werden Stand und Perspektiven der Aufbereitung und Sortierung sowie des nachfolgenden werkstofflichen bzw. chemischen Recyclings skizziert. Zum Schluss werden relevante Verfahren und Technologien für den Einsatz von Rezyklaten bei der Herstellung von Produkten beschrieben.

Aufbereitung und Sortierung

Verfahren der Aufbereitung und Sortierung unterscheiden sich nach Abfallfraktion bzw. Inputmaterial (Knappe et al. 2021, S. 47). Werden Kunststoffverpackungen über die Gelbe Tonne oder den Gelben Sack zusammen mit anderen Verpackungsmaterialien gesammelt, müssen sie eine erste Aufbereitungsstufe durchlaufen (dazu und zum folgenden Seitz et al. 2022, S. 69 f.). Zunächst werden schwerere Wertstoffe sowie metallische Verpackungsabfälle aussortiert und Störstoffe entfrachtet. Dazu zählen Holz, Papier, Karton, Keramik, Glas und Steine. Anschließend werden die Verpackungsabfälle gereinigt. Verfügt die Anlage über die Möglichkeit der Sortierung von Kunststoffverpackungen, werden sie in möglichst sortenreine Fraktionen (insbesondere nach Kunststofftyp und Farbe) sortiert.

Sortieranlagen für Leichtverpackungen, die die Kunststoffabfallfraktion separat behandeln können, sind in der Regel mit Nahinfrarot-Sortierung (NIR) ausgestattet. NIR-Sensoren dienen dazu, unterschiedliche Kunststofftypen zu erkennen, die anschließend mithilfe von Luftströmen getrennt werden können. Da schwarze Kunststoffe von NIR-Sensoren nicht erkannt werden, werden diese typunabhängig ausgesondert.²⁶ Bei Materialverbunden oder Verpackungen aus unterschiedlichen Packmitteln wird allerdings nur das Oberflächenmaterial vom NIR-Sensor erkannt, was zu Fehlsortierungen führt. Dafür kann mittlerweile optional optoelektronische Sortiertechnik als zusätzliche, allerdings teure Trennstufe nachgeschaltet werden (Seitz et al. 2022, S. 69 f.). Die genaue Aus-

²⁶ Dafür kann mittlerweile optional optoelektronische Sortiertechnik als zusätzliche, allerdings teure Trennstufe nachgeschaltet werden, um auch schwarze Kunststoffe für das sortenreine Recycling erfassen zu können.

stattung ist in jeder Anlage unterschiedlich. In den letzten Jahren wurden immer mehr vollautomatische Sortieranlagen in Betrieb genommen, die kombinierte Sensorsysteme zur Erkennung von Größe, Materialart und Farben einsetzen (Prognos/INFA 2020, S. 28 u. 50). Produkt des mehrstufigen Verfahrens sind vorkonditionierte Ballenware oder auch ggf. bereits vorzerkleinertes Material (Seitz et al. 2022, S. 69 f.).

Die enorme Vielfalt der in Verpackungen eingesetzten Pigmente, Farbstoffe und Additiven behindert eine Sortierung nach Eigenschaft (Seitz et al. 2022, S. 21). Es besteht keine bundesweite einheitliche Vorgabe zur Spezifität der Sortierung, sondern die Anforderungen werden durch die einzelnen Betreiber der dualen Systeme festgelegt. In der Regel erfolgt die Sortierung der formstabilen Kunststoffe in die Einzelsorten PP, PE, PET und PS. Darüber hinaus liegen am Ende der Sortierung in der Regel Folien, große Kunststoff-Hohlkörper, Gemische sowie eine gemischte Fraktion mit hauptsächlich schwarzen Kunststoffen vor (Knappe et al. 2021, S. 51 f.). Üblicherweise werden die Vorgaben der dualen Systeme hinsichtlich der zu erreichenden Reinheit (maximaler Störstoffgehalt) der sortierten Verpackungsabfälle nicht erreicht (Knappe et al. 2021, S. 52 f.).

Innovative Verfahren

Insbesondere der Einsatz zusätzlicher Detektoren zur Identifikation von Kunststoffsubtypen und die kombinierte Sortierung nach Form und Kunststoff stellen zentrale technische Stellschrauben dar, mit denen Aufbereitung und Sortierung verbessert werden können (Knappe et al. 2021, S. 112). Aktuell werden die Detektierung und Separierung von Polymerarten sowie die Sortierung nach Größe, LVP/Hartkunststoffe/Hohlkörper, Verunreinigungen/Fremdstoffe, Farben und Degradationsgraden erforscht (Seitz et al. 2022, S. 144). Eine weitere zentrale Stellschraube zur Erschließung des technischen Potenzials bei der Sortierung stellt die Erweiterung des Einsatzes von Markern zur Kennzeichnung und automatischen Erkennung von Kunststoffen (Tracking- und Tracingtechnologien) dar (Knappe et al. 2021, S. 112) (dazu auch Kap. 3.1.3).

Recycling

Aus den vorsortierten oder separat erfassten Kunststofffraktionen stellen Recyclingunternehmen Kunststoffzyklate her.²⁷ Bei der werkstofflichen Verwertung steht die Rückgewinnung des Kunststoffpolymers, welches für die Verarbeitung zu neuen Produkten eingesetzt werden kann, im Vordergrund (Mellen/Becker 2022, S. 440). In der Praxis hat sich das trocken-/nassmechanische Verfahren durchgesetzt. Dabei werden die Kunststoffabfälle erstens trockenmechanisch behandelt: Metalle werden abgeschieden, Abfälle zerkleinert und Störstoffe abgetrennt. Daraufhin werden sie nassmechanisch aufbereitet. Dafür laufen die Stoffe eine weitere Zerkleinerung durch, werden gewaschen, vorhandener Schmutz entfernt und die Partikel nach Dichte sortiert (Knappe et al. 2021, S. 73). Nach Trocknung werden sie zu Mahlgut, Agglomerat, Regranulat oder Regenerat verarbeitet (Seitz et al. 2022, S. 72 f.):

- › Bei Mahlgut handelt es sich um zerkleinerte Kunststoffabfälle einer Polymerart oder einer homogenen monopolymeren Produktcharge.
- › Agglomerat (Kompaktat, Flakes) ist verkugelt Material, welches aus guten Qualitäten von Kunststofffolien hergestellt wird. Es entsteht durch Erhitzung unter dem Schmelzpunkt. Zur Entfernung von Verunreinigungen, oxidativem Sauerstoff und ggf. Feuchte ist die Weiterverarbeitung erforderlich.
- › Regranulat entsteht durch Erhitzung von Mahlgut über dem Schmelzpunkt. Regranulat ist kugelförmig, enthält kaum Staub und ist einem Granulat aus Primärmaterial ähnlich.
- › Regenerat ist ein aus Mahlgut, Agglomerat oder Regranulaten hergestelltes Produkt. Durch eine Zugabe von Additiven in einem zusätzlichen Aufschmelzschrift erhält das Produkt bessere, definierte Eigenschaften.

Mischkunststoffe bzw. Leichtverpackungen werden überwiegend trockenmechanisch, teilweise auch nassmechanisch behandelt und zu Agglomeraten verarbeitet. Die genaue Reihenfolge der Prozessschritte hängt u. a. von der Qualität der aufzubereitenden Kunststoffvorprodukte ab (Knappe et al. 2021, S. 93). Um den Rezyklaten für die vorgesehene Anwendung passende Eigenschaften zu verleihen bzw. um Gerüche zu eliminieren, können Rezyklathersteller geeignete Additive beimengen (Knappe et al. 2021, S. 80).

²⁷ Viele Recyclingunternehmen vereinen die Vorkonditionierung und die Verwertung, wobei ein Recyclingunternehmen in der Regel nur einzelne Kunststofftypen verarbeiten kann und die restlichen an spezialisierten Verarbeiter weiterverkauft (Seitz et al. 2022, S. 70).

Die Verarbeitung der Rezyklate zu Produkten erfolgt mit den gleichen Verfahren wie die Verarbeitung von Primärwaren (Knappe et al. 2021, S. 100). Häufig werden Rezyklate mit Primärwaren bei der Produktherstellung vermengt, um die Konzentration etwaiger Verunreinigungen bzw. Unsicherheiten bezüglich der Eigenschaften des Kunststoffes zu reduzieren. Sind die erzeugten Rezyklate von minderwertiger Qualität, können sie in wenig anspruchsvollen Teilkomponenten eines Produktes verarbeitet werden (Seitz et al. 2022, S. 123). Allerdings lassen sich Kunststoffprodukte, die aus Rezyklaten oder einer Mischung aus Primär- und Sekundärrohstoffen bestehen, schlechter als Primärkunststoffe rezyklieren. Der Grund dafür ist, dass die daraus gewonnenen Rezyklate stärker verunreinigt sind als Primärkunststoffe und daher weniger recyclingfähig sind (Seitz et al. 2022, S. 130).

Innovative Verfahren

Perspektivisch könnten *lösemittelbasierte Verfahren* (Solvent-based Purification) zur Verbesserung der Qualität von Rezyklaten beitragen. Polymere werden dabei mithilfe von maßgeschneiderten Lösemitteln von Fremdstoffen, Additiven oder Schadstoffen befreit (Knappe et al. 2021, S. 72). Zwar kommen chemische Mittel zum Einsatz, dennoch haben lösemittelbasierte Verfahren im Gegensatz zu Verfahren des chemischen Recyclings keine Auswirkung auf die Struktur des Polymers selbst (Seitz et al. 2022, S. 78). Technisch machbar sind lösemittelbasierte Verfahren beispielsweise für PS, PE und PP. Der Fokus kommerzieller Projekte im Bereich lösemittelbasierte Verfahren lag bislang vorrangig auf homogenen Materialien. Die Technologie ist dennoch bisher wenig am Markt vertreten, auch wenn in den letzten Jahren mehrere Pilotanlagen gestartet sind. Seit Kurzem wird diskutiert, lösemittelbasierte Verfahren auch für Verbundmaterialien, darunter insbesondere für Kunststoffverpackungen, anzuwenden (Crippa et al. 2019, S. 142). In Deutschland hat die APK AG lösemittelbasiertes Recycling für gemischte Kunststoffabfälle und Mehrschichtverpackungen patentiert und betreibt eine Anlage in Merseburg. Diese Newcycling®-Technologie (APK AG o.J.) erzeugt aus gemischten Kunststoffabfällen und Mehrschichtverpackungen sortenreine Granulate mit Eigenschaften ähnlich neuer Kunststoffe. Auch die Fraunhofer Gesellschaft hat in dem Bereich mehrere Patente angemeldet, z.B. zum Recycling von Karbonfasern und Verbundmaterialien (CreaSolv®-Prozess; Fraunhofer IVV o.J.). Diese Verfahren haben sich bislang aufgrund zu hoher Kosten im großtechnischen Maßstab nicht durchgesetzt (Knappe et al. 2021, S. 72).

Unter *chemischem Recycling* werden Aufbereitungsverfahren verstanden, die Kunststoffpolymere in ihre Grundbausteine mittels thermochemischer bzw. chemischer Prozesse umwandeln, wobei keine einheitliche Definition existiert (Vogel et al. 2020, S. 10). Verfahren des chemischen Recyclings werden mit dem Potenzial assoziiert, Schadstoffe aus Kunststoffabfällen entfernen und werkstofflich nicht verwertbare Kunststofffraktionen verwerten zu können; auch Rohstoffe für die chemische Industrie können so produziert werden (Vogel et al. 2020, S. 6 ff., dazu auch GAO 2021). Mit dem chemischen Recycling von Kunststoffabfällen sollen Fremdstoffe effektiver als mit herkömmlichen Methoden entfernt und eine höhere Qualität der Ausgangsmaterialien erreicht werden (Prognos/INFA 2020, S. 125). Derzeit werden viele Verfahren des chemischen Recyclings privatwirtschaftlich aber auch staatlich gefördert (Seitz et al. 2022, S. 147).

Zu den Hauptverfahren zählen die Pyrolyse, die Vergasung²⁸ und die Verflüssigung (Verölung oder Solvolyse). Pyrolyse und Vergasung bezeichnen thermochemische Verfahren unter sauerstofffreier bzw. sauerstoffarmer Atmosphäre. Dabei werden Kunststoffabfälle bei hohen Temperaturen erhitzt, wodurch die Polymere in kürzere Moleküle umgewandelt werden. Die Pyrolyse ist das bekannteste Verfahren. Ihre Hauptprodukte sind Öle und Wachse, die als Rohstoffe für die Herstellung von neuen Kunststoffen verwendet werden können. Bei der Vergasung können die entstehenden Gase zur hochwertigen Nutzung in der chemischen Industrie verwendet werden. Verflüssigungsverfahren zielen auf die Erstellung und Nutzung eines flüssigen Produktes und ggf. von Gasen auf der Grundlage von vorsortierten und aufbereiteten Kunststofffraktionen (Umweltbundesamt 2020, S. 9 f.).

Die einzelnen Verfahren variieren in ihrer Technologiereife stark (Seitz et al. 2022, S. 83 f.). Die meisten Entwicklungen im Bereich des chemischen Recyclings sind im Bereich der *Pyrolyse* zu verorten (Quicker et al. 2022, S. 1495). Derzeit werden regelmäßig neue Projekte, Kooperationen und Investitionen zu Pyrolyseverfahren in Deutschland angekündigt oder bestehende Anlagen mit Pyrolyseverfahren ausgebaut.²⁹ Zwar können mit Pyrolyseverfahren PE und PP hergestellt werden, die sich in der Qualität von Primärkunststoffen nicht unterscheiden lassen (Crippa et al. 2019, S. 147). Dennoch wirken sich die Empfindlichkeit gegenüber Schwankungen im Ein-

²⁸ Nicht immer werden die Pyrolyse und die Vergasung zu Verfahren des chemischen Recyclings gezählt (z.B. Crippa et al. 2019, S. 146).

²⁹ So wird die Pilotanlage von Carbolig in Ennigerloh ausgebaut, um Packstoffe zu rezyklieren, die bisher nicht werkstofflich verwertet werden können (Verbundverpackungen und Mischkunststoffe) (EUWID 2022b).

satzstoff bzw. gegenüber Störstoffen negativ auf die Qualität der Rezyklate bzw. den erforderlichen Aufbereitungsaufwand und somit die Wirtschaftlichkeit der Verfahren aus (Seitz et al. 2022, S. 83). Darüber hinaus stellen die hohen Energieverbräuche ein zentrales Problem für die Gesamtökobilanz der Verfahren dar (Crippa et al. 2019, S. 147).

Die weiteren Verfahren (Vergasung und Verflüssigung) sind noch deutlich weniger praxisreif oder haben sich in der Vergangenheit als unwirtschaftlich erwiesen. Ein Betrieb von *Vergasungsanlagen* ist bis auf Weiteres unter den aktuellen wirtschaftlichen Bedingungen in Deutschland nicht zu erwarten (Quicker et al. 2022, S. 1497), da es mit hohen technischen Herausforderungen verbunden ist, ein hochwertiges Synthesegas zu erzeugen. Die Aufbereitung ist aufwendig und kostenintensiv (Solis/Silveira 2020, S. 134). Anlagen zum *solvolytischen Recycling* existierten für PVC, mussten allerdings 2015 geschlossen werden, als Weichmacher wie DEHP in Produkten für den europäischen Markt verboten wurden. Das Vinyloopverfahren (Tukker et al. 1999) konnte diese Weichmacher nicht im ausreichenden Maß mit einem vertretbaren Aufwand vom Rezyklat abtrennen. Für Solvolyseverfahren sind aktuell kaum laufende Projekte im kommerziellen Maßstab bekannt. Nur Pilotprojekte im industriellen Maßstab bestehen für einzelne Kunststoffarten.³⁰

Generell stellt das werkstoffliche Recycling der umweltschonendste Recyclingpfad dar und Ansätze des chemischen Recyclings sollten deshalb nur bei Abfällen zum Einsatz kommen, die nicht werkstofflich rezykliert werden können (Seitz et al. 2022, S. 79). Das ist aktuell auch rechtlich so geregelt (Kasten 3.3). Der Einsatz von Verfahren des chemischen Recyclings könnte unter diesen Bedingungen perspektivisch zur Erreichung der Verwertungsquoten beitragen. Dabei besteht eine der wichtigen Aufgaben darin, die Technologien zu identifizieren, die wirtschaftlich sind und mit einem möglichst geringen Energieverbrauch und Treibhauspotenzial einhergehen³¹ und zugleich im industriellen Kontext anwendbar sind (Dogu et al. 2021). Denn aktuell sind die wirtschaftlichen und vor allem auch ökologischen Auswirkungen des chemischen Recyclings noch mit zahlreichen Unsicherheiten verbunden (Garcia-Gutierrez et al. 2023; Vogel et al. 2020). So sind kaum Daten dazu vorhanden, unter welchen Bedingungen die Verfahren optimal funktionieren. Auch Prozessinformationen, die für eine Ökobilanz notwendig sind, sind äußerst lückenhaft und wenig detailliert. Vor diesem Hintergrund sehen Umweltverbände eine Förderung des chemischen Recyclings äußerst kritisch und plädieren dafür, sich auf die Potenziale in den Bereichen Verpackungsdesign, Sortierung und werkstoffliches Recycling zu konzentrieren (EUWID 2023d).

Kasten 3.2 Anrechenbarkeit des chemischen Recyclings

Abfälle, die durch Verfahren des chemischen Recyclings verwertet wurden, können als Beitrag zur Erreichung folgender Ziele angerechnet werden:

- › Beitrag zur Erreichung der Quote gemäß § 16 Abs. 4 VerpackG, wonach die dualen Systeme dazu verpflichtet sind, im Jahresmittel mindestens 50 Massen-% der von ihnen erfassten restentleerten Kunststoff-, Metall- und Verbundverpackungen dem Recycling zuzuführen.
- › Beitrag zur Erreichung der Gesamtverwertungsquote von Kunststoffen gem. § 16 Abs. 2 Satz 2 VerpackG, wonach Kunststoffverpackungen, die durch die dualen Systeme erfasst werden, zu mindestens 90 % einer Verwertung zuzuführen sind.
- › Die Erreichung der stofflichen Verwertungsquote nach § 16 Abs. 2 VerpackG ist nur für Verfahren des werkstofflichen Recyclings erlaubt. So ist eine Anrechnung des chemischen Recyclings zur Erreichung dieses Ziels per Definition nicht möglich. Dadurch wird dem mechanischen Recycling der Vorrang eingeräumt. Wichtig wäre, dafür zu sorgen, dass Anreize zur Steigerung der Recyclingquote und der Rezyklatqualitäten Innovationen im Bereich des chemischen Recyclings fördern, und zugleich sicherzustellen, dass der Vorrang des mechanischen Recyclings erhalten bleibt (Seitz et al. 2022, S. 110). Eine Möglichkeit besteht beispielsweise in der Anerkennung von Verfahren des chemischen Recyclings bei der Erteilung

30 Beispielsweise arbeitet die RITTEC Umwelttechnik (Eichert 2020) an einem Solvolyseverfahren, mit welchem Abfall-PET in seine Monomere zerlegt wird.

31 Eine Gesamtbetrachtung der Ökobilanz wird im Rahmen der UBA-Studie zur Abschätzung der Potenziale und Bewertung der Techniken des thermochemischen Kunststoffrecycling (FKZ 3720 34 302 0) erarbeitet.

von EFSA-Lizenzen für Recyclingverfahren, die zur Herstellung von Lebensmittelverpackungen bestimmt sind (Seitz et al. 2022, S. 134).

Langfristig und für einzelne Stoffe könnte eine ergänzende Lösung zur Behandlung von Kunststoffabfällen in der Depolymerisation bzw. Zersetzung von Kunststoffpolymeren in ihre chemischen Bausteine mithilfe geeigneter Enzyme (*biologisches oder bioenzymatisches Recycling*) bestehen. Dabei zersetzen Mikroorganismen Abfälle, um ausgewählte Materialien zurückzugewinnen. Bislang wurden noch wenige Patente in diesem Innovationsfeld angemeldet, die meisten durch die französische Firma Carbios, die eine Pilotanlage für das Recycling bzw. die Depolymerisation von PET aus Textilien und weiteren Kunststoffmaterialien betreibt.³² Vorteile des enzymatischen Recyclings im Vergleich zur mechanischen Verwertung ist, dass die Enzyme Kunststoffe zersetzen können, auch wenn Additive oder Farben im Ausgangsstoff vermengt sind. Dadurch sind weniger strenge Sortierprozesse erforderlich, als sie zur werkstofflichen Verwertung notwendig sind. Außerdem werden beim mechanischen Recycling Polymerketten verkürzt und die Eigenschaften des jeweiligen Polymers dadurch beeinträchtigt. Durch das enzymatische Recycling werden Polymerketten hingegen geschont und die Kunststoffe können so unendlich rezykliert werden (Kwon 2023, S. 237).

Perspektivisch könnte die Kombination von biologischen und chemischen Verfahren Potenzial für das Recycling ausgewählter Kunststoffe bzw. zur Behandlung gemischter Kunststoffe darstellen (Sanderson 2022). Bisher sind Verfahren des bioenzymatischen Recyclings allerdings kostenintensiv und nur für PET und Polyurethan (PU) geeignet (Kwon 2023, S. 237). Außerdem ist noch etwas unklar, unter welchen Bedingungen die Ökobilanz positiv ausfällt (Orlando et al. 2023, S. 16). Für Polymere, die aufgrund ihrer molekularen Struktur schwerer abbaubar sind und 90 % der unrecyklierten Kunststoffabfälle ausmachen, sind existierende bioenzymatische Lösungen ineffektiv und verursachen hohe Energieverbräuche oder erzeugen toxische Schadstoffe (Orlando et al. 2023, S. 22 ff.). Weitere Forschung ist notwendig, um die Anwendung existierender bioenzymatischer Verfahren für PET und PU im großindustriellen Maßstab sowie eine Erweiterung auf zusätzliche Kunststoffarten zu ermöglichen – bis zur Technologiereife dauert es also noch einige Jahre (Gordon 2020). Der Blick auf Patentanmeldungen im Bereich Recycling von Kunststoffen zeigt, dass Innovationsaktivitäten in Deutschland zwar eine hohe Dynamik, allerdings keine Spezialisierung im Bereich des chemischen und biologischen Recyclings aufweisen (Kasten 3.2).

Kasten 3.3 Patentanmeldungen im internationalen Vergleich

Das Innovationsfeld im Bereich des Recyclings von Kunststoffen erfährt aktuell eine hohe Dynamik. Was die Patentenaktivitäten angeht, führen die USA und Europa bei Patentanmeldungen im Bereich Recycling von Kunststoffen. Innerhalb Europas ist Deutschland Vorreiter. Allerdings spiegelt dies eher die Größe der Wirtschaft als eine Spezialisierung³³ in dem Feld wider. Frankreich, Großbritannien und Italien weisen hingegen eine gewisse Spezialisierung im Bereich des Recyclings von Kunststoffen auf, die Niederlande und Belgien sogar eine hohe Spezialisierung (EPO 2021, S. 20). Trotz zahlreicher Patentanmeldungen aus dem universitären Bereich liegen europäische Start-ups und Scale-ups deutlich hinter ihren amerikanischen Kontrahenten (EPO 2021, S. 26). Die Entwicklung technologischer Innovationen aus der universitären Forschung in diesem Bereich führt also seltener zu Firmengründungen in Europa als in den USA (EPO 2021, S. 25). Das Innovationsfeld des chemischen und biologischen Recyclings dominieren die USA mit 36 % der internationalen Patentfamilien. Dass Europa in dem Feld nicht führt, wird auf Deutschland zurückgeführt, das im Bereich des chemischen und biologischen Recyclings vergleichsweise wenig internationale Patentfamilien aufweist (EPO 2021, S. 28).

³² Nach eigenen Recherchen auf den Plattformen »dimensions.ai« und »lens.org«.

³³ Die Spezialisierung wird anhand des RTA-Index gemessen. RTA steht für Revealed Technological Advantage, als aufgedeckten technologischen Vorsprungs. Der RTA zeigt die Spezialisierung eines Landes in Bezug Innovationen im Bereich der zirkulären Kunststoffe im Verhältnis zu seiner gesamten Innovationsfähigkeit. Der Index wird als der Anteil eines Landes an Internationalen Patentfamilien (IPFs) in einem bestimmten Technologiebereich geteilt durch den Anteil des Landes an IPFs in allen Technologiebereichen. Ein RTA über eins spiegelt die Spezialisierung eines Landes auf eine bestimmte Technologie wider (EPO 2021, S. 8).

3.1.4 Herausforderungen und Perspektiven

Für ein hochwertiges Recycling von Kunststoffen müssen einzelne Verpackungsbestandteile und -komponenten voneinander abgetrennt, typenrein sortiert und Fremd- und Begleitstoffe entfernt werden. Dafür sind eine möglichst homogene Zusammensetzung der Abfallstoffe und ein niedriger Grad an Verunreinigungen in den Kunststoffabfällen zentrale Voraussetzungen. Beides gilt sowohl für herkömmliche werkstoffliche als auch lösemittelbasierte Recyclingverfahren (Seitz et al. 2022, S. 78) sowie für Verfahren des chemischen Recyclings (Seitz et al. 2022, S. 76).

Die Nachfrage nach hochwertigen Rezyklaten übersteigt derzeit das Angebot deutlich, während Rezyklate mittlerer Qualität eher schwieriger Abnehmer finden (Seitz et al. 2022, S. 91). Um den Rezyklateinsatz im Kunststoffverpackungsbereich zu steigern, ist deshalb zweierlei erforderlich: erstens eine Steigerung des Angebots an qualitativ hochwertigen Rezyklaten, zweitens aber auch eine Erhöhung der Nachfrage nach Rezyklaten mittlerer Qualität. Hierfür sind Maßnahmen in verschiedenen Handlungsfeldern erforderlich:

- › Recyclingfähigkeit von Verpackungen verbessern, indem ein ökologisches Verpackungsdesign gefördert wird (Design für Recycling);
- › getrennte Sammelsysteme ausbauen (inklusive Ein- und Mehrwegpfandsystemen), um die Qualität des Recyclings zu steigern;
- › wirtschaftliche Rahmenbedingungen für das werkstoffliche Recycling verbessern, um Anreize für Investitionen in moderne Sortier- und Recyclingtechnik zu schaffen;
- › die Nachfrage nach Rezyklaten auch mittlerer Qualität erhöhen, über klare, einfache und einheitliche Vorgaben zum Rezyklateinsatz.

Design für Recycling

Die Gestaltung von Verpackungen gehört zu den zentralen Stellschrauben, um ihre Recyclingfähigkeit zu erhöhen. Entsprechend ist die Förderung eines Verpackungsdesigns mit Blick auf Wiederverwendung und Recyclingfähigkeit ein zentrales Ziel des europäischen Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft (EK 2020a). Ist eine Verpackung so gestaltet, dass einzelne Materialien gut voneinander abgetrennt werden können und eine Kontamination durch Fremd- und Begleitstoffe möglichst geringgehalten wird, wird eine hochwertige Verwertung leichter möglich. Auch eine Reduzierung der extrem hohen Vielfalt an Polymertypen, -mischungen und vor allem auch Zusatzstoffen stellt eine zentrale Stellschraube dar (Seitz et al. 2022, S. 20 f. u. 97). Prinzipien eines Designs für Recycling können wie folgt zusammengefasst werden (Seitz et al. 2022, S. 96):

- › Bevorzugung von Monomaterialien oder leicht trennbaren Schichtverpackungen
- › möglichst Verzicht auf Kunststoffadditive, zumindest ihre transparente und einheitliche Kennzeichnung
- › Produkt- und Druckfarben vermeiden, helle Farben bevorzugen
- › leichte Entleerbarkeit von Verpackungsbehältern
- › leichte Abtrennbarkeit von Komponenten (insbesondere Etiketten)

Prinzipien eines Designs für Recycling widersprechen teilweise den internen Logiken eines Unternehmens. Form, Farbe, Haptik und Layout prägen den Wiedererkennungswert einer Marke. In der Regel dienen diese Eigenschaften vorrangig der Verkaufsfunktion, Nachhaltigkeitskriterien spielen beim Design eine nachrangige Rolle. So kann sich ein Unternehmen für eine dunkle Farbwahl entscheiden, auch wenn dunkelfarbige Produkte sich schlechter rezyklieren lassen als hellere Produkte. Deswegen ist es essentiell, unter Einbeziehung von Politik und Verbänden möglichst verbindliche Prinzipien an ein recyclingfähiges Produktdesign festzulegen (Seitz et al. 2022, S. 101), wie beispielsweise Positiv- und Negativlisten für den Materialeinsatz in Kopplung mit Kennzeichnungspflichten. Dabei stellt allerdings die Recyclingfähigkeit nur ein Aspekt dar, der zu berücksichtigen ist und ggf. mit anderen Verpackungsanforderungen in Konflikt geraten kann. Zu beachten beim Verpackungsdesign ist z. B.

auch die Schutzfunktion. Diese kann durch Monomaterialien ggf. nicht ausreichend gewährleistet werden. Außerdem können Monomaterialien den Ressourcenverbrauch erhöhen, da bei ihnen für die gleiche Schutzfunktion ein höherer Materialaufwand erforderlich ist als bei komplexeren Verpackungen, die aus mehreren dünnen Materialschichten bestehen (Seitz et al. 2022, S. 99). Auch Entwicklungen in Richtung komplexerer Verpackungen, wie der Einsatz von Sensoren und Datenträgern zur Vermeidung von Lebensmittelverlusten (TAB 2021) kann die Recyclingfähigkeit der Verpackung eher erschweren. Wegen dieser komplexen Zusammenhänge haben Vorgaben an das Design von Verpackungen nach § 4 VerPackG bisher nur empfehlenden Charakter. Lediglich das Inverkehrbringen von leichten Kunststofftragetaschen ist verboten (mit Ausnahme der sehr leichten Kunststofftragetaschen; § 5 VerPackG).

Darüber hinaus werden durch die ökologische Gestaltung der Beteiligungsentgelte, deren Höhe durch die dualen Systeme festgelegt werden, finanzielle Anreize an Hersteller gesetzt (Kap. 3.1.1), Verpackungen recyclingfähig zu gestalten. Allerdings haben ökologische Beteiligungsentgelte bisher kaum Lenkungswirkung erzielen können. Dies liegt insbesondere daran, dass die Einnahmen eines dualen Systems sich bei gleichbleibenden Kosten verringern, wenn dieses die Beteiligungsentgelte für registrierte Hersteller senkt, die Verpackungen umweltfreundlicher bzw. recyclingfähiger gestalten. Bisher haben die dualen Systeme weder ausreichend hohe Anreize an die Hersteller gesetzt, noch hohe Zuschläge als Malus für nicht recyclingfähige Verpackungen eingeführt, um keine Kunden an die Konkurrenzsysteme zu verlieren (Bulach et al. 2022, S. 18 ff.). Für eine Lenkungswirkung wäre eine deutlichere Gebührenstaffelung, d. h. erhebliche Zuschlagsbeträge bei fehlender ökologischer Gestaltung von Verpackungen, notwendig (RESAG 2022, S. 75 f.).

Der Mindeststandard zur Bemessung der Recyclingfähigkeit von Verpackungen, der von der Zentralen Stelle Verpackungsregister herausgegeben wird und dazu dient, die Recyclingfähigkeit von Verpackungen einheitlich zu bemessen (Kap. 3.1.1), wird auch von vielen Herstellern und großen Vertreibern als Orientierung zur Verbesserung der Recyclingfähigkeit bei der Gestaltung von Verpackungen genommen (Bulach et al. 2022, S. 18 ff.). Zur Unterstützung bieten die dualen Systeme den bei ihnen registrierten Herstellern die Möglichkeit an, die Recyclingfähigkeit von Verpackungen über Onlinetools zu ermitteln (Bulach et al. 2022, S. 20). Neben dem Mindeststandard der Zentralen Stelle Verpackungsregister bieten auch Leitfäden und Handlungsempfehlungen zur Bestimmung der Recyclingfähigkeit von Brancheninitiativen Orientierung. Allerdings fehlt es noch an einem einheitlichen Verfahren, das europaweit gelten würde. Mit der Plattform »RecyClass« (RecyClass o.J.) wird z. B. angestrebt, ein europäisches Zertifizierungssystem für das Design für Recycling zu entwickeln. Auf der Grundlage bisheriger Initiativen und vorhandener Bewertungsinstrumente könnte der Rahmen zur Bewertung der Recyclingfähigkeit von Verpackungen über verbindliche Standards und DIN-Normen vereinheitlicht und eine einheitliche europaweite Grundlage geschaffen werden (Seitz et al. 2022, S. 107).

Bei der Gestaltung von Verpackungen wird es zunehmend wichtig, dafür zu sorgen, dass Informationen über das Produkt entlang der Wertschöpfungskette weitergereicht werden, um das Einsatzspektrum von Rezyklaten möglichst genau zu bestimmen. Dies könnte künftig mittels digitaler Produktpässe erfolgen (Seitz et al. 2022, S. 107; 134; 138). Grundsätzlich ist die Einführung von digitalen Produktpässen ein zentrales Ziel des EU-Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft (EK 2020a) und wird für einzelne Produktgruppen im Rahmen der Überarbeitung der Ökodesign-Richtlinie für nachhaltige Produkte derzeit vorbereitet (Kap. 2.2.2) (EK o.J.c). Mit digitalen Produktpässen können Informationen zur Materialzusammensetzung von Produkten, aber auch von Verpackungen, entlang der Wertschöpfungskette weitergegeben und an der Sortieranlage ausgelesen werden. Die verpflichtende Einführung digitaler Produktpässe für Verpackungen könnte so mittelfristig maßgeblich zur gezielten Rückgewinnung von Wertstoffen beitragen. Verpackungen werden dafür mit einer unsichtbaren, auslesbaren Markierung versehen, die Informationen zur Materialzusammensetzung der Verpackung enthält. Infrage kommen insbesondere vier Auto-ID-Technologien: RFID-Etiketten, Barcodelösungen, Fluoreszenzmarker und digitale Wasserzeichen. Wobei vor allem Fluoreszenzmarker und digitalen Wasserzeichen ein zukunftssträchtiges Potenzial zugewiesen wird. Eine wichtige Anwendungshürde solcher Kodierungslösungen stellt die Veränderung des Produkts während des Lebenszyklus dar. Kommt die Verpackung beispielsweise mit einem gesundheitsschädlichen Material in Kontakt, wird diese Information über die Kodierung nicht wiedergegeben (Treick et al. 2022, S. 487). Sollen künftig Rezyklate in Lebensmittelverpackungen in höherem Maße eingesetzt werden, wird der Erkennung bzw. Unterscheidung von Lebensmittelverpackungen von Non-Food-Verpackungen eine besondere Bedeutung zukommen. So können bei der Sortierung solche Verpackungsabfälle automatisch identifiziert werden, die zur Herstellung von Rezyklaten für eine lebensmittelnahe Anwendung grundsätzlich geeignet sind (Voßwinkel et al. 2020, S. 63). Insgesamt kann eine Markierung insbesondere folgende Informationen beinhalten:

- › Art der Verwendung, insbesondere Einsatz im Food-/Non-Food-Bereich

- › faserhaltig oder nicht faserhaltig
- › Art des Materials, z. B. Kunststoffart bei Monoverpackung
- › Eigenschaften (z. B. Durchlässigkeit, Stabilität)
- › Verpackungshersteller

Eine wichtige Initiative in dem Bereich ist das Projekt »Holy Grail 2.0 – Digital Watermarks« eines europäischen Markenverbunds (IGEPA Group o.J.),³⁴ in dem sich mittlerweile mehr als 160 internationale Unternehmen und Organisationen aus der gesamten Wertschöpfungskette zusammengeschlossen haben. Ziel der Initiative ist es, die intelligente Verpackungssortierung und dadurch das Recycling auf europäischer Ebene voranzubringen. Im Rahmen des Projekts soll die Funktionsfähigkeit der Wasserzeichentechnologie erprobt und untersucht werden, wie akkurat die Sortierung der Verpackungsabfälle erfolgt und ob dadurch ein qualitativ hochwertigeres Recycling erreicht werden kann. Nach der ersten semiindustriellen Pilotphase soll Frankreich als Pilotmarkt für digitale Wasserzeichen dienen (Business Wire 2023). Darüber hinaus wurde in Freiburg 2021 eine Demonstrationsanlage in Betrieb genommen, um mittels Fluoreszenztechnologie ein »markerbasiertes Sortier- und Recyclingsystem für Kunststoffverpackungen« zu testen (Seitz et al. 2022, S. 145).

Sammelsysteme

Im Idealfall sind rezyklierte Kunststoffe wieder für denselben Verwendungszweck einzusetzen, dem sie entstammen. Denn dadurch sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass die Rezyklate Substanzen enthalten, die für den Verwendungszweck nicht geeignet oder sogar verboten sind. Erforderlich ist dafür jedoch eine möglichst sortenreine Sammlung der entsprechenden Abfallprodukte: Ist die Zusammensetzung der Abfälle bekannt, können die daraus gewonnenen Rezyklate für eine möglichst passende bzw. ähnlich hochwertige Anwendung eingesetzt werden. Außerdem verringert die getrennte Sammlung die Risiken einer schädlichen Kontamination, sodass mit einem vergleichsweise geringen Aufbereitungsaufwand Rezyklate hoher Qualität erzeugt werden können.

Über Bringsysteme – insbesondere Pfandsysteme, wie in Anlage 5 des KrWG empfohlen – werden ähnliche Abfälle (z. B. PET-Flaschen, Metalldosen) getrennt gesammelt und so die sortenreine Erfassung von Monomaterialien befördert. Die Einführung des PET-Flaschenpfands hat gezeigt, dass reine, meist klare PET-Rezyklate mit einer sehr hohen Recyclingquote generiert werden, die zu Produkten im Original Einsatzbereich mit höchsten Anforderungen verarbeitet werden können. Sind Erfassungs- und Sammelsysteme so organisiert, dass ein Unternehmen die eigenen Produkte wieder selbst verwerten kann, kann es die Information über die Materialzusammensetzung nutzen, um die bestmögliche Verwertung der Sekundärrohstoffe zu realisieren. Ein Beispiel ist das Berliner Start-up Circleback GmbH, das in Pfandautomaten hochwertige Kosmetikverpackungen sammelt und zu zweckgleichen Verpackungen verarbeitet (chemie.de 2022). Außerdem haben Hersteller durch Pfandsysteme für Verpackungen einen Anreiz, Kunststoffverpackungen zu vereinheitlichen, um so größere Mengen einheitlicher Kunststofftypen dem Recycling zuzuführen und dadurch wirtschaftliche Vorteile zu erzielen (Wilts 2020, S. 23 f.). Eine Erweiterung der bestehenden Bringsysteme (Ein- und Mehrweg) für Verpackungshersteller und den Handel erscheint zunächst vor allem für Hohlkörper (z. B. Kosmetikverpackungen) sowie für formstabile Verpackungen aus Monofolien, wie z. B. Becher für Molkereiprodukte und Gemüseschalen, geeignet (Seitz et al. 2022, S. 167). Formstabile Verpackungen gehören zu den mengenmäßig bedeutsamsten Verpackungstypen im Lebensmittelbereich. Gegebenenfalls ist auch eine sortenreine Sammlung von Folien sinnvoll, wobei Einwickelfolien kaum in ihre ursprüngliche Anwendung rückführbar sind (Detzel et al. 2018, S. 14 f.).

Allerdings können die erhöhten Transport- und Sortieraufwände eines Ausbaus von getrennten Sammelsystemen zusätzliche Treibhausgasemissionen und höhere Energieverbräuche verursachen, die es vorab zu bilanzieren gälte. Eine pauschale Beurteilung ist nicht möglich (Seitz et al. 2022, S. 63), die Vor- und Nachteile hängen stattdessen von der konkreten Ausgestaltung ab. Für Kunststoffmassenprodukte, die nicht für Bring- und Pfandsysteme geeignet sind, müssen weiterhin universelle Sammelsysteme zur Verfügung stehen (Seitz et al. 2022, S. 161 f.).

³⁴ dazu auch <https://www.digitalwatermarks.eu/> (24.1.2023)

Wirtschaftlichkeit des werkstofflichen Recyclings

Einmal gesammelt werden die Abfälle sortiert. Durch den Einsatz moderner Sortier- und Recyclingtechnik lässt sich die Qualität der erzeugten Rezyklate steigern. Ziel wäre die Sortierung der Kunststoffabfälle nicht nur nach Kunststofftyp, sondern auch nach Farbe (Seitz et al. 2022, S. 154) sowie perspektivisch nach Abfallart (Leichtverpackungen, Hartschalen, Flaschen, sonstige Hohlkörper), Kunststoffsorte und Herkunft (Seitz et al. 2022, S. 163). Bereits auf dem Markt verfügbar sind z. B. Verfahren zur Sortierung von schwarzen Kunststoffen, aufwendige lösemittelbasierte Verfahren oder thermochemische Prozesse, die für die Behandlung von Verbundstoffen erforderlich sind (Seitz et al. 2022, S. 24). Weitere technische Verbesserungspotenziale werden insbesondere im Hinblick auf Effizienzsteigerung der Verfahren (Reinigungsleistung der Wäsche; Energie- und Wassereinsatz in Wäscheverfahren; eine an die Anwendung orientierte Aufbereitung), aber auch bei dem Einsatz von Sortiersystemen für gemahlene Kunststoffabfälle gesehen (Knappe et al. 2021, S. 115).

Doch der Stand bei der Sortier- und Recyclingtechnik, darauf deutet eine Befragung von Seitz et al. (2022, S. 76) unter 81 Fachleuten aus der Branche hin, liegt weit hinter dem technisch Machbaren zurück. Innovative Verfahren werden bislang kaum eingesetzt. Der Investitionsstau in moderne Sortiertechnik (Sortierung nach Kunststoffsorte, Materialform und Farbe) ist primär wirtschaftlich bedingt. Die erforderlichen hohen Investitionskosten sind unter den aktuellen Bedingungen nicht zu refinanzieren bzw. stellen ein finanzielles Risiko für Betriebe dar (Seitz et al. 2022, S. 94). Verantwortlich dafür sind insbesondere die folgenden Rahmenbedingungen:

- Niedrige bzw. volatile Preise von Primärrohstoffen: Sind die Preise von rohölbasierten Primärneuewaren niedriger als die Preise von Rezyklaten, entscheiden sich Kunststoffverarbeiter in der Regel für Primärrohstoffe, die im Zweifelsfall eine höhere Qualität aufweisen (Prognos/INFA 2020, S. 212; Seitz et al. 2022, S. 90). So tendieren Sortierbetriebe und Verwertungsunternehmen dazu, die Kosten gering zu halten, wodurch Investitionen in moderne Technologien gebremst werden (Seitz et al. 2022, S. 156).
- Konkurrenz zur thermischen Verwertung: Sind die Margen aus dem Verkauf von Rezyklaten kleiner als aus dem Verkauf von Ersatzbrennstoffen, lohnt es sich für Sortier- und Verwertungsunternehmen nicht, die Abfälle zu sortieren und in die entsprechenden Anlagen zu investieren – die thermische Verwertung wird bevorzugt (Seitz et al. 2022, S. 96). Dieses Problem spitzt sich zu, wenn Anforderungen an Sortieranlagen und stoffliche Verwertung verschärft werden (Seitz et al. 2022, S. 90).

Diese Rahmenbedingungen bremsen die Nachfrage nach Rezyklaten und machen damit Investitionen in das werkstoffliche Recycling tendenziell unwirtschaftlich. Angehen lassen sich diese Defizite über die Verteuerung von Primärkunststoffen und/oder der thermischen Verwertung. Die dadurch indirekt erzeugte erhöhte Nachfrage kann Planungssicherheit für Investitionen in moderne Recyclingtechnologien schaffen, die allein über die Einnahmen aus der Abfallentsorgung und dem Verkauf von höherwertigen Rezyklaten nicht zu refinanzieren wären. In der Diskussion sind die folgenden konkreten Maßnahmen:

- Verteuerung von Primärkunststoffen: Zu den Lösungen zählen Abgaben auf Kunststoffverpackungen, die überwiegend aus Primärkunststoff bestehen. Eine Abgabe auf Kunststoffverpackungen gibt es beispielsweise seit dem 1. April 2022 in Großbritannien. Die Steuer gilt für Verpackungen, die nach Gewicht überwiegend aus Kunststoff bestehen und zugleich weniger als 30% Rezyklatanteil enthalten (Kasten 3.4).
- Verteuerung der thermischen Verwertung von Reststoffen (Seitz et al. 2022, S. 169): Steuern auf die thermische Abfallverwertung wurden in verschiedenen europäischen Ländern in den letzten Jahren erlassen.³⁵ Eine Verteuerung der thermischen Verwertung, welche das Recycling konkurrenzfähiger macht, wäre auch durch die Aufnahme der Müllverbrennung in Emissionshandelssysteme zu erreichen³⁶ – in Deutschland wurde die CO₂-Bepreisung der Abfallverbrennung für 2024 beschlossen (Deutscher Bundestag 2022).³⁷

³⁵ Diese werden vor dem Hintergrund des Ukrainekriegs und zur Energiesicherheit nun z. T. allerdings wieder infrage gestellt (Brunn 2022; Finanzdepartementet Sverige 2022).

³⁶ Bis Mitte 2026 ist die Europäische Kommission verpflichtet zu prüfen, ob eine Einbeziehung der thermischen Verwertung sowie von Deponien in das EU-Emissionshandelssystem grundsätzlich möglich wäre (EUWID 2023b).

³⁷ Die EU-Staaten müssen ab 2024 die Treibhausgasemissionen von Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle messen, melden und prüfen. Vorgesehen ist eine Einbindung dieser Anlagen ab 2028 in den EU-Emissionshandel, ggf. mit einer Ausnahme bis spätestens 2030 (EP 2022).

Kasten 3.4 Kunststoffverpackungssteuer in Großbritannien

Großbritannien führte im April 2022 die Plastic Packaging Tax ein, die Hersteller bzw. Importeure von Kunststoffverpackungen zu entrichten haben. Die Steuer – 200 Britische Pfund pro Tonne – wird für alle Kunststoffverpackungen fällig, die in Großbritannien hergestellt oder nach Großbritannien eingeführt werden und die weniger als 30 % Rezyklatanteil enthalten. Als Kunststoffverpackung gelten nach dem Gesetz alle Verpackungen, die nach Gewicht überwiegend aus Kunststoff bestehen. Beim Import von Kunststoffverpackungen wird die Steuer unabhängig davon erhoben, ob es sich um leere oder gefüllte Verpackungen handelt. Betroffene Unternehmen haben durch das Gesetz Informationspflichten und müssen vierteljährlich Gesamtgewicht und Rezyklatanteil ihrer Kunststoffverpackungen an die Steuerabteilung der britischen Regierung melden. Ausgenommen von der Steuer sind lediglich Hersteller und Importeure, die weniger als 10 t Kunststoffverpackungen pro Jahr in Verkehr bringen bzw. einführen, um hier übermäßige administrative Aufwände zu vermeiden. Schätzungen nach könnten betroffene Verpackungen um ca. 20 % teurer werden (HM Government 2021).

Quelle: Hinzmann et al. 2022, S. 43

Zu bedenken ist allerdings, dass der Sortierung von Materialien physische Grenzen gesetzt sind. Ohne eine Reduzierung der Materialvielfalt und von schwer rezyklierbaren Materialien (z. B. Verbundmaterialien) über verbindliche Vorgaben zum Materialeinsatz, effektive finanzielle Anreize für ein recyclingfreundliches Design in Verbindung mit Markierungssystemen für die Kunststoffsortierung werden Sortierausbeute in Qualität und Mengen nur begrenzt zu erhöhen sein.

Die Nachfrage nach Kunststoffrezyklaten seitens der Kunststoffverarbeiter, Verpackungshersteller und Inverkehrbringer kann darüber hinaus durch eine Mindestrezyklateinsatzquote angeregt werden (gvm 2019, S. 19; Seitz et al. 2022, S. 115). Eine solche Quote, durch die feste Vorgaben zum Rezyklatgehalt bestimmter Produktgruppen bzw. Verpackungen festgelegt werden, ist für Kunststoffverpackungen in Deutschland bereits seit Längerem in der Diskussion (Bergsma et al. 2022). Mit der Richtlinie (EU) 2019/904³⁸ (nachfolgend Einwegkunststoffrichtlinie) wurde in der EU eine Mindesteinsatzquote für Rezyklate bei PET-Getränkeflaschen von 25 % ab 2025 und von 30 % ab 2030 beschlossen (Hinzmann et al. 2022, S. 7 f.). Vorschläge zur Einführung von darüber hinaus gehenden Mindestrezyklateinsatzquoten für Kunststoffverpackungen hat die Europäische Kommission im Januar 2023 vorgelegt (Betz et al. 2022, S. 128 f.).

Die Einführung einer Mindestrezyklateinsatzquote ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn die steigende Nachfrage nach Rezyklaten in der geforderten Qualität auch befriedigt werden kann. Kurzfristig bzw. bei gleichbleibender Eignung und Verfügbarkeit der Rezyklate kann das Instrument der Mindesteinsatzquoten für Rezyklate sogar die Kosten von Sekundärkunststoffen in die Höhe treiben (gvm 2019). Denn Hersteller und Anwender von Rezyklaten müssen einen Zusatzaufwand erbringen, um die gesetzlichen Anforderungen zu erfüllen (Seitz et al. 2022, S. 113). Die durch die geltenden Regularien des Abfall- bzw. Produktrechts erforderliche Dokumentation der Herkunft, Verarbeitung und Zusammensetzung von Ausgangsstoffen bzw. von Rezyklaten für Hersteller und Händler von Rezyklaten können sich als kostentreibend erweisen (Seitz et al. 2022, S. 108). Alternativ fließen die Rezyklate in Anwendungsfelder mit geringerem Qualitätsanspruch und entsprechend geringeren Erlösen, auch wenn kaum Qualitätsunterschiede zur Neuware bestehen (Seitz et al. 2022, S. 113). Aktuell wird die Befriedigung der Nachfrage nach hochwertigen Rezyklaten in den benötigten Mengen als nicht möglich eingeschätzt (Seitz et al. 2022, S. 93), wobei die Nachfrage derzeit unter dem üblichen Niveau liegt, sogar für die sonst nachgefragten PET-Rezyklate (EUWID 2023a u. 2023c). Umstritten ist bei der Einführung einer Mindestrezyklateinsatzquote für Lebensmittelverpackungen die Frage, ob die zusätzlichen Aufwände der Aufbereitung von Kunststoffrezyklaten (z. B. Energieverbräuche) die Materialgewinne rechtfertigen (bvse 2022b).

³⁸ Richtlinie (EU) 2019/904 über die Verringerung der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt

Vorgaben für den Rezyklateinsatz

Für die weitere Verarbeitung von Kunststoffrezyklaten ist ihre Qualität und Beschaffenheit ausschlaggebend (Knappe et al. 2021, S. 100). Die Schaffung von Transparenz über Rezyklate ermöglicht es, Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen der daraus entstandenen Rezyklate möglichst genau vom Abnehmer abzuschätzen (Schischke et al. 2021, S. 47). In der Regel werden Angaben zum Fließverhalten, zur Fähigkeit, Schlagzähigkeit und Elastizität, Härte und Farbe gemacht. Für die Messung dieser Charakteristika existieren Normprüfverfahren (Knappe et al. 2021, S. 79 f.; Seitz et al. 2022, S. 46). Welche Informationen vom Rezyklathersteller zu den Rezyklaten zur Verfügung gestellt werden, ist allerdings nicht gesetzlich festgelegt und variiert in der Praxis stark. Hersteller und Händler von Rezyklaten können sich Qualitäts- und Zertifizierungsregeln oder -strukturen unterwerfen, z. B. RAL-Gütegemeinschaften; verpflichtend ist das aber nicht (Seitz et al. 2022, S. 108). Zur Vereinheitlichung und Vereinfachung der Herkunftsnachweise für Rezyklate könnten Informationspflichten in Kombination mit digitalen Produktpässen beitragen.

Nicht nur eine erhöhte Transparenz über die Zusammensetzung, sondern auch klare, anwendungsspezifisch aufgeschlüsselte Anforderungen an Rezyklate sind zentrale Voraussetzungen zur Steigerung ihrer Attraktivität für Produkthersteller. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, besteht zum einen die Gefahr, dass Sortierfraktionen, die aus chemisch-analytischer Sicht stofflich durchaus noch für die Aufarbeitung zu Rezyklaten geeignet sind, vorsorglich einer thermischen Verwertung zugeführt werden – Hintergrund ist die Besorgnis, dass ein unter Einsatz von Rezyklaten hergestelltes Produkt dem Stoffrecht nicht genügt. Zum anderen können Produkthersteller Rezyklate für minderwertigere Anwendungen einsetzen als notwendig gewesen wäre oder Preisabschläge geltend machen (Seitz et al. 2022, S. 43 f.). Dem kann mit der Einführung von verbindlichen, akzeptierbaren und durchsetzbaren Qualitätsstandards für Rezyklate und der Vereinfachung von Produktzulassungsverfahren entgegengewirkt werden (Seitz et al. 2022, S. 122). In Deutschland wären dafür einheitliche und verbindliche Prüf- bzw. Zertifizierungsstandards für Rezyklate und Rezyklatanwendungen zu schaffen – hierfür wäre eine entsprechende Erweiterung der Kompetenzen der Zentralen Stelle Verpackungsregister hilfreich (Seitz et al. 2022, S. 170).

Insbesondere die besonders strengen Vorgaben für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten in Lebensmittel- und Kosmetikverpackungen machen Zulassungsverfahren für Verpackungsmaterialien kompliziert, langwierig und teuer, zumal immer der Antragsteller in der Nachweispflicht steht, was den Zugang zum Markt insbesondere für kleinere Marktteilnehmer erschweren kann. Der Einsatz von Kunststoffrezyklaten in solch hochwertigen Produkten ist deswegen für Hersteller nahezu ausgeschlossen, da Informationen über mögliche Verunreinigungen sich kaum lückenlos nachvollziehen lassen (Seitz et al. 2022, S. 158). Dies ist problematisch, denn rund 50 % aller Kunststoffverpackungen in der EU werden für Lebensmittel verwendet (bvse 2022a). Neben der Weiterentwicklung von Werks- und Branchenstandards fordern Rezyklathersteller und Inverkehrbringer von Verpackungen eine Aufweichung der EFSA-Kriterien für Stoffzulassung (Seitz et al. 2022, S. 52). Außerdem wären insbesondere für den Einsatz von Sekundärkunststoffen im Lebensmittelbereich Informationspflichten und digitale Produktpässe besonders hilfreich.

Ein weiteres Problem für den Rezyklateinsatz ist darin zu sehen, dass Informationen zum Rezyklatgehalt in Produkten durch Verpackungshersteller nicht systematisch transparent gemacht werden (Müller et al. 2021, S. 13). Die einheitliche Berechnung und systematische Kennzeichnung des Rezyklatanteils in Produkten wäre jedoch z. B. eine wichtige Voraussetzung für die nachhaltige Beschaffung. Zwar gibt die DIN-Vorschrift 15343:2007 eine Methodik für die Rückverfolgbarkeit bei der Kunststoffverwertung und für die Bewertung des Rezyklatgehalts vor. Allerdings bezieht sich die Norm ausschließlich auf Zwischenprodukte (z. B. Kunststoffgranulate), nicht auf Endprodukte (Schischke et al. 2021, S. 18).³⁹ Bei Umweltzeichen, die den PCR-Gehalt adressieren, wird lediglich ein Nachweis des Herstellers bzw. eine schriftliche Bestätigung des Zulieferers erfragt (Schischke et al. 2021, S. 27). Die Kennzeichnung des Einsatzes von Rezyklaten in Kunststoffverpackungen normiert wiederum die DIN 6120 (»Kennzeichnung von Packstoffen und Packmitteln – Packstoffe und Packmittel aus Kunststoff«). Sie legt fest, wie über Einsatz und prozentualen Massenanteil von Kunststoff-Rezyklat zu informieren ist (Seitz et al. 2022, S. 73), allerdings ist ihre Anwendung bzw. Angaben zum Rezyklatgehalt in herstellereigenen Produktinformationen oder Werbematerialien bisher freiwillig (Müller et al. 2021, S. 40). Die Harmonisierung der Berechnungsmethodik zur Feststellung des Rezyklatanteils in Produkten – auch über Verpackungen⁴⁰ hinaus – stellt daher ein zentrales Handlungsfeld dar. Die Niederlande kann hierfür als gutes Beispiel dienen. Um die größten

³⁹ Auch die weiteren existierenden Nachweis- und Berechnungsverfahren, die teilweise etabliert sind, beziehen sich entweder nur auf Zwischenprodukte oder ausschließlich auf Endprodukte, die überwiegend aus Kunststoff bestehen.

⁴⁰ Für Verpackungen gilt das RAL-Gütezeichen RAL-GZ 720 % Recyclingkunststoff. Nicht für alle Kunststoffprodukte oder Produkte mit Kunststoffanteil stehen Normen zur Verfügung.

Hürden abzubauen, wurde dort das Instrument der freiwilligen Selbstverpflichtung ausgewählt, um Eckpunkte einer allgemeingültigen Vorgehensweise zu entwickeln (Kasten 3.5).

Kasten 3.5 Green Deals zur einheitlichen Berechnung des Rezyklatanteils in Produkten (Niederlande)

Bei niederländischen Green Deals handelt es sich um freiwillige Vereinbarungen, die zwischen staatlichen Institutionen und Akteuren aus der Wirtschaft und Gesellschaft getroffen werden (Ganzevles et al. 2017). Eingeführt wurde das Instrument 2011 im Rahmen der niederländischen grünen Wachstumspolitik. Es dient als Kommunikationskanal zwischen Unternehmen und anderen Akteuren mit dem Ziel, die Wirtschaft umweltfreundlicher und nachhaltiger zu gestalten (van Langen/Passaro 2021).

Ein 2020 initiiertes und 2022 abgeschlossenes Green Deal zielt darauf ab, Regeln für die Berechnung des Rezyklatanteils eines Produktes zu definieren, um vergleichbare und zuverlässige Produktangaben zu ermöglichen. Diese Angaben sollen sowohl für Rezyklate aus dem mechanischen als auch dem chemischen Recycling gemacht werden können. Im Rahmen des Green Deals sollte dafür bestimmt werden, welche konkreten Informationen notwendig sind, um den Rezyklatanteil zu bestimmen, die in der Lieferkette weitergegeben werden müssen (RVO 2021). Für Unternehmen, die Kunststoffe mit Rezyklatanteil nutzen wollen, wird dadurch transparent und nach-

vollziehbar, woher das recycelte Material stammt und zu welchen Anteilen es Primärkunststoffen zugesetzt wurde. Sie erhalten so mehr Sicherheit über die Vertrauenswürdigkeit der Sekundärmaterialien. Für Unternehmen reduzieren sich dadurch die Kosten der Zertifizierung und die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Rezyklaten steigt (Hinzmann et al. 2022, S. 78). Dafür wurde auf der Grundlage bestehender Standards gearbeitet und die Ergebnisse aus fünf Pilotprojekten sind in die Auswertung eingeflossen. Die im Green Deal erarbeiteten Ergebnisse legen Eckpunkte einer allgemeingültigen Vorgehensweise fest:

- › Mittels eines Herkunftsnachweises von einem unabhängigen Zertifizierer wird die Herkunft und Menge des verwendeten Sekundärmaterials definiert und verifiziert. Dies beinhaltet beispielsweise, ob es sich um Pre- oder Post-Consumer-Kunststoffabfälle handelt.
- › Um die Rückverfolgbarkeit entlang der Lieferkette einzuhalten, wird eine Beweismittelkette eingehalten. Dafür gibt es unterschiedliche Modelle für unterschiedliche Recyclingverfahren. Der Green Deal gibt einen gemeinsamen Standard vor, der Anforderungen für jedes der anwendbaren Modelle vorgibt (ISO/TC 308).
- › Produktinformationen, die von Unternehmen zu Unternehmen weitergereicht werden, orientieren sich an einem festgelegten Standard (NEN-ISO 22095).
- › Verbraucherinformationen für Endprodukte orientieren sich an einem Leitfaden, der im Green Deal erarbeitet wurde (Niederländische Unternehmensagentur 2022).

Die Green Deals sind mit Kontrollmechanismen versehen und verfügen über eine Durchsetzungsfähigkeit vor Gericht. Hervorzuheben ist jedoch, dass der Green Deal zu Kunststoffrezyklaten von einer kleinen Gruppe von Unternehmen ausgehandelt wurde, die im Bereich der Kreislaufführung von Kunststoffen eine Vorreiterposition innehaben. Die unmittelbare Wirkung ist somit auf einen limitierten Akteurskreis begrenzt. Da die Erkenntnisse von der Niederländischen Unternehmensagentur öffentlich zugänglich gemacht werden, können aber auch nicht direkt Beteiligte aus den Erfahrungen lernen und die erarbeiteten Lösungsansätze nutzen. Inzwischen haben sich weitere Akteure der Initiative angeschlossen und die innerhalb des Green Deals erarbeiteten Dokumente werden als Arbeitspapiere bei den Standardisierungsinstituten der EU bzw. anderer Länder eingereicht und Verhandlungen angestoßen, um eine Harmonisierung auf europäischer Ebene zu erzielen.

Quelle: Hinzmann et al. 2022, S. 74 ff.

3.2 Elektro- und Elektronikabfälle

Elektro- und Elektronikschrott gehört zu den am schnellsten wachsenden Abfallströmen. Weltweit fielen 2019 53,6 Mio. t Elektroschrott an, was einer Zunahme von 9,2 Mio. t oder 21 % gegenüber 2014 entspricht (44,4 Mio. t). Laut Schätzungen könnte die Abfallmenge bis 2030 auf ca. 75 Mio. t anwachsen. Deutschland gehört im weltweiten Vergleich zu den zehn Ländern mit dem höchsten Elektromüllaufkommen (2019: 1,6 Mio. t) – beim Pro-Kopf-Anteil liegt die Bundesrepublik mit 20 kg weit über dem weltweiten Durchschnitt von 7,3 kg (Zahlen aus Forti et al. 2020).

Diverse Faktoren sind für das steigende Elektroschrottaufkommen verantwortlich: Ins Gewicht fällt vor allem die im Zuge des generellen Digitalisierungstrends stark ansteigende Nachfrage nach Elektro- und Elektronikgeräten;⁴¹ hinzu kommen eine relativ geringe Nutzungsdauer sowie Wiederverwendungsrate (Forti et al. 2020, S. 13). Weltweit werden laut offiziellen Statistiken nur etwa 17 % der Elektro- und Elektronikaltgeräte (EAG) gesammelt und korrekt entsorgt (Forti et al. 2020, S. 14). Was mit dem großen Rest geschieht, ist in der Regel nicht genau bekannt. Im weltweiten Vergleich steht Deutschland zwar ganz gut da (Sammelquote ca. 45 %; Kap. 3.2.1), dennoch findet sich mehr als die Hälfte der Geräte nach ihrem Gebrauchsende abseits der vorgesehenen Verwertungs- und Entsorgungswege (wie z. B. in gelben oder blauen Mülltonnen), werden exportiert, zu Hause gelagert oder im schlimmsten Fall illegal in der Umwelt entsorgt (Raatz et al. 2022a, S. 6).

Dies ist sowohl in ökologischer wie auch wirtschaftlicher Hinsicht problematisch. Denn die kleinteilig aufgebauten Elektro- und Elektronikgeräte bestehen aus sehr unterschiedlichen Materialien, die teils giftig, teils wertvoll sind. Zu den Hauptbestandteilen gehören vor allem Metalle (hauptsächlich Eisen und Kupfer, in deutlich geringeren Anteilen auch Edelmetalle und Seltene Erden), daneben Kunststoffe, Glas und organische Materialien wie Gummi oder Holz (Kaya 2018; Raatz et al. 2022a, S. 36). Da Elektro- und Elektronikgeräten eine große Vielfalt an Gerätetypen umfasst, kann die genaue Materialzusammensetzung von Produkt zu Produkt stark differieren.

Bei nicht fachgerechter Entsorgung können so zum einen giftige Stoffe wie Blei, Cadmium und Quecksilber oder auch klimaschädliche Treibhausgase in die Umwelt gelangen.⁴² Zum anderen gehen durch unzureichendes Recycling aber auch große Mengen wertvoller Rohstoffe verloren, die vorher ressourcen- und energieaufwendig abgebaut, aufbereitet und transportiert werden mussten. Darunter befinden sich neben Kupfer und Edelmetallen diverse Rohstoffe, die laut Definition der Europäischen Kommission (EK 2020b) für die EU von kritischer Bedeutung sind (kritische Rohstoffe). Bei einigen besonders wichtigen dieser kritischen Rohstoffe (z. B. Kobalt, Silicium, Magnesium, Seltene Erden) ist Deutschland nahezu ausschließlich auf den Import aus wenigen Bezugsländern angewiesen, mit entsprechend hohen wirtschaftlichen Abhängigkeiten (ifo Institut 2022). Die Bedeutung dieser kritischen Rohstoffe wird im Zuge der Dekarbonisierung des Energie- und Verkehrssektors weiter stark zunehmen, da sie für die Herstellung von Erneuerbare-Energien-Technologien (Photovoltaik, Windturbinen etc.) und Batterien besonders wichtig sind (KU Leuven 2022). Zudem ist die Herstellung von Elektro- und Elektronikgeräten ein wesentlicher Treiber für die Entwicklung der Nachfrage und damit der Preise für eine Reihe von Metallen (Raatz et al. 2022a, S. 37). So macht die Elektronik beispielsweise fast 80 % des weltweiten Bedarfs an Indium (transparente leitfähige Schichten in LCD-Glas), über 80 % an Ruthenium (magnetische Eigenschaften in Festplatten), 50 % an Antimon (Flammschutzmittel) und 30 % an Silber (Kontakte, Schalter, Lötstellen) aus (Schlupe 2014).

Angesichts sich abzeichnender Versorgungsengpässe stellen Elektro- und Elektronikgeräte somit eine potenziell wichtige Sekundärrohstoffquelle für viele seltene Metalle dar (KU Leuven 2022). Die bisherige Recyclingpraxis beschränkt sich jedoch aus technischen und/oder wirtschaftlichen Gründen weitgehend auf einfach rückgewinnbare Massenmetalle wie Kupfer oder Aluminium. Edelmetalle und kritische Rohstoffe gehen meist verloren, da sie kompliziert verbaut sind und in Einzelgeräten nur in geringen Anteilen vorkommen. Im gesamten Abfallstrom summieren sich ihre Mengen aber erheblich: Laut Schätzungen von Forti et al. (2020, S. 59) enthält

⁴¹ Dazu gehören Geräte, die mit Strom oder Batterie betrieben werden (z. B. Kleingeräte wie Smartphones, Bildschirme und Fernseher, Telefone, Taschenrechner etc., aber auch Großgeräte wie Waschmaschinen) oder der Erzeugung, Übertragung und Messung von elektrischen Strömen und elektromagnetischen Feldern dienen (§ 3 ElektroG).

⁴² Vor allem nicht ordnungsgemäß entsorgte Klimaanlageanlagen tragen durch die enthaltenen Kühlmittel maßgeblich zu den weltweiten Treibhausgasemissionen bei. Schätzungen zufolge könnte das Treibhausgaspotenzial von freigesetzten Altkältemitteln allein in China 2025 einen Höchststand von rund 135 Mio. t CO₂-Äquivalenten betragen (Duan et al. 2018). Dies entspräche 1,2 % der gesamten chinesischen Treibhausgasemissionen.

der 2019 weltweit angefallene Elektroschrott Edelmetalle und kritische Rohstoffe im Wert von 57 Mrd. US-Dollar, die aktuell zum größten Teil noch auf dem Müll landen.

3.2.1 Stoffströme und Rahmenbedingungen

2020 wurden in Deutschland rund 2,8 Mio. t Elektro- und Elektronikgeräte in den Verkehr gebracht (UBA o.J.i). Unter Berücksichtigung des durchschnittlichen jährlichen Zuwachses von 3% könnte sich die Menge der jedes Jahr neu auf den Markt kommenden Produkte in Deutschland bis 2030 schätzungsweise auf ca. 3,5 Mio. t erhöhen (Raatz et al. 2022a, S. 28). Da Elektrogeräte meist nur eine relativ kurze Nutzungsdauer haben und nach einigen Jahren entsorgt werden, fallen jährlich riesige Mengen an Elektroschrott an, die jedoch nur zum Teil auf den vorgesehenen Recyclingwegen landen.

Sammelmengen und -quoten

Maßgeblich für Sammlung und sachgemäße Entsorgung von EAG auf europäischer Ebene ist die Richtlinie 2012/19/EU⁴³ (nachfolgend WEEE-Richtlinie), die in Deutschland als Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG)⁴⁴ in nationales Recht umgesetzt ist (dazu und zum Folgenden Raatz et al. 2022a, S. 11 f.). 2003 erstmals erlassen, wurde die WEEE-Richtlinie 2012 mit der Richtlinie 2012/19/EU⁴⁵ (nachfolgend WEEE-Richtlinie – Neufassung) neu ausgestaltet, u. a. um die nach wie vor bestehenden Missstände mit Exporten von Altgeräten in Länder mit niedrigeren Recyclingstandards zu umgehen.⁴⁶ Um zu verhindern, dass nicht mehr funktionsfähige EAG illegal als Gebrauchsgüter exportiert werden, muss seit 2012 die Funktionstüchtigkeit bei der Ausfuhr nachgewiesen werden (Anhang VI). Übergeordnetes Ziel der WEEE-Richtlinie – Neufassung ist, zu Nachhaltigkeit bei Produktion und Verbrauch beizutragen, wobei die Priorität auf der Abfallvermeidung liegt und die Wiederverwendung, das Recycling sowie andere Formen der Rückgewinnung von Ressourcen gefördert werden sollen.

Neben der Festlegung, welche elektrischen Geräte von der Richtlinie erfasst sind, und der Bestimmung relevanter Begriffe, werden in der WEEE-Richtlinie – Neufassung insbesondere Maßnahmen genannt, wie diese Ziele auf nationaler Ebene umgesetzt werden sollen (dazu und zum Folgenden Raatz et al. 2022a, S. 12 f.). Dazu zählen u. a.

- > eine recycling- und demontagefreundliche Produktgestaltung (Art. 4),
- > eine vom Restmüll getrennte Sammlung und die Einrichtung dafür geeigneter, kostenloser Sammelsysteme (Art. 5),
- > eine zu erreichende Mindestsammelquote (Art. 7) – bis 2019 in Höhe von 45%, ab 2019 in Höhe von 65%⁴⁷–,
- > sowie Mindestzielvorgaben für die Verwertung (Art. 11), differenziert nach unterschiedlichen Gerätekategorien.

Die Mindestzielvorgaben für die Verwertung bezieht sich auf den gewichtsmäßigen Anteil der ordnungsgemäß gesammelten Altgeräte, die einer zertifizierten Erstbehandlungsanlage zugeführt und anschließend entweder recycelt (inklusive Vorbereitung zur Wiederverwendung) oder energetisch verwertet werden. Dabei ist eine Differenzierung nach Gerätekategorien unumgänglich. Denn je nach Gerätetyp unterscheiden sich EAG hinsichtlich Produktdesign sowie Komponenten- und Materialzusammensetzung teils deutlich (Raatz et al. 2022a, S. 30). Ge-

⁴³ Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (Waste of Electrical and Electronic Equipment – WEEE)

⁴⁴ Elektro- und Elektronikgerätegesetz vom 20.10.2015, zuletzt geändert am 8.12.2022

⁴⁵ Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (Neufassung)

⁴⁶ Der illegale Export von EAG aus Deutschland wurde für 2008 grob auf 155.000 t geschätzt (bei 754.000 t gesammelten EAG); zentrale Zielländer waren Nigeria, Ghana, Indien oder Südafrika (Sander/Schilling 2010). Dort werden die Geräte aufgrund fehlender Recyclinginfrastruktur vorwiegend von jungen Menschen auf Kosten ihrer Gesundheit und der Umwelt manuell demontiert, um Wertstoffe wie Kupfer, Aluminium und Gold zu gewinnen.

⁴⁷ Bemessen am Durchschnittsgewicht der Elektro- und Elektronikgeräte, die in den drei Vorjahren in dem Mitgliedstaat in Verkehr gebracht wurden.

mäß WEEE-Richtlinie – Neufassung werden EAG seit 2018 entsprechend in sechs »sammelungsorientierte« Kategorien (Sammelkategorien) eingeteilt (Kasten 3.6 u. Abb. 3.6), für die unterschiedliche Verwertungsquoten vorgeschrieben sind.

Kasten 3.6 Geräte- und Sammelkategorien gemäß WEEE-Richtlinie

Zwischen 2012 und 2018 wurden EAG in zehn produktorientierte Gerätekategorien eingeteilt (Abb. 3.6). Ab 2018 gilt eine Neukategorisierung in sechs sammlungsorientierte Kategorien, für die unterschiedliche Verwertungsquoten vorgeschrieben sind. Diese lauten (in Klammer sind die jeweils aktuell gültigen Quoten für Verwertung [V] und Wiederverwertung/Recycling [R] angegeben):

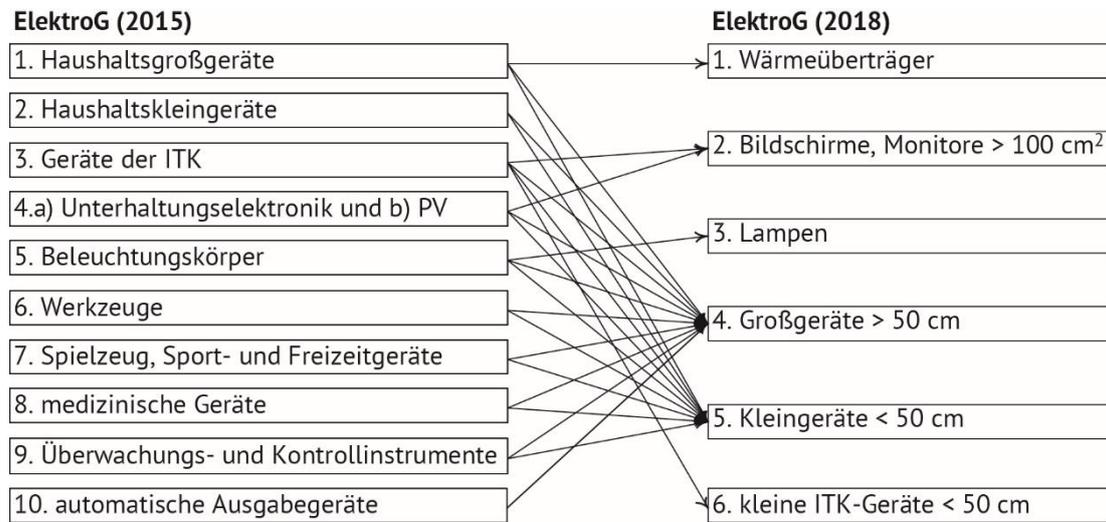
1. Wärmeüberträger (V: 85%; R: 80%)
2. Bildschirme, Monitore und Geräte, die Bildschirme mit einer Oberfläche von mehr als 100 cm² enthalten (V: 80%; R: 70%)
3. Lampen (R: 80%)
4. Großgeräte (eine der äußeren Abmessungen beträgt mehr als 50 cm) (V: 85%; R: 80%)
5. Kleingeräte (keine äußere Abmessung beträgt mehr als 50 cm) (V: 75%; R: 55%)
6. Kleine IT- und Telekommunikationsgeräte einschließlich Mobiltelefone und Smartphones (keine äußere Abmessung beträgt mehr als 50 cm) (V: 75%; R: 55%)

Die Kategorisierung der EAG wurde geändert, weil diverse technische, administrative und rechtliche Schwierigkeiten nach der praktischen Umsetzung der Richtlinie identifiziert wurden, wie z.B. unterschiedliche Interpretationen der alten Einteilung je nach EU-Land (Seyring et al. 2015). Die Kategorien sind u. a. maßgeblich für die zu erreichenden Verwertungsquoten (§ 22 Abs. 1 ElektroG).

Die Neukategorisierung sollte dazu beitragen, die Erfassung sowie die Recycling- und Verwertungsquote zu verbessern. Die geänderte Kategorisierung schafft für das EAG-Recycling aber auch neue Probleme. So steigt durch die Reduzierung der Sammelkategorien deren interne Heterogenität, auch in Bezug auf den Wert und Edelmetallgehalt, was eine Separation der einzelnen Komponenten schwieriger macht. Außerdem ist dadurch der Vergleich von Stoffstromanalysen ganz erheblich erschwert, da Statistiken aus unterschiedlichen Jahren unterschiedliche Kategorisierungssysteme zugrunde liegen können und teilweise auch aktuelle Erhebungen immer noch auf dem alten Kategoriensystem beruhen.

Quelle: Raatz et al. 2022a, S. 30 f.

Abb. 3.6 Neukategorisierung der Sammelgruppen gemäß WEEE-Richtlinie –Neufassung und ElektroG



Quelle: Handke et al. 2019, S.20

Mit dem ElektroG wird seit 2003 die WEEE-Richtlinie in deutsches Recht umgesetzt und ist mit dieser hinsichtlich allgemeiner Ziele und auch der Untersetzung mit einzelnen Maßnahmen zur Erfassung, Sammlung oder Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten weitgehend deckungsgleich (zum Folgenden Raatz et al. 2022a, S. 13 f.).⁴⁸ Das Umweltbundesamt wird darin als die verantwortliche Behörde bestimmt, die u. a. die Aufgabe hat, die Hersteller zu registrieren, deren Bevollmächtigte zu erfassen, der Gemeinsamen Stelle die registrierten Hersteller und Bevollmächtigten mitzuteilen sowie Meldungen bezüglich der Mengen vonseiten der Hersteller und der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger entgegenzunehmen. Als gemeinsame Stelle fungiert die Stiftung elektro-altgeräte register (stiftung ear)⁴⁹, die 2004 von Herstellern und Verbänden der Elektro- und Elektronikbranche gegründet wurde und für die wettbewerbsrechtliche Umsetzung des ElektroG und des Batteriegesetzes⁵⁰ (BattG) verantwortlich ist. Dazu obliegen der Stiftung Aufgaben wie die Registrierung der Hersteller, die Erfassung der in Verkehr gebrachten Mengen oder die Koordinierung der EAG-Abholung bei den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern (Landkreise, kreisfreie Städte und Gemeinden).⁵¹

Für die Entsorgung von EAG gilt in Deutschland eine zwischen Herstellern und öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern geteilte Produktverantwortung (Kap. 2.2.1). Während die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger für die kostenlose Sammlung der Altgeräte zuständig sind und dafür Sammelsysteme einzurichten haben, sind die Hersteller für die ordnungsgemäße Entsorgung der EAG verantwortlich. In Deutschland gibt es derzeit rund 2.400 kommunale Sammelstellen hauptsächlich auf Wertstoffhöfen (UBA o.J.f). Darüber hinaus können EAG im Großhandel (Elektrofachmärkte und Supermärkte von mehr als 400 m²) abgegeben werden.⁵² Mit Beginn des Jahres 2022 ist die Novellierung des ElektroG in Kraft getreten. Grund für die Novellierung war u. a., dass ausländische Hersteller und Händler ihre Elektronikgeräte zunehmend auf elektronischen Marktplätzen vertreiben, teilweise ohne sich bei der stiftung ear samt aller Folgepflichten zu registrieren (BMUV o.J.b, S. 26; dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2022, S. 71 f.). Im ElektroG wurde aus diesem Grund die Registrierungspflicht von Herstellern mit zusätzlichen Informationspflichten und der Pflichtvorlage von Rücknahmekonzepten im Business-to-Business-Bereich erweitert. Auch die Rückgabemöglichkeiten wurden mit dem ElektroG ausgeweitet. So ist eine Rücknahmepflicht im Lebensmitteleinzelhandel ab 800 m² Verkaufsfläche vorgesehen für Kleingeräte bis 25 cm, wenn dort auch Elektronikgeräte verkauft werden. Ob die erweiterte Rücknahme und Hinweispflichten

⁴⁸ Erstmals trat das Gesetz 2005 in Kraft, 2015 und 2022 wurde es novelliert.

⁴⁹ <https://www.stiftung-ear.de/de/startseite> (24.1.2024)

⁵⁰ Batteriegesetz vom 25.6.2009, zuletzt geändert am 3.11.2020

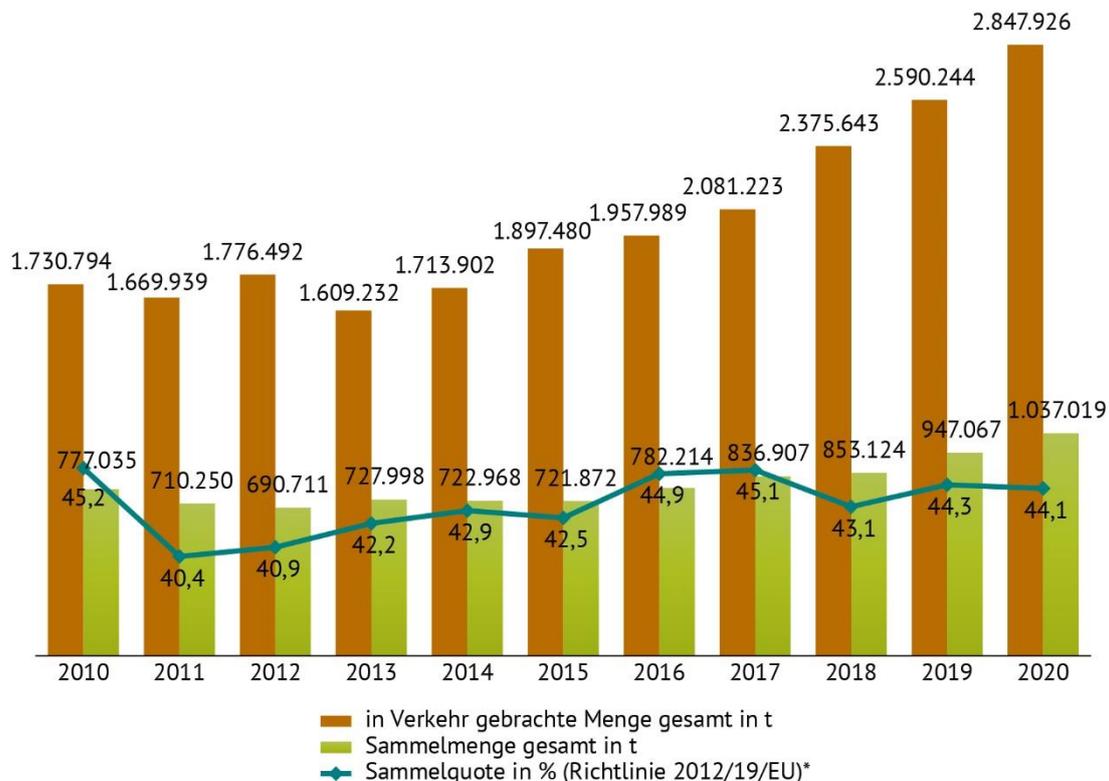
⁵¹ <https://www.stiftung-ear.de/de/ueber-uns/wer-wir-sind> (24.1.2024)

⁵² Elektrokleingeräte können ohne Weiteres kostenlos abgegeben werden, Großgeräte nur dann, wenn ein vergleichbares Gerät gekauft wird. Für große Onlinehändler gilt eine entsprechende Rücknahmepflicht.

im Handel substanzielle Verbesserungen bei der Rückgabequote herbeiführen, kann zumindest bezweifelt werden, denn die Einsammlung ist primär mit Kosten verbunden und die Motivation im Handel scheint entsprechend gering (EUWID 2022e).

Die Verbraucher/innen wiederum sind verpflichtet, EAG nicht im Restmüll zu entsorgen, sondern dafür eine der vorgesehenen Abgabe- und Sammelstellen zu nutzen. Dennoch liegt die aktuelle Rücklaufquote noch deutlich unter der aktuell gesetzlich vorgeschriebenen Mindestsammelquote von 65 % (Abb. 3.7).

Abb. 3.7 In Verkehr gebrachte Mengen, Sammelmengen und -quoten bei Elektro- und Elektronikgeräten



* Die Berechnung der Sammelquote erfolgt bezogen auf den Durchschnitt der in Verkehr gebrachten Menge der 3 Vorjahre.

Eigene Darstellung mit Daten von BMUV o.J.a

2020 wurden etwas unter 2,85 Mio. t Elektro- und Elektronikgeräte in den Verkehr gebracht und etwa 1 Mio. t EAG eingesammelt, davon der weit überwiegende Teil aus privaten Haushalten (Raatz et al. 2022a, S. 28). Die Sammelquote betrug ca. 44% – auch in den Jahren davor pendelte sie um diesen Wert. Zwar erhöhte sich die Sammelmenge in den letzten Jahren kontinuierlich, da aber auch die in Verkehr gebrachte Menge anwuchs, hatte dies keine nennenswerten Auswirkungen auf die Rücklaufquote. Auch vorläufige Zahlen der stiftung ear für 2021 deuten keine Trendwende an (EUWID 2022c).

Aus den Rücklaufquoten ist ersichtlich, dass sich mehr als die Hälfte der EAG nach ihrem Gebrauchende immer noch abseits der vorgesehenen Verwertungs- und Entsorgungswege findet. Insbesondere drei Gruppen von Elektro- und Elektronikgeräten sind dabei problematisch, nämlich (dazu und zum Folgenden Raatz et al. 2022a, S. 69)

- > Elektrokleingeräte (z.B. Smartphones, Bluetoothlautsprecher, Elektronikgadgets), die aufgrund ihrer geringen Größe gerne über den Restmüll entsorgt werden;

- > die untypischen EAG (z. B. elektrische Zahnbürsten oder elektronisches Spielzeug), die nur einen relativ kleinen Elektronikanteil haben. Hier ist Verbraucher/innen oft nicht bekannt, dass es sich um Produkte handelt, die entsprechend zu entsorgen sind;
- > Möbel mit fest verbauten elektrischen Komponenten (z. B. Schränke mit eingebauter Beleuchtung, elektrisch verstellbare Sitzmöbel).⁵³

Natürgemäß liegen keine offiziellen Erhebungen zum Verbleib der nicht ordnungsgemäß gesammelten Geräte vor. Handke et al. (2019, S.29) schätzen für 2016, dass 31 % der in Verkehr gebrachten Elektrokleingeräte in Deutschland als Fehlwürfe im Hausmüll landen, zu Hause gelagert oder illegal exportiert werden. Laut einer Berechnung der Bitkom (2022) auf Basis einer repräsentativen Befragung werden in Deutschland aktuell 210 Mio. Mobiltelefone oder Smartphones, 49 Mio. Laptops und 26 Mio. Tablets ungenutzt zu Hause aufbewahrt. Das ist eine deutliche Steigerung in wenigen Jahren.⁵⁴ Etwa ein Zehntel der Einwohner/innen Deutschlands weiß nicht, wie Altgeräte zu entsorgen sind, wie die Bitkom-Erhebung ergeben hat, und ungefähr ebenso viele haben schon EAG im Hausmüll entsorgt. Auch die Menge an Elektroschrott, die illegal exportiert wird, ist trotz der Bestimmungen der WEEE-Richtlinie – Neufassung vermutlich noch immer hoch. Dies zeigt das BAN (2019) in seiner Studie, bei der der Weg von 314 mit GPS-Trackern versehenen EAG untersucht wurde. 19 davon wurden exportiert, 11 davon in Entwicklungsländer. Hochgerechnet ergibt das für die EU eine illegale jährliche Exportmenge in Entwicklungsländer in Höhe von 20.887 t Elektroschrott (BAN 2019, S.4).⁵⁵

Insgesamt sind also noch erhebliche Anstrengungen erforderlich, um das EU-Sammelziel von 65 % zu erreichen. Die Menge an eingesammelten Altgeräten müsste dafür um bis zu 800.000 t erhöht werden (EUWID 2022c) – Tendenz steigend, da ja auch die Menge der neu in Verkehr gebrachten Geräte kontinuierlich anwächst. Besser sieht es für die Quotenvorgaben hinsichtlich Verwertung bzw. Recycling aus, die für die einzelnen Gerätekategorien festgelegt sind. Sie werden durchgehend erreicht (Tab. 3.2), was aber laut Raatz et al. (2022a, S. 49) auch darin begründet liegen könnte, dass die Meldedaten über Mengen, die beseitigt und nicht verwertet werden,⁵⁶ über alle Kategorien hinweg sehr gering und nicht unbedingt realistisch sind. Herauslesen lässt dies, so Raatz et al. (2022a), aus den Infobriefen der stiftung ear an die Hersteller und Entsorger, die von den Bemühungen zeugen, die Meldepflichten durchzusetzen.

Tab. 3.2 Erstbehandlung und Recyclingrate von Gerätekategorien (2020)

| Geräte-kategorien | Gesamt-menge | Menge gewerblich | Behandlung | | | R-Quote (Soll) | |
|-----------------------------------|--------------|------------------|------------|-------|------|----------------|-----------|
| | | | VzW | R | V | | B |
| | | | in 1.000 t | | | in % | |
| Wärmeüber-träger | 190,4 | 9,5 | 0,3 | 162,4 | 25,8 | 2,0 | 85,5 (80) |
| Bildschirme > 100 cm ² | 113,5 | 2,3 | 1,9 | 100,8 | 7,2 | 3,6 | 90,5 (70) |
| Lampen | 7,5 | 0,1 | | 6,9 | 0,1 | | 92,0 (80) |
| Großgeräte | 313,1 | 29,1 | 6,5 | 270,0 | 27,6 | 6,7 | 88,3 (80) |
| Kleingeräte | 290,2 | 16,5 | 7,0 | 232,3 | 46,6 | 4,3 | 82,5 (55) |

⁵³ Möbel mit elektrischen Komponenten fallen unter das ElektroG, wenn die elektronischen Komponenten nicht einfach zu entfernen sind. Wenn sie entfernbar sind, müssen diese Komponenten über Annahmestellen nach ElektroG entsorgt werden, was Verbraucher/innen selten bekannt ist.

⁵⁴ Gegenüber 2014 hat sich die Anzahl ungenutzter Schubladengeräte mehr als verdoppelt. Damals waren es noch 100 Mio. ausrangierte Mobiltelefone und Smartphones sowie 22 Mio. Altlaptops (Bitkom 2022). Ungenutzte Tablets wurden 2014 noch nicht erhoben.

⁵⁵ In Deutschland wurden von 54 getrackten Geräten, die ordnungsgemäß an einer kommunalen Sammelstelle abgegeben wurden, eines illegal in ein Entwicklungsland exportiert (BAN 2019, S. 47).

⁵⁶ Beseitigung ist die letzte abfallwirtschaftliche Option (z. B. Verbrennung ohne Energiegewinnung) in der Abfallhierarchie, die dann zum Tragen kommt, wenn die Abfälle nicht verwertet werden können (Destatis 2021a).

| Geräte- kategorien | Gesamt- menge | Menge gewerb- lich | Behandlung | | | | R-Quote (Soll) |
|--------------------------|------------------|--------------------------|------------|-------|-------|------|----------------|
| | | | VzW | R | V | B | |
| | | | in 1.000 t | | | | in % |
| kleine IT-/ TK-Geräte | 122,4 | 9,0 | 1,7 | 107,4 | 12,0 | 1,2 | 89,1 (55) |
| insgesamt | 1.037,0 | 66,5 | 19,5 | 879,8 | 119,4 | 18,3 | 86,7 |

VzW: Vorbereitung zur Wiederverwendung; R: Recycling; V: energetische Verwertung; B: Beseitigung (z. B. Verbrennung ohne Energiegewinnung)

Quelle: nach Destatis 2021a

In Summe wurden 2021 86,7% der gesamten Rücknahmemenge dem Recycling zugeführt, womit sich die Recyclingquote gegenüber dem Vorjahr leicht erhöhte (um 1,3%). Die Vorbereitung zur Wiederverwendung spielte dabei bei allen Gerätekategorien nur eine marginale Rolle, wie Tabelle 3.2 zeigt. Zu beachten ist, dass es sich bei der Recyclingquote um eine reine Inputquote handelt, deren Berechnung auf den Mengen basiert, die dem Recyclingprozess zugeführt wurden. Sie sagt daher nichts darüber aus, welche »Materialien recycelt wurden und welche Art des Recyclings zum Einsatz kam« (Handke et al. 2019, S. 28). Verluste beim Recyclingprozess, wie etwa die Verbrennung von Störstoffen oder das Verschwinden über die Schlacke im pyrometallurgischen Prozess, werden bislang bei der offiziellen Quote mit einbezogen (dazu und zum Folgenden Raatz et al. 2022a, S. 17 u. 97). Die Recyclingquote in ihrer jetzigen Form ist daher nur ein begrenzt guter Indikator für die Kreislaufwirtschaft, der nichts über die Menge oder Qualität der gewonnenen Rezyklate aussagt. Produkte wie Mobiltelefone/Smartphones gelten nach bestehendem Recht als zu 100% recycelt, wenn sie einer wie auch immer gearteten stofflichen Verwertung zugeführt werden, ohne auch nur ein Milligramm der enthaltenen kritischen Rohstoffe wie Gold, Palladium oder Indium zurückzugewinnen.

Mengenaufkommen

Mit der ständig fortschreitenden Entwicklung wächst auch die Vielfalt an Elektro- und Elektronikgeräten unaufhörlich. Funktion, Größe, innere Struktur sowie Komponenten- und Materialzusammensetzung variieren nicht nur zwischen den Gerätekategorien, sondern auch zwischen einzelnen Geräten einer Kategorie⁵⁷ (z. B. Kleingeräte) oder gar einer Produktgruppe (z. B. Staubsauger) teils erheblich. Aufgrund dieser Heterogenität ist eine einheitliche Bestimmung der Materialzusammensetzung von EAG kaum möglich; auch die materialbezogene Analyse von Elektroschrott gestaltet sich schwierig, da EAG sehr komplex zusammengesetzt sind und aufgrund des Miniaturisierungstrends immer kleinteiligere Komponenten beinhalten.

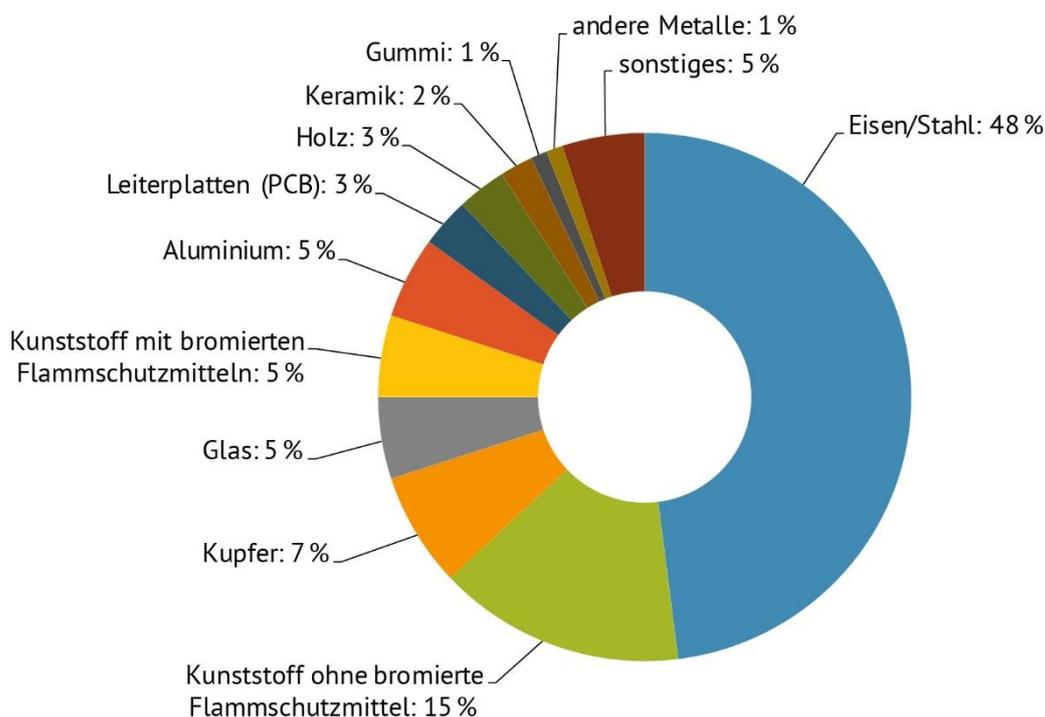
Es wird geschätzt, dass in EAG bis zu 69 Elemente des Periodensystems vorzufinden sind (Forti et al. 2020, S. 58). Die größte Fraktion stellen Metalle mit einem Masseanteil von ca. 60% dar, es folgen Kunststoffe mit ca. 20%, Glas mit ca. 5% und organische Materialien mit ca. 4% (Holz, Gummi) (Kaya 2018; Abb. 3.8).⁵⁸ Bei den Metallen dominiert Eisen (bzw. Stahl) mit einem Anteil von ca. 50%. Hinzu kommen – entsprechend mit deutlich geringerem Anteil – weitere Massenmetalle (Kupfer, Aluminium), giftige Schwermetalle (Blei, Cadmium, Quecksilber etc.), außerdem Edelmetalle (Gold, Silber, Palladium, Platin) sowie Metalle der Seltenen Erden und weitere kritische Rohstoffe (z. B. Cobalt, Silicium, Magnesium). Letztere sind in EAG oft nur sehr gering konzentriert, jedoch teilweise deutlich höher als in natürlich vorkommenden Erzen. So kann beispielsweise durch das

⁵⁷ So umfasst beispielsweise die Gerätekategorie 5 (Kleingeräte) die folgenden Produkte: Staubsauger, Teppichkehrmaschinen, Geräte zum Nähen, Leuchten, Mikrowellengeräte, Lüftungsgeläte, Bügeleisen, Toaster, elektrische Messer, Wasserkocher, Uhren, elektrische Rasierapparate, Waagen, Haar- und Körperpflegegeräte, Taschenrechner, Radiogeräte, Videokameras, Videorekorder, Hi-Fi-Anlagen, Musikinstrumente, Ton- oder Bildwiedergabegeräte, elektrisches und elektronisches Spielzeug, Sportgeräte, Fahrrad-, Tauch-, Lauf-, Rudercomputer usw., Rauchmelder, Heizregler, Thermostate, elektrische und elektronische Kleinwerkzeuge, medizinische Kleingeräte, kleine Überwachungs- und Kontrollinstrumente, kleine Produktausgabeautomaten, Kleingeräte mit eingebauten Photovoltaikmodulen.

⁵⁸ Aufgrund des sich stetig verändernden Produktangebots, der starken regionalen Unterschiede und der Inhomogenität sind genaue Angaben schwierig und sowohl bei den einzelnen Gerätekategorien als auch innerhalb der Kategorien mit großen Abweichungen verbunden.

Recycling von 1 t alter Smartphones bis zu 300 g Gold zurückgewonnen werden, während 1 t Golderz nur 3 g Gold hergibt (Kaya 2018, S. 41).

Abb. 3.8 Hauptfraktionen in Elektro- und Elektronikgeräten



Quelle: nach Kaya 2018, S. 38

Welche großen Unterschiede zwischen den Gerätekategorien in der Materialzusammensetzung bestehen, lässt sich anhand eines Vergleichs der Kategorie 3 (Lampen) und Kategorie 5 (Kleingeräte) verdeutlichen. Wie ein vereinfachter Überblick über die Zusammensetzung der Gerätekategorien in Seyring et al. (2015, S. 49 ff.) zeigt, bestehen Lampen hauptsächlich aus Glas (ca. 70%), Aluminium (ca. 12%) und Kunststoffen (ca. 10%). Kleingeräte hingegen primär aus dem Massenmetall Eisen (ca. 45%), daneben aus Kunststoffen (ca. 26%) sowie aus Kupfer (ca. 9%) und Aluminium (ca. 4%). Pauschale Angaben dieser Art sind jedoch nur bedingt belastbar, da die Gerätekategorien wie angesprochen sehr unterschiedliche Produkttypen umfassen und die Datenlage zu den in EAG enthaltenen Materialien insgesamt mangelhaft ist (Raatz et al. 2022a, S. 38). Differenziertere Angaben zur Zusammensetzung der Gerätekategorien 3 und 5 finden sich im Gutachten von Raatz et al. (2022a, S. 40 ff.).

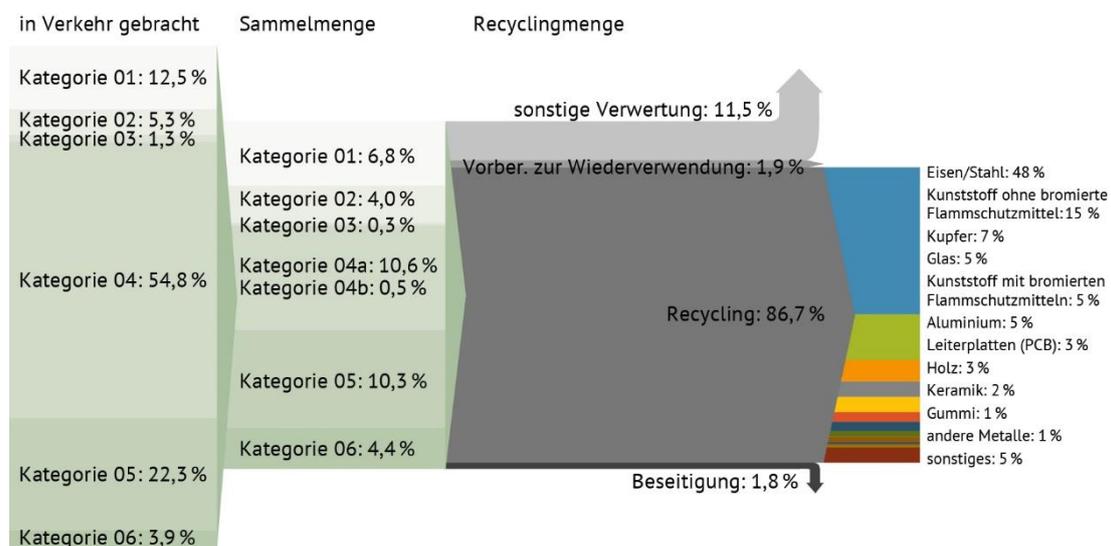
Die meisten Wertstoffe sind bei EAG in der Leiterplatte enthalten, die das ökonomisch wertvollste, aber auch am komplexesten zusammengesetzte Bauelement darstellt (dazu und zum Folgenden Raatz et al. 2022a, S. 79). Auch hier bestehen jedoch zwischen Geräten und Gerätekategorien große Unterschiede: Je nach Typ enthalten Leiterplatten 8 bis 38% Eisen, 10 bis 27% Kupfer, 2 bis 19% Aluminium, 1 bis 3% Blei, 0,3 bis 2% Nickel, 200 bis 3.000 ppm Silber, 20 bis 500 ppm Gold und 10 bis 200 ppm Palladium (Hao et al. 2020). Die Rückgewinnung von Metallen aus Leiterplatten steht aufgrund der steigenden Komplexität des Bauteils und des sinkenden Gehalts von Edelmetallen vor großen Herausforderungen. Im Jahr 1980 wurden für ihre Herstellung 12, heutzutage rund 60 verschiedene Elemente benötigt, wobei die Konzentrationen der Metalle eine sehr große Spannweite aufweisen (Schäfer 2021).

Raatz et al. (2022a, S. 31 f.) haben auf Basis des verfügbaren Datenmaterials eine Stoffstromanalyse für die unterschiedlichen Gerätekategorien durchgeführt (Abb. 3.9). Daraus wird ersichtlich, welche Materialien dem Recycling zugeführt werden. Die Berechnungen beruhen zum einen auf statistischen Zahlen zu den in Verkehr gebrachten Mengen (BMU 2020a) sowie den Sammelmengen und Recyclingraten (Destatis 2022) – jeweils aufgeschlüsselt nach Gerätekategorien, Bezugsjahr 2020 – und zum anderen auf Annahmen zu den einzelnen enthaltenen Fraktionen in Kaya (2018). Die statistischen Daten zur Fraktionierung beruhen auf Untersuchungen, die

2018 veröffentlicht wurden. Da sich die Zusammensetzung in so kurzer Zeit allerdings nicht fundamental ändert, kann davon ausgegangen werden, dass die Anteile der Fraktionen grob stimmen, aber natürlich nicht exakt der Realität entsprechen – was alleine schon aufgrund der großen Unsicherheiten hinsichtlich der Materialzusammensetzung der Gerätekategorien nicht zu erwarten wäre.

Die gewichtsbasierte Stoffstromanalyse ergibt, dass fast die Hälfte der dem Recycling zugeführten Menge an Elektroschrott aus Eisen/Stahl besteht (48%), gefolgt von Kunststoffen (20%), Kupfer (7%), Aluminium und Glas (je 5%). Andere Metalle – darunter die besonders wertvollen Edelmetalle und Seltenen Erden – machen nur 1% aus. Insgesamt hat der Metallgehalt im Elektroschrott, und vor allem der Edelmetallgehalt, über die Jahre deutlich abgenommen. Die Konzentrationen von Silber, Gold und Palladium haben sich seit 1970 um über 80% verringert (Schäfer 2021). Für die Wirtschaftlichkeit des EAG-Recycling ist dies problematisch, da Gold und Palladium – je nach geltenden Rohstoffpreisen – über 70% des Metallwertes z. B. eines Smartphones ausmachen (Bookhagen et al. 2020; Fluchs/Neligan 2023, S. 18). Trotz dieser Entwicklung und der sinkenden Edelmetallgehalte in Einzelgeräten⁵⁹ ergeben sich durch die schiere Menge der EAG alles in allem wertvolle Rohstoffmengen. So enthalten die 210 Mio. Mobiltelefone und Smartphones, die in Deutschland in den Schubladen lagern, hochgerechnet schätzungsweise etwa 3.356 t Eisen, 1.520 t Magnesium, 1.388 t Kupfer, 1.403 t Aluminium, 3,57 t Gold und 1.947 t Silizium – eine Rohstoffmenge, deren Gesamtwert sich auf ca. 250 Mio. US-Dollar beläuft (berechnet anhand der durchschnittlichen Rohstoffpreise von Januar bis Juni 2022; (Fluchs/Neligan 2023, S. 18 f.).

Abb. 3.9 EAG-Stoffstromanalyse (gewichtsbasiert; Stand 2020)



Quelle: nach Raatz et al. 2022a, S. 31; basierend auf Daten von Destatis 2022; Kaya 2018

3.2.2 Metallrecyclingverfahren: Stand der Technik und Innovationen

In den kommunalen Sammelstellen werden die zurückgegebenen EAG getrennt erfasst und von dort an zertifizierte Erstbehandlungsanlagen weitergeleitet. Diese sind auf bestimmte Gerätekategorien spezialisiert, da die einzelnen Aufbereitungsschritte von Kategorie zu Kategorie unterschiedlich sind und die Altgeräte so zudem besser auf eine mögliche Wiederverwendung geprüft und ggf. vorbereitet werden können (UBA o.J.f). Von da gelangen sie im nächsten Schritt zu den tatsächlichen Aufbereitungs- und Verwertungsanlagen, in denen die einzelnen Fraktionen (Metalle, Kunststoffe, Glas, Keramik etc.) als sekundäre Rohstoffe wiedergewonnen werden können. Gemäß § 3 Abs. 28 KrWG sind die Erstbehandlung und alle weiteren Recyclingschritte nach dem Stand der Technik durchzuführen, der im Folgenden für das Metallrecycling beschrieben wird.

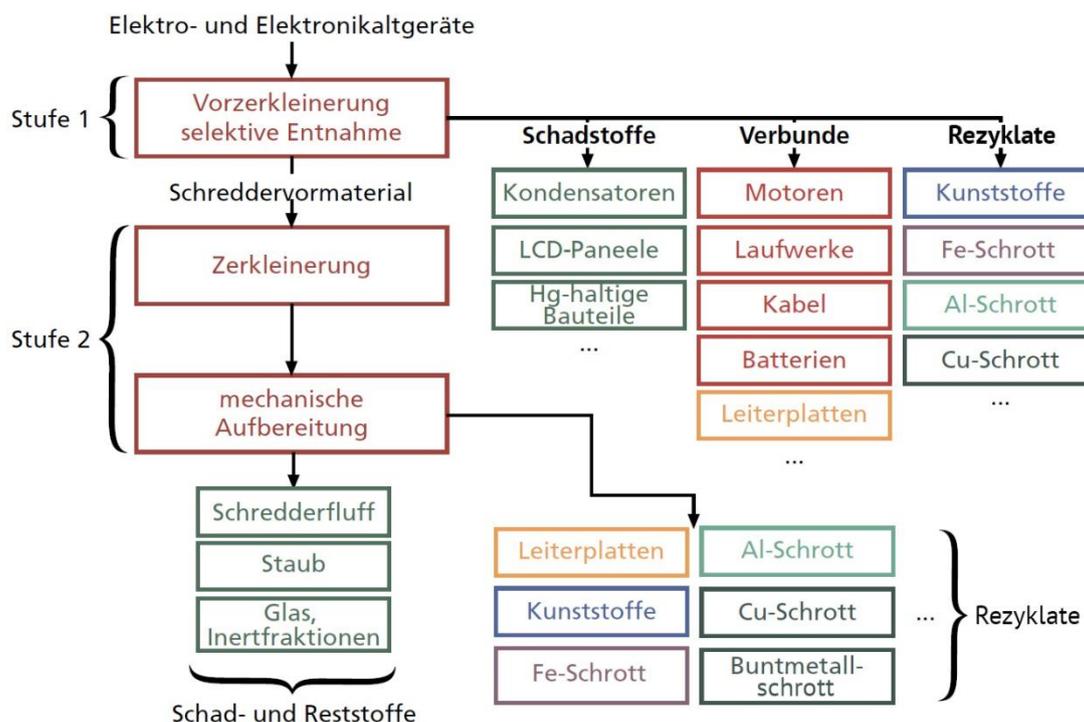
⁵⁹ In einem Smartphone sind beispielsweise durchschnittlich nur 0,017 g Gold und 0,0019 g Palladium enthalten (Bookhagen et al. 2020).

Erst- und Vorbehandlung

Die Erstbehandlung in zertifizierten Anlagen umfasst üblicherweise die fachgerechte Demontage der Produkte sowie die mechanische Zerkleinerung der Komponenten. Ziel ist es, Materialfraktionen zu erzeugen, deren Qualität für die anschließenden Weiter- bzw. Endverarbeitungsprozesse, z. B. in Gießereien oder in pyrometallurgischen Unternehmen, geeignet ist (Raatz et al. 2022a, S. 67). Schadstoffhaltige sowie verbundene Komponenten werden dabei entfernt und gesondert behandelt. In Abbildung 3.10 ist der Prozess schematisch dargestellt – das genaue Vorgehen ist abhängig von der Gerätekategorie, wie Raatz et al. (2022a, S. 71 ff.) am Beispiel der Sammelgruppen 3 und 5 aufzeigen. Derzeit sind laut stiftung ear (o.J.) 413 Betreiber von Erstbehandlungsanlagen registriert (Stand: Juni 2023), die sich über ganz Deutschland verteilen.

Die Vorbehandlung von EAG wird nach dem heutigen Stand der Technik hauptsächlich durch manuelle Demontage, Schreddern oder Brechen erreicht (dazu und zum Folgenden Raatz et al. 2022a, S. 53 f. u. 70 f.). Die Demontage ist der erste wichtige Aufbereitungsschritt, den praktisch alle Altgeräte durchlaufen müssen, um recycelt oder ordnungsgemäß entsorgt zu werden. Das Hauptziel dieses Schrittes besteht darin, die in den EAG enthaltenen Schadstoffe vor einer Weiterverarbeitung zu entfernen und Wertstoffe/Baukomponenten möglichst vollständig zu separieren, um sie qualitativ hochwertig recyceln zu können. Die manuelle Demontage mittels elektrischer oder pneumatischer Werkzeuge ist sehr präzise und hat geringe Investitionskosten. Sie erfordert jedoch in der Regel die höchste Anzahl von Mitarbeiter/innen in der gesamten Aufbereitungskette (Poschmann et al. 2020), was die Betriebskosten insbesondere in den Industrienationen erhöht. Deshalb werden auf diese Weise hauptsächlich Produkte mit einem hohen Materialwert und/oder mit schadstoffhaltigen Bauteilen behandelt (z. B. Kühl-/Gefriergeräte). Der Demontageprozess lässt sich kaum vollumfänglich automatisieren, da sehr unterschiedliche Produktdesigns zu beachten sind und Demontagepläne häufig nicht vorliegen. Poschmann et al. (2020) prognostizierten, dass die Automatisierung der Demontage mittels Robotik erst im nächsten Jahrzehnt ihre industrielle Reife erreichen wird. Voraussetzung dafür sind digitale Produktpässe mit Demontageplänen, die automatisiert ausgelesen werden können.

Abb. 3.10 Schematische Prozessdarstellung bei der EAG-Erstbehandlung



Quelle: nach Rotter et al. 2014, S. 195

Nach der Demontage erfolgt in der Regel die Zerkleinerung der gemischten Elektroschrotte in einem Schredder, mit der einerseits das Volumen reduziert, aber auch eine bessere Trennung der verschiedenen Wertstoffe erreicht wird (Liberation; dazu und zum Folgenden Raatz et al. 2022a, S. 61). Der Zerkleinerungsgrad unterscheidet sich dabei zwischen den einzelnen Gerätekategorien. Bei Wasch- und Spülmaschinen ist nur eine recht grobe Zerkleinerung erforderlich, während EAG, die Komponenten mit kleinteiligem Aufbau besitzen wie beispielsweise Unterhaltungselektronik, feiner geschreddert werden, um anschließend die verschiedenen Metalle möglichst sortenrein separieren zu können (bvse o.J.). Nach dem Schreddern werden Störstoffe wie Kunststoffe, Lacke, Holz, Papier, Textilien mittels einer Windsichtung entfernt. Die Abtrennung von Eisen- und Stahlpartikeln aus dem Schreddermaterial erfolgt dann über eine Magnetabscheidung, während die Separation von Nichteisenmetallen mittels Hochfrequenz-Metallscheider durchgeführt wird. Dafür müssen die metallischen Partikel mithilfe von Siebtrommeln nach ihrer Partikelgröße klassiert werden, damit eine genaue Trennung ermöglicht wird. Die edelmetallhaltigen Verbundmaterialien werden in Metallhütten über elektrolytische Verfahren in die einzelnen Fraktionen getrennt.

Nach der Demontage sowie ggf. Zerkleinerung erfolgt die Aufteilung des Materials in verschiedene Fraktionen, die anschließend in die Weiter- oder Endbehandlung gehen können (dazu und zum Folgenden Raatz et al. 2022a, S. 77). Neben der manuellen Sortierung wurden automatisierte Methoden entwickelt, beispielsweise die Sortierung nach Partikelgröße und/oder Masse (z. B. Siebung, Hydrozyklon⁶⁰, Rütteltisch) oder die Sortierung nach magnetischen und elektrostatischen Eigenschaften (Magnetscheidung, Eddy-Current-Separator⁶¹). Neue Entwicklungen stellen die sensorbasierten Methoden dar, bei denen ein Detektor (z. B. Kamera) bestimmte Partikeleigenschaften (z. B. Farbe, chemische Zusammensetzung) erkennt und der mit dem Detektor verbundene Computer einen Trennungsmechanismus (z. B. Luftventile) aktiviert. So wird bei Aluminiumschrotten insbesondere ein Linear-Inductive-Position(LIP)-Sensor verwendet; darüber hinaus spielen Methoden wie Röntgenfluoreszenzanalyse zur Metallerkennung eine Rolle (Seidel et al. 2021).

Die Vorbehandlung hat entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Recyclings, da für die Rückgewinnung von Metallen möglichst sortenreine Fraktionen benötigt werden (dazu und zum Folgenden Raatz et al. 2022a, S. 63, 68 u. 76). Aufgrund komplexer Materialverbindungen und Legierungen verschiedener Metalle ist die vollständige Trennung der Materialien auf mechanischem Weg meist nicht möglich (Schäfer 2021). Die mechanische Zerkleinerung ist auch aus anderen Gründen nicht immer die optimale Lösung. Der Grund ist, dass mit zunehmender mechanischer Zerkleinerung die Wahrscheinlichkeit steigt, dass ressourcenrelevante Metalle in einem Stoffgemisch fein verteilt werden. So zeigen etliche Studien, dass die Rückgewinnungsraten von Edelmetallen durch manuelle Behandlung erhöht werden können (Kummer et al. 2020, S. 41). Das UBA (Kummer et al. 2020, S. 41) empfiehlt daher, »Geräte und Leiterplatten, in denen sich hohe Edelmetallgehalte konzentrieren, sehr früh und zerstörungsfrei aus dem EAG-Strom« zu separieren. Voraussetzung dafür ist in den meisten Fällen eine manuelle Demontage der Geräte. Daneben müssen für die Rückgewinnung von Sondermetallen aber auch die Schredder- und Sortieranlagen optimiert werden, wie etwa der Fall von Seltenen Erden zeigt, die in Festplatten enthalten sind (Rotter et al. 2013). Diese werden in den meisten Entsorgungsbetrieben zusammen mit anderen Geräteteilen einer mechanischen Zerkleinerung und Sortierung zugeführt. Dabei haften die Magnete der Festplatten, in denen die Seltenen Erden enthalten sind, in der Sortierung an den Stahlteilen und werden somit vollständig in die Stahlfraktion sortiert und gehen so verloren.

Aufbereitung und Verwertung

Die mechanische Vorbehandlung des Elektronikschrotts dient dazu, trotz der Heterogenität der Produkte und Materialien mittels Sortierung und Zerkleinerung mehr oder weniger saubere metallische Fraktionen zu erzeugen. Dazu gehören Stahl, Aluminium und ggf. spezifische Bauelemente wie Leiterplatten (Seelig et al. 2022). Aufgrund einer unvollständigen Demontage und der Komplexität der Produkte handelt es sich bei den erzeugten Fraktionen aber meistens um Gemische mit einer vorherrschenden Hauptkomponente, die anschließend in spezialisierten Recyclingbetrieben metallurgisch aufbereitet werden, um Metalle in möglichst reiner Form zurückzugewinnen. Dafür kommen primär pyro- sowie hydrometallurgische Verfahren infrage (dazu und zum Folgenden Raatz et al. 2022a, S. 78 ff. u. 128):

⁶⁰ In einem Hydrozyklon wird das Gemisch durch ein Medium (Gas, Flüssigkeit) in Bewegung versetzt, wobei sich aufgrund der Schwerkraft die größeren und schwereren Partikel zur Wand bewegen und sinken.

⁶¹ In einem Eddy-Current-Separator bilden sehr schnell rotierende magnetische Pole ein veränderliches magnetisches Feld, wobei bestimmte Partikel magnetisiert und abgestoßen werden.

- › Das Standardverfahren bei der Verarbeitung von Elektro- und Elektronikschrott mit hohen Gehalten von Massenmetallen wie Kupfer, Nickel, Zinn und Blei ist die Pyrometallurgie. Pyrometallurgische Prozesse sind im Wesentlichen Verfahren für die Konzentration von Massenmetallen in einer metallischen Phase und einer Überführung des Großteils der Begleitkomponenten in die Schlacke (Birich et al. 2016). Das Material wird dabei bei hohen Temperaturen aufgeschmolzen bzw. verhüttet, wobei jedoch viele kritische Metalle verloren gehen. Nachteilig ist außerdem, dass beim Aufschmelzen des Ausgangsmaterials gefährliche Emissionen (insbesondere Dioxine und Halogenverbindungen) entstehen können (Khaliq et al. 2014). Für die Rückgewinnung möglichst vieler wertvoller Metalle müssen die erzeugten Fraktionen in der Regel durch hydro- und elektrochemische Prozesse weiter nachbehandelt werden, weshalb pyrometallurgische Verfahren hohe Investitionskosten in die Anlagen erforderlich machen.
- › Hydrometallurgische Prozesse spielen als Ergänzung und Alternative zur Pyrometallurgie eine immer wichtigere Rolle. Eingesetzt werden dabei verschiedene nasschemische Verfahren, wie z. B. das Laugen, die meist bei Raumtemperatur ablaufen und die unterschiedlichen Löslichkeiten von Metallionen ausnutzen (Birich et al. 2016; Khaliq et al. 2014). Diese Herangehensweise hat sich als besonders effektiv für komplexe Gemische mit geringen Konzentrationen an metallischen Wertkomponenten erwiesen. Darüber hinaus erlauben hydrometallurgische Verfahren die Rückgewinnung von bestimmten metallischen Komponenten wie Seltene Erden, die in der Regel bei pyrometallurgischen Techniken in den erzeugten Nebenfraktionen (u. a. Schlacke) stark verdünnt werden (Akcil et al. 2021; Binnemans et al. 2013). Trotz des geringen Energieverbrauchs sind hydrometallurgische Prozesse alles andere als umweltschonend, da große Mengen an Chemikalien eingesetzt und giftige, schwer aufzubereitende Abwässer erzeugt werden. Dadurch werden zusätzliche, kostenintensive Reinigungsstufen erforderlich, weshalb eine Anwendung im industriellen Maßstab derzeit noch schwierig ist (Akcil et al. 2021; Perez et al. 2019; Priya/Hait 2017).

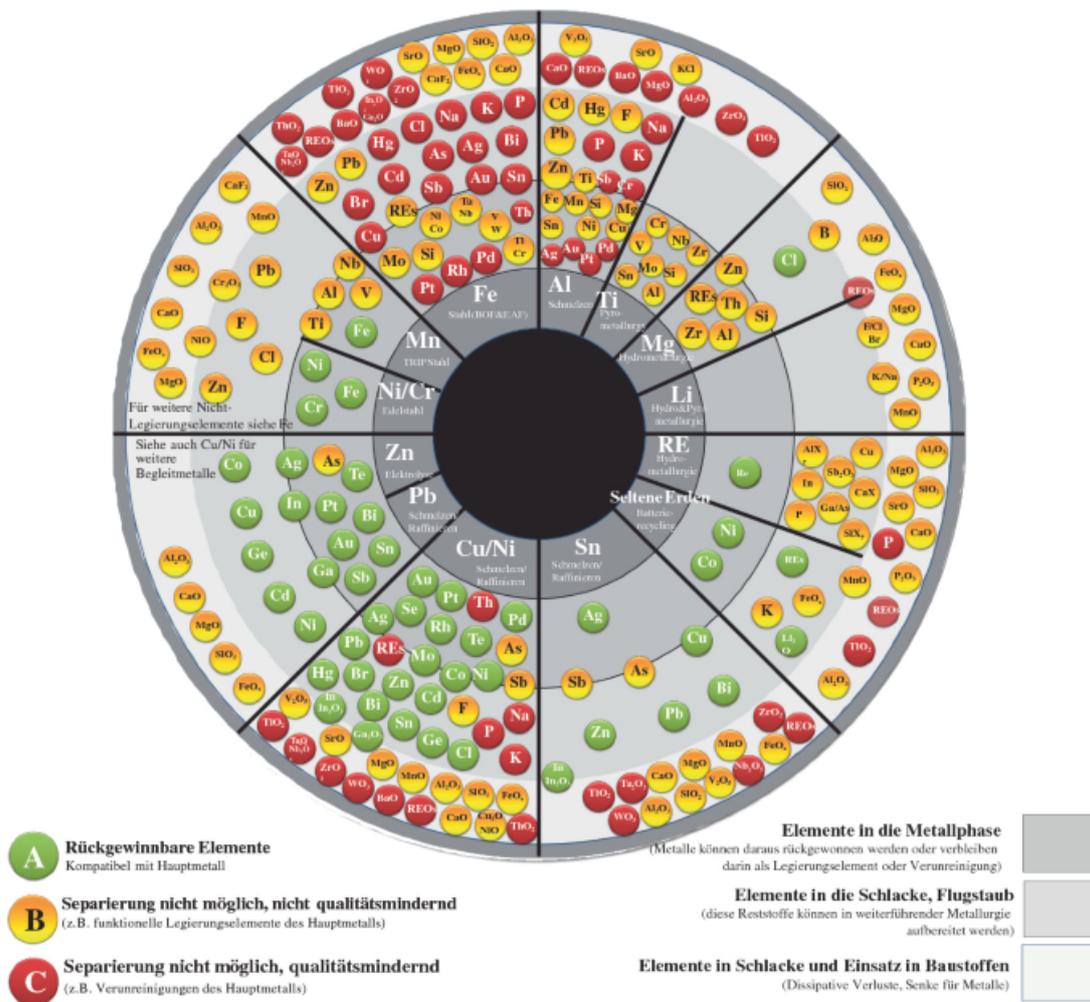
Für die Rückgewinnung von Metallen aus Elektroschrott sind technisches Know-how und Infrastrukturen im industriellen Maßstab erforderlich, über die nur wenige Unternehmen verfügen. Die dafür erforderlichen Verfahren, insbesondere die Pyrometallurgie, wurden ursprünglich für die Primärmetallgewinnung aus Erzen entwickelt. Diese bestehen in der Regel aus einem Hauptmetall (Kupfer, Eisen, Aluminium) und weiteren, deutlich geringer konzentrierten Nebenmetallen. Das hat zur Folge, dass die industriellen metallurgischen Prozesse auf bestimmte Hauptmetalle ausgerichtet sind und so optimiert wurden, dass jeweils möglichst viele Nebenmetalle zurückgewonnen werden können (Schäfer 2021, S. 38 f.).

Daraus ergeben sich verfahrenstechnische Restriktionen, denen auch das Metallrecycling unterworfen ist. So können bei der industriellen Aufbereitung bestimmter Hauptmetalle jeweils nur dazu kompatible Nebenmetalle recycelt werden – diese Abhängigkeiten bringt das Metallrad zum Ausdruck (Abb. 3.11; dazu und zum Folgenden Raatz et al. 2022a, S. 86; Schäfer 2021, S. 39). Metalle, die beim Recycling des jeweiligen Hauptmetalls (innerer Kreis) metallurgisch zurückgewonnen werden können, sind im Metallrad in der jeweiligen Sparte grün markiert. Gelb markierte Metalle/Komponenten können im Prozess nicht separiert werden; sie fungieren aber z. B. als Legierungselemente, welche die Qualität des rezyklierten Hauptmetalls nicht negativ beeinflussen und für bestimmte Anwendungen sogar von Vorteil sein können. Rot markierte Metalle hingegen verbleiben als qualitätsminderndes Legierungselement in der Metallphase (Downcycling) oder gehen im Prozess verloren (beispielsweise durch Verschlackung).⁶² Aufgrund der spezifisch ausgerichteten Aufbereitungsprozesse ist eine selektive Vorbehandlung und Sortierung des Elektroschrotts so wichtig. Als große Herausforderung verbleibt dabei allerdings die Vielfalt der Legierungselemente, die Metallen beigegeben wird, um deren Materialeigenschaften in gewünschter Weise zu beeinflussen.⁶³ Mit den vorhandenen Sortierverfahren lassen sich Metalle im Recyclingprozess noch nicht legierungsspezifisch trennen, was dann – obwohl Metalle grundsätzlich auch bei mehrfachem Recycling ihre Eigenschaften behalten – aufgrund der verbleibenden Legierungselemente häufig dennoch eine Qualitätsminderung des Metallrezyklats und/oder einen erhöhten Aufwand beim Recycling (z. B. durch die erforderliche Verdünnung der Störelemente) zur Folge hat (Raatz et al. 2022b, S. 25).

⁶² Das betrifft in der Kupferfraktion beispielsweise Seltene Erden, Zirkonium, Wolfram, Barium oder Titan

⁶³ So gibt es z. B. über 2.000 Stahlliegierungen. Als Legierungselemente finden nahezu alle Elemente des Periodensystems Anwendung (Raatz et al. 2022a, S. 63).

Abb. 3.11 Das Metallrad



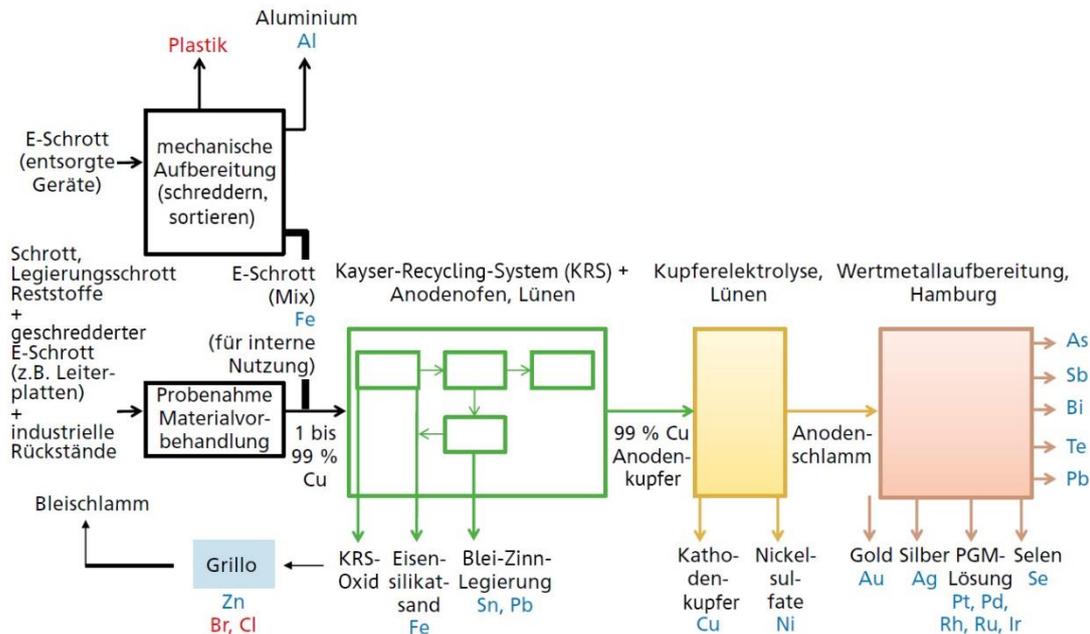
Quelle: Schäfer 2021, S.41, basierend auf UNEP 2013

Auf diese Weise haben sich im Metallrecycling verschiedene industrielle Aufbereitungsverfahren etabliert, die bei den wichtigsten Hauptmetallen Eisen/Stahl, Aluminium und Kupfer ansetzen (zu den Verfahren im Detail Raatz et al. 2022a, S. 83 ff.). Das Recycling ist in erster Linie eine wirtschaftliche Aktivität, die durch den Wert des zurückgewonnenen Materials, insbesondere der Hauptmetalle Eisen (Stahl), Aluminium und Kupfer, angetrieben wird; ein Standardverfahren dafür existiert nicht (Raatz et al. 2022a, S. 81). Immer wenn es einen wirtschaftlichen Anreiz gibt, versuchen die existierenden Hüttenwerke, neben den Hauptmetallen auch einige der wertvollen Begleitelemente wie Gold, Silber und Platin in der erforderlichen Qualität zurückzugewinnen (UNEP 2013, S. 112).

Die Kupferverhüttung ist für das Recycling von Elektroschrott von besonderer Bedeutung, nicht nur weil Kupfer eines der wichtigsten Basismetalle ist und etwa 40% des Kupferbedarfs in Deutschland durch Recycling gedeckt werden kann (GDB o.J.).⁶⁴ Sondern vor allem auch, weil durch das Kupferrecycling – wie Abbildung 3.11 zeigt – viele weitere Metalle, darunter etliche Edelmetalle (Gold, Silber, Palladium etc.) zurückgewonnen werden können.

⁶⁴ Kupferrecycling ist auch ökologisch vorteilhaft, da sich dadurch der Energieaufwand im Vergleich zur Kupfergewinnung aus Erzen um 80% reduzieren lässt und sich so maßgebliche Mengen CO₂ einsparen lassen (GDB o.J.).

Abb. 3.12 Verfahrensschema des Unternehmens Aurubis zur Multimetallgewinnung aus Kupferschrotten



Quelle: nach Nolte 2018, S. 301

Ein anderes wichtiges Trägermetall für das Multi-Metallrecycling ist Blei. Zusammen mit Kupfer erfüllt es in metallurgischen Recyclingprozessen sehr wichtige Funktionen, z. B. als Lösungsmittel für andere wertvolle Metalle, und ist für die Rückgewinnung kritischer Metalle unabdingbar. Dabei ist es je nach Unternehmen und vorhandener Infrastruktur möglich, in der gesamten Prozesskette eine unterschiedliche Anzahl an Metallen zu berücksichtigen. Beispielsweise werden durch das belgische Unternehmen Umicore insgesamt 17 (Ebin/Isik 2016) und bei Aurubis in Deutschland 19 metallische Komponenten (Nolte 2018) recycelt. Die Anlagen von Aurubis vereinen pyro- und hydrometallurgische Verfahren und sind weltweit technisch führend. Das Verfahren ist in Abbildung 3.12 schematisch dargestellt. Herzstück ist das Kayser-Recycling-System in Lünen (ausgestattet mit einem 13 m hohen Badschmelzofen), das besonders für geringere Metallgehalte und komplexe Materialien wie Elektro- und Elektronikschrotte geeignet ist (Aurubis o.J.). Nach einer Vorbehandlung wird das Material im Badschmelzofen eingeschmolzen, dabei entstehen Rohkupfer (99 % Reinheit), Eisensilikatsand sowie Zinn-Blei-Schlacke, die zu einer Zinn-Blei-Legierung weiterverarbeitet wird. Das Rohkupfer wird anschließend elektrolytisch raffiniert. Der dabei entstandene Anodenschlamm wird schließlich in Anlagen in Hamburg pyro- sowie hydrometallurgisch aufbereitet, wobei wertvolle Edel- und Begleitmetalle gewonnen werden (Aurubis 2021).

Optimierung und Innovation der Verfahren

Für eine verbesserte Ausbeute an wertvollen Metallen muss bereits am Anfang des Recyclingprozesses angesetzt werden, indem durch Innovation der Demontage- und Sortiertechnologien eine möglichst sortenreine, metallurgisch kompatible Trennung der Metallfraktionen erreicht wird (Schäfer 2021; zum Folgenden Raatz et al. 2022a, S. 127 ff.):

- › Heute werden wertvolle, aber komplex zusammengesetzte Bauteile wie Leiterplatten vor der mechanischen Zerkleinerung selektiv entnommen und aufwendig manuell demontiert (UBA o.J.f). Mechanisch lassen sich EAG kaum zerstörungsfrei demontieren, was Materialverluste und komplexe Stoffgemische zur Folge hat. Zwar gibt es Forschungsaktivitäten zur Automatisierung der Demontageprozesse, aber aufgrund der Vielfalt und Variabilität der Produkte sowie von Beschädigungen der Altgeräte sind automatisierte Demontagesysteme bislang nur sehr eingeschränkt umsetzbar (Jungbluth et al. 2016). Vorreiterin ist die Firma Apple, die

mithilfe des extra dafür entwickelten Roboters »Daisy«⁶⁵ zurückgenommene EAG vollautomatisiert demonstriert, um möglichst viele Sekundärrohstoffe zurückzugewinnen zu können (Scheyder/Nellis 2020). Zunehmend findet man in der Literatur auch Hinweise auf Entwicklungen zur automatischen Demontage von Batterien. Beispielsweise hatte das kürzlich abgeschlossene Verbundforschungsprojekt »Industrielle Demontage von Batterien« (DeMoBat; Laufzeit 2019–2022) zum Ziel, die Machbarkeit automatisierter Demontage von Batteriemodulen und E-Antriebsaggregaten zu demonstrieren (Fraunhofer IPA o.J.). Die Herausforderung ist auch hier, dass Batterien und ihre Bestandteile nicht genormt sind, sodass ein Demontagesystem sehr flexibel agieren muss (Gerlitz et al. 2021). Um die Demontage verbessern zu können, muss also vor allem beim Produktdesign angesetzt werden (Kap. 3.2.3).

- › Die Gewinnung von möglichst sortenreinem Schrott, insbesondere in Bezug auf die entsprechenden Legierungselemente, ist für ein hochwertiges Recycling eine Grundvoraussetzung. Mit den derzeit am Markt und in der Industrie befindlichen Sortier- und Trennverfahren ist das nur sehr eingeschränkt möglich. Im Projekt »OptiMet« (Raatz et al. 2022b) wurde darum untersucht, welche Analyse- bzw. Sortierverfahren (in Kombination mit vor- oder nachgelagerten Trennverfahren wie Magnetscheidung, Wirbelschicht, Druckluft etc.) eine legierungsspezifische Trennung gemischter EAG-Schrottfractionen ermöglichen. Dafür wurden verschiedene am Markt befindliche analytische Messmethoden (Kamera-/Sensorsysteme etc.) und deren Kombinationen miteinander verglichen.⁶⁶ Im Ergebnis zeigte sich, dass keine Analysemethode für alle Legierungsarten geeignet ist und »sich die Auswahl der Messmethode nach den zu bestimmenden Legierungselementen bzw. Störstoffen und der Legierungsart« zu richten hat (Raatz et al. 2022b, S. 201). Deshalb werden vor allem auch bessere Daten zur Zusammensetzung und Recyclingfähigkeit von Produkten (z. B. in Form eines digitalen Produktpasses) sowie zu legierungsspezifischen Stoffströmen benötigt (Raatz et al. 2022b, S. 27).

Bei der nachgelagerten Weiterverarbeitung bestehen ebenfalls große Optimierungspotenziale (dazu und zum Folgenden Raatz et al. 2022a, S. 134 f.). Dies betrifft zum einen den hohen Energie- und Chemikalienbedarf der etablierten metallurgischen Verfahren. Im Bereich der Pyrometallurgie geht es darum, kohlenstoff- durch wasserstoffbasierte Reduktionsprozesse zu ersetzen, Strom aus erneuerbaren Energien in Elektroöfenprozessen einzusetzen und primäre fossile Energieträger durch biomassebasierte Kokse zu substituieren. Bei der Hydrometallurgie steht die Reduzierung des Frischwasserverbrauchs und der Abwassermengen sowie die Reduzierung einzusetzender Chemikalienmengen und der Ersatz bestimmter Chemikalien durch umweltfreundlichere Alternativen im Fokus. Solche Bestrebungen zu mehr Nachhaltigkeit dürften jedoch die Kosten der Recyclingprozesse erhöhen (und letztlich auch den Preis der rezyklierten Metalle; Siebel 2022), sodass eine energieeffiziente Prozessführung eine wichtige Rolle in der Gestaltung innovativer Recyclingprozessketten spielt. Zahlreiche Studien weisen zwar darauf hin, dass das Recycling von Massenmetallen wie Aluminium, Kupfer, Eisen etc. deutlich weniger energieaufwendig ist als deren primäre Gewinnung (Schäfer 2021, S. 21). Da der Sortier- und Trenaufwand dabei jedoch nicht einberechnet ist, ist unklar, ob dies auch für die nur sehr gering konzentrierten und schwierig zu gewinnenden kritischen Metalle gilt. Zum anderen sind auch innovative Aufbereitungsverfahren weiter zu erforschen, die im Metallrecycling bislang noch nicht großtechnisch umgesetzt werden, für die spezifische Rückgewinnung kritischer Metalle perspektivisch jedoch vielversprechende Möglichkeiten bieten könnten. Dazu gehören etwa die Flotation⁶⁷ (EU-Recycling 2019), die Biohydrometallurgie⁶⁸ (Schippers/Hedrich 2018; Tanne/Schippers 2020) oder die Phagen-Display-Methode, bei der mithilfe von Bakteriophagen angefertigte Peptide für das Metallrecycling genutzt werden (HZDR 2018). Für die Entwicklung und technische Optimierung dieser neuen Verarbeitungstechnologien sind allerdings noch erhebliche Forschungsanstrengungen zu leisten.⁶⁹

⁶⁵ »Daisy« – der bislang an zwei Standorten installiert wurde – schafft es, 200 iPhones pro Stunde kleinteilig zu zerlegen, sodass insgesamt 14 Metalle recycelt werden können (Scheyder/Nellis 2020).

⁶⁶ Zum Einsatz kamen die Analysemethoden Röntgenfluoreszenzspektroskopie (XRF), Röntgentransmissionsanalyse (XRT), laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS) und Neutronenaktivierungsanalyse (NAA).

⁶⁷ Die Schaumflotation wird in der Montanindustrie weltweit eingesetzt, um aus Erzen wertvolle Rohstoffe zu gewinnen. Zukünftig könnte das Verfahren, bei dem feingemahlene, in einer Flüssigkeit verteilte Partikel mittels zugeführter Gasblasen abgetrennt werden, auch in der Sekundärrohstoffgewinnung an Bedeutung gewinnen (Raatz et al. 2022a, S. 130 f.). Werden dabei zusätzlich Mikroorganismen eingesetzt, werden die Verfahren als Bioflotation bezeichnet (HZDR o.J.).

⁶⁸ In der Biohydrometallurgie werden spezialisierte Mikroorganismen eingesetzt, um Metalle in einer vorwiegend wässrigen Umgebung aus Feststoffen zu gewinnen (z. B. Biolaugung). Die eingesetzten Verfahren, die ökologisch vorteilhafter sind als die herkömmliche Hydrometallurgie (die auf chemischen Verfahren beruht), könnte perspektivisch auch für die Behandlung von Elektroschrott zum Einsatz kommen (Raatz et al. 2022a, S. 121 ff.).

⁶⁹ Mit dem Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF) verfügt Deutschland über eine der weltweit führenden Forschungseinrichtungen in diesem Bereich.

3.2.3 Herausforderungen und Perspektiven

Bei der bisherigen Behandlung von Elektroaltgeräten beschränkt sich das Recycling im Wesentlichen auf die leicht rückgewinnbaren Massenmetalle Eisen/Stahl, Kupfer und Aluminium sowie auf die Edelmetalle (dazu und zum Folgenden Raatz et al. 2022a, S. 62 ff.).⁷⁰ Der (aufgrund der volatilen Marktpreise) schwankende Wertstoffanteil dieser Metalle bildet die hauptsächliche wirtschaftliche Triebkraft für das Multimetallrecycling, das insbesondere für die Rückgewinnung von Nichteisenmetallen verfahrenstechnisch äußerst aufwendig ist. Benötigt werden neben metallurgischem Knowhow und den entsprechenden Infrastrukturen auch bestimmte Prozessmetalle wie Zink oder Blei.⁷¹ Dass der Anteil von Edelmetallen in neuen Produkten, wie zuvor bereits dargestellt, seit Jahren aufgrund deren Miniaturisierung stetig abnimmt, macht das Recycling und die Investition in Recyclinganlagen ökonomisch unattraktiver. Zudem stößt das möglichst vollständige Recycling von Elektroschrott mit den derzeit bestehenden Verfahren aus verschiedenen anderen Gründen an Grenzen (Reuter 2018; zum Folgenden Raatz et al. 2022a, S. 62 f.):

- Elektrogeräte beinhalten häufig Bauelemente/-komponenten, die aus mehreren miteinander verbundenen Werkstoffen bestehen und so verarbeitet wurden, dass sie einen schwer trennbaren Verbund darstellen. Solche Verbundwerkstoffe, wie z. B. Leiterplatten, sind äußerst schwierig zu recyceln, da die Materialien nur mit sehr aufwendigen Verfahren in ihre ursprüngliche Struktur und Qualität zurückgeführt werden können (Qiu et al. 2020). Eine vollständige Demontage von EAG ist mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand kaum zu leisten.
- Die prozessbedingt resultierenden Gemische können in den nachgeschalteten metallurgischen Prozessen aus thermodynamischen, technischen und/oder ökonomischen Gründen in der Regel nicht vollständig in ihre Bestandteile getrennt werden. Vor allem die sehr gering konzentrierten kritischen Metalle gehen überwiegend in den anderen Trennfractionen – z. B. in den Aufbereitungsrückständen wie der Schredderleichtfraktion – dissipativ verloren (Rotter et al. 2013). Zudem gibt es im konventionellen pyrometallurgischen Prozess immer Verluste und bei komplex verbundenen Materialien Zielkonflikte, die eine Rückgewinnung eines Metalls nur auf Kosten des Verlusts eines anderen Metalls ermöglichen. Dieses geht dann beispielsweise in die Schlacke über, die dann häufig als Abfallprodukt entsorgt wird oder im Straßenbau Verwendung findet.
- Bei vielen kritischen Metallen, die in Verbindungen (z. B. als Legierungselement) genutzt werden, kann die Energie, die für ihre vollständige Abtrennung im Rahmen eines metallurgischen Prozesses erforderlich wäre, erheblich höher sein als die Energie, die für die Neuproduktion der Metalle aus Primärrohstoffen benötigt wird. Wesentlich sinnvoller ist es also, bereits vor der metallurgischen Weiterverarbeitung möglichst sortenrein bzw. in engen Fraktionen mit Blick auf die Ziellegierung zu sortieren.

Für die bessere Rückgewinnung seltener Metalle aus komplex zusammengesetztem Elektronikschrott sind vor allem innovative Lösungen bei Demontageprozessen sowie bei Sortier- und Trennverfahren gefragt (Kap. 3.2.2), um möglichst sortenreine Abfallfraktionen zu erhalten. Zu beachten ist, dass für die Umsetzung entsprechender Prozessinnovationen im industriellen Maßstab größere Investitionen erforderlich sind. Um ein gewisses Maß an Investitionssicherheit zu schaffen, wäre die EU-weite Vereinheitlichung von Recyclingverfahren und dazu gehöriger Standards angeraten. Aktuell bestehen innerhalb der EU erhebliche Unterschiede in der Prozessqualität des Recyclings hinsichtlich der Rückgewinnung und Qualität des Rezyklates, der Wiederverwendung, Schadstoffentfrachtung, Prozessemissionen, Sicherheits- und Umweltstandards sowie dem Vollzug der Abfallgesetzgebung (Raatz et al. 2022a, S. 116 f.). Dadurch kommt es zu Abflüssen von Elektroschrott in Länder mit weniger guten Verfahrensstandards, wodurch sich Investitionen für die Recyclingunternehmen kaum lohnen und wichtige Wertstoffe nicht nur dem heimischen Markt, sondern prinzipiell verloren gehen.

⁷⁰ Bei Aluminium (Anteil sekundärer Vorstoffe an der Produktion: 53%), Rohstahl (45%) und Kupfer (38%) trägt das Recycling insgesamt bereits maßgeblich zur Rohstoffversorgung bei (Bookhagen et al. 2022, S. 19).

⁷¹ Blei stellt ein wichtiges Lösungsmittel im metallurgischen Prozess dar, gilt aber auch als gesundheitsschädlich und wurde von der European Chemical Agency (ECHA) bereits 2018 im Rahmen der REACH-Verordnung in die Kandidatenliste der Stoffe mit sehr hoher Bedenklichkeit aufgenommen. Nun plant die ECHA (o.J.a) auch eine Zulassungspflicht. Dies sollte nicht dazu führen, dass Blei als Prozessmetall in der Metallurgie verloren geht, da dies hätte weitreichende Auswirkungen auf die Recyclingindustrie und die Rückgewinnung von Metallen aus Elektroschrott hätte (Reuter 2018).

Die Verbesserung der Recyclingprozesse ist für sich alleine genommen aber nicht ausreichend, um die Rückgewinnungsquoten metallischer Wertstoffe zu erhöhen. Vielmehr müssen sie Hand in Hand gehen mit Verbesserungen bei Produktgestaltung und -information (Design für Recycling) sowie bei den Sammelsystemen.

Design für Recycling

Eine große Hürde für das Recycling von EAG stellt deren zunehmend kleinteiliger, komplexer Aufbau dar. Die Verwendung von Verbundwerkstoffen oder schadstoffbelasteter Materialien, das Verkleben der Akkus und Materialverbindungen erschweren ein fachgerechtes Recycling und die Rückgewinnung vieler Wertstoffe maßgeblich. Eine vollständige Demontage, obwohl aus Recyclingsicht eigentlich erwünscht, ist aktuell bei vielen Produkten ökonomisch kaum sinnvoll machbar (Kölking et al. 2020). Das gezielte Mitdenken des Recyclings bereits bei Design und Konstruktion des Produkts, auch als Design für Recycling bezeichnet, ist deshalb bei Elektro- und Elektronikgeräten essenziell, um den Recyclingprozess effizient und qualitativ hochwertig gestalten zu können (dazu und zum Folgenden Raatz et al. 2022a, S. 114). Dazu zählen eine modulare Gerätebauweise, die nicht nur eine leichte und automatisierte Demontage ermöglicht (und damit eine bessere Rückgewinnung z. B. der kritischen Metalle), sondern auch die Reparierbarkeit und Wiedernutzung von Einzelteilen; wichtig sind auch die Trennfähigkeit der Komponentenverbindungen (gesteckt statt geklebt) sowie die Berücksichtigung recyclingfähiger Materialien. Letzteres schließt ein, dass Produkte aus möglichst wenigen Legierungsarten bzw. nicht stoffbelasteten Metallen bestehen, was die sortenreine Trennung vereinfacht und die Verluste an Begleitelementen im pyrometallurgischen Prozess reduziert.

Derzeit besteht für die Hersteller von Elektrogeräten kein ausreichender Anreiz, die erhöhten Entwicklungs- und Produktionskosten eines Designs für Recycling auf sich zu nehmen, da vom resultierenden Nutzen nur die Recyclingunternehmen profitieren. Elektronische Produkte, die konsequent nach Kriterien einer demontage- und recyclingfreundlichen Konstruktion gestaltet wurden, sind entsprechend noch die große Ausnahme.⁷² Dass dies auch für andere Produktbereiche gilt, macht eine Onlineumfrage unter 79 produzierenden Industrieunternehmen deutlich (davon 12 aus dem Bereich Elektrik/Elektronik/Multimedia) (Hansen/Seelig o.J.). Lediglich 13 % der befragten Unternehmen weisen dem Thema eine hohe Bedeutung zu und 39 % gaben an, dass im Konstruktionsprozess das Recycling nicht berücksichtigt wird.

Verpflichtende Vorgaben zur Produktgestaltung von Elektro- und Elektronikgeräten, welche die Recyclingfähigkeit betreffen, gibt es bislang noch nicht. Das wird sich jedoch voraussichtlich zukünftig mit der neuen Ökodesign-Verordnung (EK o.J.a) ändern, welche laut Plan der EU-Kommission die Ökodesign-Richtlinie ersetzen soll (Kap. 2.2.2). Die Ökodesign-Verordnung soll alle auf dem EU-Binnenmarkt gehandelten Produkte umfassen und den rechtlichen Rahmen schaffen, dass Vorgaben beispielsweise hinsichtlich Reparierbarkeit, Recyclingfähigkeit und Wiederverwendbarkeit, aber auch zum Einsatz von recyceltem Material gemacht werden können (EK 2022b, S. 5; EU-Recycling 2022).⁷³ In der Verordnung selbst sind dazu keine konkreten Anforderungen enthalten, dies soll zu einem späteren Zeitpunkt durch spezifische Produktverordnungen geschehen. Wie konkret die Vorgaben zur Recyclingfähigkeit von Elektro- und Elektronikgeräten ausfallen werden, bleibt also vorerst abzuwarten. Für Deutschland böte sich hier ein Gelegenheitsfenster, um auf möglichst ambitionierte Anforderungen hinzuwirken.

Die Einführung eines digitalen Produktpasses ist ebenfalls Teil der geplanten Ökodesign-Verordnung (EK 2022b, S. 6). Auch hier ist die konkrete Umsetzung noch offen. So könnte der digitale Produktpass produktspezifische Angaben zu »Herkunft, Zusammensetzung, Umweltdaten, Reparatur- und Demontagemöglichkeiten sowie [zur] Handhabung am Ende der Lebenszeit« enthalten; diese Daten werden digital gespeichert (z. B. in einer zentralen Datenbank) und könnten per Internet abrufbar sein (Dost et al. 2022). Gerade bei Elektro- und Elektronikgeräten, die besonders komplex und heterogen aufgebaut sind, sind umfassende Produktinformationen, die entlang der gesamten Wertschöpfungskette transparent und nachverfolgbar weitergegeben werden, für die Zirkularität besonders wichtig. Sie können zum einen Konsument/innen dabei helfen, ihre Kaufentscheidungen auf einer besseren Grundlage zu treffen, sie unterstützen zum anderen aber auch das fachgerechte Recycling, indem eingesetzte Materialien, Informationen zum Aufbau und zur fachgerechten Demontage (inklusive Demontagepläne)

⁷² Beispiele sind das Fairphone aus den Niederlanden (<https://www.fairphone.com/de/>; 24.1.2024) oder das Shiftphone eines deutschen Herstellers (<https://www.shiftphones.com/>; 24.1.2024) (Raatz et al. 2022a, S. 107 ff.).

⁷³ Die neue Verordnung wurde Ende März 2022 von der EU-Kommission veröffentlicht und befindet sich aktuell im ordentlichen Gesetzgebungsverfahren.

offengelegt werden. Als Vorbild für die Erfassung der Materialzusammensetzung von EAG könnte das Internationale Materialdatensystem (IMDS) der Automobilindustrie dienen, das die Zusammensetzung von Bauteilen und Werkstoffen auf globaler Ebene standardisiert.⁷⁴

Sammlung

Die Ressourceneffizienz einer Kreislaufwirtschaft ist maßgeblich davon abhängig, inwiefern es gelingt, die entsorgten Produkte über geeignete Sammelsysteme im Kreislauf zu halten. In Deutschland finden sich nur knapp 45 % des Elektroschrotts in den dafür vorgesehenen Sammelsystemen, mehr als die Hälfte wird anderweitig entsorgt und geht somit dem Recycling verloren. Von der Zielmarke für die Mindesterfassungsquote von 65 % ist Deutschland damit weit entfernt und liegt im Vergleich der EU-Staaten im hinteren Mittelfeld (EUWID 2022d). Die Gründe dafür sind vielfältig und liegen zum einen in Informationsdefiziten der Verbraucher/innen, wie Befragungen der (stiftung ear 2021a u. 2021b) zeigen. Noch zu häufig mangelt es an konkretem Wissen, wie beispielsweise eine kaputte elektrische Zahnbürste oder Möbel mit elektronischen Komponenten korrekt zu entsorgen sind, die sich dann als Fehlwurf im Rest- oder Sperrmüll finden (Raatz et al. 2022a, S. 124). Zum anderen ist das als Bringsystem organisierte Sammelsystem für viele Verbraucher/innen offenbar zu umständlich. Darauf deutet die Umfrage der Bitkom (2022) hin, in der die Hälfte der Befragten angibt, die Entsorgung von IT-Altgeräten oft als zu aufwendig zu empfinden.

Um die Sammelziele zukünftig in Reichweite zu bringen, sind die bestehenden Sammelsysteme noch deutlich zu optimieren. Auf EU-Ebene ist geplant, gemäß EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft (EK 2020a, S. 8), die Einrichtung eines EU-weiten Rücknahmesystems für alte Mobiltelefone, Tablets und Ladegeräte zu prüfen. Neben einer verbesserten Information der Bevölkerung, der Schaffung weiterer, gut erreichbarer und ausgeschilderter Rückgabemöglichkeiten⁷⁵ wäre vor allem wichtig, stärkere Anreize für die fachgerechte Entsorgung zu setzen. Infrage kommen hierfür vor allem Pfandsysteme, ein Instrument, das sich u. a. bei PET-Flaschen bereits bewährt hat. Dabei würde beim Kauf eines Elektrogeräts ein Pfand erhoben, das bei Rückgabe am Ende der Nutzungsdauer zurückerstattet wird (Kap. 4.2.2). Die Einführung neuer Pfandpflichten für Elektrogeräte wird schon über Jahre politisch diskutiert (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2022, S. 40). Bereits 2012 wurde vom Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU 2012, S. 88 f.) ein Pfandsystem für Mobiltelefone vorgeschlagen, allerdings sind daraus bisher keine konkreten Gesetzesvorhaben entstanden. Hinsichtlich der konkreten Ausgestaltung gäbe es noch etliche offene Fragen zu klären wie beispielsweise die Wahl der optimalen Pfandhöhe oder die Verteilung von Nutzen und Kosten (Wilts 2020). Für die Einführung eines Pfandsystems auf Elektro- und Elektronikkleingeräte wäre eine Anpassung des ElektroG notwendig (Ostertag et al. 2021, S. 168). Der administrative Aufwand zur Umsetzung wäre im Vergleich zu etablierten Pfandsystemen wie beispielsweise für Getränkeverpackungen und Autobatterien recht groß, weil es sich bei EAG um eine deutlich heterogenere Produktgruppe handelt und der hohe Pfandanspruch eine individuelle Erfassung des Pfandgegenstands nötig machen würde (Ostertag et al. 2021, S. 169). Eine Alternative zum Pfand wäre die Einführung einer vorgezogenen Recyclinggebühr nach Vorbild der Schweiz, die als Best-Practice-Beispiel dienen kann, jedoch in Deutschland schwierig umzusetzen wäre (Kasten 3.7).

Kasten 3.7 Vorgezogene Recyclinggebühr (Schweiz)

Die vorgezogene Recyclinggebühr wird in der Schweiz beim Kauf von Elektro- und Elektronikgeräten erhoben, um darüber die Sammlung (Sammelstellen und Rücknahmelogistik), Demontage und das Recycling von EAG zu finanzieren. Die Höhe der Gebühr wird jährlich festgelegt und ist abhängig vom Gerät. Händler und Hersteller sind im Gegenzug verpflichtet, elektrische und elektronische Geräte, die ihrem Sortiment ähneln, kostenlos anzunehmen und einem fachgerechten Recycling zuzuführen. Dabei spielt es keine Rolle, wo das

⁷⁴ <https://www.mdsystem.com/imdsnt/startpage/index.jsp> (24.1.2024)

⁷⁵ Mit der Novelle des ElektroG besteht seit dem 1. Juli 2022 zwar die Möglichkeit, Elektrogeräte auch in vielen Supermärkten und Discountern zurückzugeben, wodurch 25.000 neue Rückgabestellen geschaffen wurden. Erste Bewertungen zeigen jedoch, dass der Service bislang nur wenig genutzt wird, was teilweise auch mit fehlenden Hinweisen und einer verbraucherunfreundlichen Ausgestaltung (z. B. Rückgabe nur an der Kasse möglich) zu tun haben könnte (EUWID 2022e). Vorgeschriebene Sammelboxen in Sichtweite der Kasse im Handel oder auch aufgestellte Container in Wohngebieten – wie in Schweden oder Norwegen üblich, die eine Sammelquote von über 50 % erreichen (EUWID 2022d) – könnte die Sammlung verbessern (Raatz et al. 2022a, S. 118).

Gerät ursprünglich erworben wurde. Der Großteil der Rückgaben (ca. 85%) erfolgt über kommunale Sammelstellen, in denen außer dem Hausmüll bzw. Restmüll alle Sorten Müll entsorgt werden und die entsprechend regelmäßig von Konsument/innen besucht werden – anders als in Deutschland ist die Entsorgung von EAG in der Schweiz somit in die bestehenden Bringsysteme integriert und im Alltag etabliert. Bei der EAG-Sammelquote ist die Schweiz mit 95% weltweit führend (ZfK 2022).

Das kollektive Sammelsystem nach Schweizer Vorbild ist nur bedingt auf Deutschland übertragbar. Eine Umstellung des bisherigen, von der stiftung ear koordinierten, dezentralen Sammelsystems wäre sehr aufwendig und aufgrund der veränderten Marktsituation durch den zunehmenden Onlinehandel wahrscheinlich nicht effektiv. Unabhängig davon zeigt das Schweizer Beispiel, wie wichtig hohe Transparenz und Aufklärung zu Recyclingsystemen und Sammelstellen bei den Verbraucher/innen ist. So gibt es in der Schweiz umfangreiche Informations- und Bildungsprogramme zur Mülltrennung im Allgemeinen und in Hinblick auf die Entsorgung von EAG im Speziellen. Diese Aufklärung beginnt bereits in der 1. Klasse und führt zu einer traditionell hohen Aufklärung zur Mülltrennung, mit entsprechend positiven Auswirkungen auf die Sammelquote. Auch die vorgezogene Recyclinggebühr führt zu einer Bewusstseinsbildung in der Bevölkerung für die Entsorgungskosten und damit den Wert von Recycling (Ylä-Mella/Román 2019), sofern der Aufschlag auf den Produktpreis ausgewiesen wird (z. B. auf der Rechnung oder Quittung, was zwar empfohlen wird, aber nicht verpflichtend ist).

Quelle: Hinzmann et al. 2022, S. 67 ff.

3.3 Mineralische Bauabfälle

Die Bauindustrie, die Kiese, Sande, Naturstein oder Gips in enorm großen Mengen benötigt, gehört zu den rohstoffintensivsten Branchen überhaupt. Solche nicht metallischen Mineralien (oder Baumineralien) machen weltweit etwa die Hälfte der geförderten Rohstoffe aus und etwa zwei Drittel davon werden von der Bau- oder Baustoffindustrie benötigt (IRP 2017, S. 28; Lutter et al. 2022, S. 59). Ein wichtiger Einsatzbereich ist die Verwendung als Zuschlagsstoff bei der Zement- und Betonherstellung,⁷⁶ bei der nicht nur erhebliche Mengen an mineralischen Rohstoffen verbraucht, sondern zudem hohe CO₂-Emissionen freigesetzt werden.⁷⁷ Daneben bringt der hohe Ressourcenbedarf des Bauens auch schädliche Umweltauswirkungen mit sich, die beim Abbau der mineralischen Baustoffe aus natürlichen Lagerstätten entstehen können (z. B. Absenkung des Grundwasserspiegels, Flächenverbrauch, Zerstörung von Ökosystemen, Verlust des Küstenschutzes) (Lutter et al. 2022, S. 23).

In Deutschland werden jährlich etwa 500 Mio. t Rohstoffe für Errichtung, Erhalt und Umbau von Gebäuden und Infrastrukturen eingesetzt, was 38% des Rohstoffkonsums entspricht (Lutter et al. 2022, S. 59). Dem stehen über 200 Mio. t mineralische Bauabfälle gegenüber, die bei Bautätigkeiten anfallen. Sie stellen mengenmäßig die größte Abfallgruppe dar (UBA o.J.n). Knapp 90% davon werden zwar verwertet, jedoch meist nur in relativ minderwertiger Form durch Einsatz im Straßen- oder Erdbau (Muchow et al. 2022, S. 6). Trotz der hohen Verwertungsquote gelang es insofern noch nicht in ausreichendem Maß, durch Recycling mineralischer Bauabfälle den primären Rohstoffbedarf des Bausektors und mithin auch dessen hohen ökologischen Fußabdruck zu senken. Die Potenziale, die sich hier für eine hochwertige Kreislaufwirtschaft bieten, sind angesichts der riesigen Rohstoffmengen, die in Gebäuden und Infrastrukturen gebunden sind (auch anthropogenes Lager genannt), sehr groß. Laut einer Schätzung umfasste das anthropogene Lager in Deutschland 2010 Materialmengen im Umfang von rund 52 Mrd. t. Jedes Jahr kommen ca. 820 Mio. t hinzu (Lutter et al. 2022, S. 42; Schiller et al. 2015).

Die verstärkte Nutzung mineralischer Sekundärrohstoffe ist nicht nur aus Umweltsicht geboten, auch wirtschaftliche Gründe sprechen dafür. Zwar muss – anders als etwa bei kritischen Metallen (Kap. 3.2) – nur ein geringer Anteil des Bedarfs an Baumineralien über den Import abgedeckt werden (2015: 15 Mio. t; UBA o.J.h). Deutschlands insgesamt ausreichende Vorkommen an Baumineralien sind jedoch regional ungleich verteilt, so dass es lokal zu Knappheiten kommen kann. Das bedeutet, dass Rohstoffe wie Kies oder Sand in einzelnen Regionen zum Teil importiert oder von weither angeliefert werden müssen, was die Kosten erhöht (Grimm 2018;

⁷⁶ Der Massenbaustoff Beton, der zu etwa zwei Dritteln aus Sand und Kies besteht, ist das weltweit am meisten hergestellte Material (TAB 2022, S. 199).

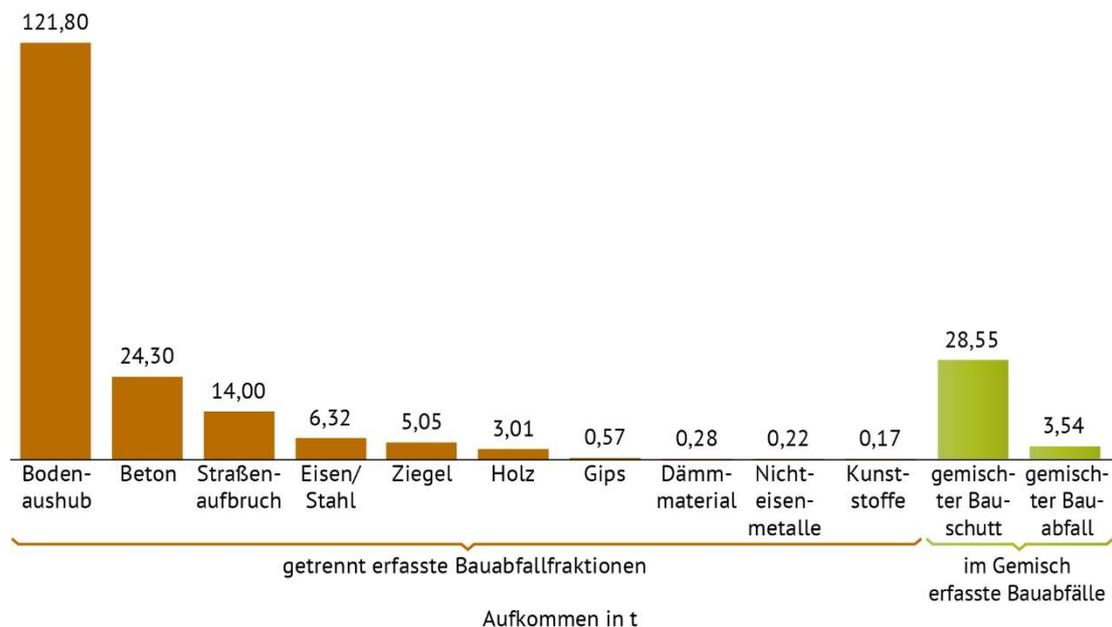
⁷⁷ Laut Schätzungen ist die globale Zementindustrie für etwa 8% der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich – mit steigender Tendenz, da der weltweite Verbrauch an Beton kontinuierlich zunimmt (WWF Deutschland 2019, S. 8).

Lutter et al. 2022, S.23). Hinzu kommen die steigenden Entsorgungskosten für Bauabfälle (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S.6). Für die Entsorgung etwa von Bodenaushub müssen in einzelnen Regionen Transportstrecken von mehreren hundert Kilometern gefahren werden, um die Böden einer Deponie zuzuführen oder in Gruben, Tagebauen etc. zu verfüllen. Das Rohstoffpotenzial der Bauabfälle geht so verloren. Mit einer zielgerechten Aufbereitung könnten stattdessen Steine, Sande, Lehme und Tone gewonnen werden, die beispielsweise in der Beton-, Ziegel- oder Lehmbauindustrie benötigt werden.

3.3.1 Stoffströme und Rahmenbedingungen

Bauabfälle entstehen bei Neu- und Umbau, Sanierung und Rückbau von Bauwerken. Da im Gebäudebestand unterschiedlichste Materialien verbaut sind und vor allem beim Neubau zusätzlich auch Bodenaushub in großen Mengen anfällt, haben Bauabfälle eine außerordentlich heterogene Zusammensetzung. Insgesamt machen Bau- und Abbruchabfälle rund 55 % der Gesamtabfallmenge Deutschlands aus (UBA o.J.b) und sind damit die größte Abfallgruppe überhaupt. Mineralische Fraktionen – vor allem Bodenaushub, aus dem sich mehr als die Hälfte des gesamten Aufkommens von Bauabfällen zusammensetzt, aber auch Beton, gemischter Bauschutt und Straßenaufbruch – bilden dabei den Löwenanteil (Abb. 3.13). Die Verwertungsquote dieser Abfälle liegt seit Jahren auf einem konstant hohen Niveau bei rund 90 % (Initiative Kreislaufwirtschaft Bau 2021). Die EU-Vorgabe von 70 % (ohne Bodenaushub) – festgelegt in der Abfallrahmenrichtlinie und im § 14 KrWG, das deren Zielvorgaben in nationales Recht umsetzt – wird somit weit übertroffen. Dass dies jedoch auch nicht besonders hochwertige Verwertungswege umfassen kann, wie z. B. Verfüllungen oder einfachere Erdbauarbeiten im Straßenbau, wird im Folgenden aufgezeigt. Erst wird der gültige Rechtsrahmen zum Umgang mit Bauabfällen beschrieben, anschließend werden Aufkommen und Entsorgungswege für verschiedene mineralische Bauabfallfraktionen detailliert dargelegt.

Abb. 3.13 Aufkommen der Bauabfallfraktionen in Deutschland (2019)



Quelle: nach Muchow et al. 2022, S.9

Rechtliche Rahmenbedingungen zum Umgang mit Bauabfällen

Die im KrWG festgelegten Prioritäten bei der Abfallentsorgung (Vermeidung hat Vorrang vor stofflicher und diese wiederum vor thermischer Verwertung, Beseitigung als letzte Option) gelten auch für Bauabfälle. Konkretisiert werden die Vorschriften zum Umgang mit Bau- und Abbruchabfällen in der Gewerbeabfallverordnung

(GewAbfV)⁷⁸, die die GewAbfV von 2002 ersetzt und seither u. a. neue, erweiterte Vorgaben hinsichtlich Getrennthaltungs- und Dokumentationspflichten enthält. Oberstes Ziel der GewAbfV ist, dass Baustoffe getrennt erfasst und vorrangig einer Wiederverwendung oder einem Recyclingverfahren zugeführt werden (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 64). Abfallerzeuger und Abfallbesitzer sind verpflichtet, mindestens folgende Baustoffe direkt an der Bau- oder Abbruchstelle sortenrein getrennt zu erfassen: Beton, Ziegel, Baustoffe auf Gipsbasis, Fliesen und Keramik, Glas, Kunststoffe, Metall, Holz, Dämmmaterial und Bitumengemische. Sämtliche Bauabfallmengen und die jeweilige Art der Entsorgung sind zu dokumentieren.

Von der Getrennthaltungspflicht darf nur in begründeten Ausnahmefällen abgewichen werden. Die GewAbfV sieht dabei jedoch ausdrücklich vor, dass auch bei gemischter Erfassung zumindest eine Getrennthaltung von mineralischen und nichtmineralischen Bestandteilen zu erfolgen hat.⁷⁹ Bei den Gemischen ist entsprechend zwischen Bauschutt und gemischten Bauabfällen zu unterscheiden, für die jeweils unterschiedliche Verwertungswege vorgeschrieben sind:

- *Bauschutt* besteht überwiegend aus mineralischen Stoffen wie Beton, Ziegel, Fliesen oder Keramik und ist an eine Aufbereitungsanlage weiterzuleiten (§ 2 Nr. 2 GewAbfV), in der aus mineralischen Bauabfällen nach den anerkannten Regeln des Straßenbaus definierte Gesteinskörnungen hergestellt werden.
- *Gemischte Bauabfälle* enthalten hingegen überwiegend nichtmineralische Materialien wie Kunststoffe, Metalle oder Holz. Derartige Gemische sind Vorbehandlungsanlagen zuzuführen (§ 6 Abs. 1 GewAbfV), die über eine entsprechende technische Ausstattung verfügen, um die unterschiedlichen Materialien zu sortieren (z. B. Abtrennung von Kunststoff, Metallen etc.).

Sichergestellt werden soll, dass die Abfallhierarchie eingehalten und auch Bauabfallgemische einem möglichst hochwertigen Recycling zugeführt werden. Deshalb ist sowohl die Erfassung der obigen Gemische als auch deren minderwertige Verwertung (Verfüllung, Verwertung als Deponiebaustoff) nur dann zulässig, wenn technische oder wirtschaftliche Gründe dagegensprechen (zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 65 f.):

- Technische Gründe, die gegen die Getrennthaltungspflicht sprechen, liegen z. B. vor, wenn an der Baustelle nicht genügend Platz vorhanden ist, um ausreichend Container für die unterschiedlichen Abfallfraktionen bereitzustellen. Entsprechend fallen insbesondere in städtischen Lagen Bauabfallgemische an. Auch statische Aspekte können eine getrennte Sammlung der Fraktionen verunmöglichen, z. B. weil sich die Materialien nicht separat ausbauen lassen. Sind gemischte Bauabfälle angefallen, ist unklar, wie und durch wen in der Praxis zu beurteilen ist, ob ihre Zuführung zu einer Aufbereitungsanlage technisch möglich ist. Nach Auffassung von Muchow et al. (2022) ist dafür eine fundierte technische Expertise notwendig, über die nur Betreiber einer Aufbereitungs- oder Vorbehandlungsanlage verfügen (nicht jedoch Abfallerzeuger oder Betreiber von Containerdiensten).
- Wirtschaftlich gilt eine getrennte Erfassung oder die Aufbereitung rechtlich dann als unzumutbar, wenn die entstehenden Mehrkosten unangemessen hoch sind – definiert ist die Höhe jedoch nicht. Laut Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall verbietet sich eine pauschale Angabe zumutbarer Mehrbelastungen, da es konkret auf die Umstände des jeweiligen Einzelfalles ankomme (LAGA 2019, S. 32). Anhaltspunkte zur Beurteilung der wirtschaftlichen Zumutbarkeit bieten die Empfehlungen, die von der 8. Regierungskommission der Niedersächsischen Landesregierung (o.J.) beschlossen wurden. Demnach gelten Mehrkosten von einem Drittel für die getrennte Erfassung sowie Mehrkosten von 50% für die Aufbereitung bzw. Vorbehandlung (im Vergleich zur sonstigen Verwertung) als wirtschaftlich zumutbar. Für überwiegend mineralische Gemische wird festgestellt, dass die wirtschaftliche Zumutbarkeit regelmäßig gegeben ist, wenn die Aufbereitung technisch möglich ist.

Aufgrund fehlender bundesweiter Vorgaben gibt es in der Praxis große Unsicherheiten, wie die Ausnahmetatbestände zu begründen und zu beurteilen sind. Dies gilt ganz besonders für die wirtschaftliche Zumutbarkeit, die nur sehr unscharf definiert ist. Laut Einschätzung von Muchow et al. (2022) wird insbesondere die getrennte Bereitstellung der Bauabfälle nur unzureichend umgesetzt (zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 67). Darauf deuten u. a. Schwerpunkttaktionen sowie exemplarisch durchgeführte Überwachungsmaßnahmen verschiedener Landesbehörden (Brandenburg, Baden-Württemberg, Berlin, Hamburg, Niedersachsen) hin, in deren Rahmen die

⁷⁸ Gewerbeabfallverordnung vom 18.4.2017, zuletzt geändert am 28.4.2022

⁷⁹ Ein Verstoß gegen das Getrennthaltungsgebot nach § 13 GewAbfV gilt als Ordnungswidrigkeit und kann mit einer Geldbuße von bis zu 100.000 Euro geahndet werden.

Abfallerzeuger und Besitzer zur Vorlage der Dokumentation zum Aufkommen und dem Verbleib von Bauabfällen aufgefordert wurden (EUWID 2022f; MLUK 2021). Die Ergebnisse zeigen, dass die Pflichten der GewAbfV bei den Bauherren und bauausführenden Unternehmen häufig nicht ausreichend bekannt sind und regelmäßig nicht erfüllt werden. Die Defizite äußern sich u. a. in unvollständig eingereichten Dokumentationsunterlagen und fehlenden Begründungen, warum eine gemischte Erfassung von Abfällen nicht vermieden werden kann. Insgesamt scheinen die behördliche Überwachung und der Vollzug von abfallrechtlichen Vorgaben auf der Baustelle unzureichend zu sein. Dieser Missstand sei, so Muchow et al. (2022), bei Abbruchunternehmen bekannt und führe dazu, dass bei Abbruch- und Entsorgungsdienstleistungen höhere Entsorgungskosten für nicht sortenrein erfasste Bauabfälle in Kauf genommen und durch den geringeren Arbeitsaufwand kompensiert werden. Dieses Vorgehen erfolge besonders in Regionen, in denen kostengünstige Entsorgungsoptionen bei Aufbereitern, in Verfüllstätten oder auf Deponien im nahen oder mittleren Umkreis zur Verfügung stehen – die Pflicht der Zuführung zu einer Vor- oder Aufbereitungsanlage werde somit regelmäßig nicht erfüllt. Auch Knappe et al. (2023) kommen zu ähnlichen Schlussfolgerungen und stellen dem Vollzug der GewAbfV insgesamt ein sehr schlechtes Zeugnis aus.⁸⁰

Allerdings wird die Ablagerung von Bauabfällen auf einer Deponie durch eine anstehende Änderung der DepV deutlich erschwert (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 70). Diese regelt insbesondere, wie Deponien und Langzeitlager für Abfälle errichtet, betrieben, stillgelegt und nachversorgt werden müssen. Ab Januar 2024 dürfen Abfälle, die einer Verwertung zugeführt werden können, nicht mehr auf einer Deponie abgelagert werden (§ 7 Abs. 3 DepV). Gleiches gilt für Abfälle, die zur Vorbereitung zur Wiederverwendung oder zum Recycling getrennt gesammelt werden.⁸¹ Für alle angelieferten Abfälle muss geprüft werden, ob die Verwertung außerhalb der Deponie technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht zumutbar ist. Nur wenn einer der Ausnahmetatbestände erfüllt und nachgewiesen ist, dürfen Abfälle künftig abgelagert werden. Die Annahmekriterien auf Deponien werden damit deutlich verschärft.⁸²

Eine strikte Umsetzung dieser neuen Regelung wäre ein guter Hebel, um verwertungsfähige Massen in den Baustoffkreislauf umzulenken. 2020 wurden ca. 18,5 Mio. t Boden und Steine (entspricht 14,3 % der angefallenen Menge) und über 3,3 Mio. t gemischter Bauschutt (5,5 %) auf Deponien abgelagert (Initiative Kreislaufwirtschaft Bau 2023). Eine genauere Aufschlüsselung der Entsorgungswege für die unterschiedlichen mineralischen Abfallfraktionen erfolgt im nächsten Abschnitt.

Aufkommen und Entsorgung mineralischer Bauabfallfraktionen

Im Folgenden wird ein Überblick über das Abfallaufkommen und die Entsorgungswege wichtiger mineralischer Massenbaustoffe gegeben: Bodenaushub, Beton, Mauer- und Dachziegel, gipshaltige Baustoffe und Bauschutt.⁸³ Um die Stoffströme zu ermitteln, wurde von Muchow et al. (2022) die Statistik »32111-0004: Abfallentsorgung: Deutschland, Jahre, Anlagenart, Abfallarten« für das Jahr 2019 ausgewertet (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 7 f.).⁸⁴ Die Statistik erlaubt die Ermittlung der Bauabfallfraktionen auf Ebene der Abfallschlüsselnummern (nach Abfallverzeichnis-Verordnung – AVV⁸⁵). Jährlich werden die Abfallmengen erhoben, die bestimmten Anlagentypen zugeführt werden. Dazu zählen Deponien, übertägige und untertägige Abbaustätten, thermische Behandlungsanlagen und eine Vielzahl von verschiedenen Sortier- und Behandlungsanlagen. Die in Bauschuttrecyclinganlagen behandelten Abfallströme werden alle 2 Jahre über die Statistik »32141-0001: Bauschuttaufbereitungsanlagen, Asphaltmischanlagen: Deutschland, Jahre, Abfallarten« gesondert erhoben.⁸⁶ Die Daten wurden für das Berichtsjahr 2018 ausgewertet und die jeweiligen Stoffstromdiagramme um diese Angaben ergänzt.

⁸⁰ Darauf hinzuweisen ist jedoch, dass an der Studie teilweise dieselben Autor/innen beteiligt waren wie am Gutachten von Muchow et al. 2022.

⁸¹ Davon ausgenommen sind Abfälle, bei denen eine Ablagerung auf Deponien den Schutz von Mensch und Umwelt am besten oder in gleichwertiger Weise wie die Vorbereitung zur Wiederverwendung und das Recycling gewährleistet; dies betrifft z. B. asbesthaltige Abfälle.

⁸² Schon seit dem 4.7.2020 ist gemäß § 8 Abs. 1 Nr. 2a DepV das Ergebnis der Prüfung der Verwertbarkeit und Verwertungsmöglichkeiten vorzulegen. Aber es ist unklar, wie diese Pflicht zu erfüllen ist und welche Art von Nachweisen bei der Anlieferung auf Deponien aktuell vorgelegt wird. Ein Ablagerungsverbot aufgrund der Verwertungseignung wird erst ab dem 1.1.2024 ausgesprochen werden können (Muchow et al. 2022, S. 70).

⁸³ Nicht einbezogen wurden Straßenaufbruch, der ebenfalls zu den mineralischen Bauabfällen gezählt wird (UBA o.J.c), jedoch hauptsächlich aus Bitumengemischen besteht, sowie gemischter Bauabfall, der ebenfalls in geringfügiger Menge mineralische Bestandteile enthalten darf.

⁸⁴ Die Erhebungen erfolgen jährlich über die Statistischen Landesämter und werden vom Statistischen Bundesamt über die Datenbank »GENESIS-Online« veröffentlicht; zitiert im Folgenden als Destatis (o.J.a).

⁸⁵ Abfallverzeichnis-Verordnung vom 10.12.2001, zuletzt geändert am 30.6.2020

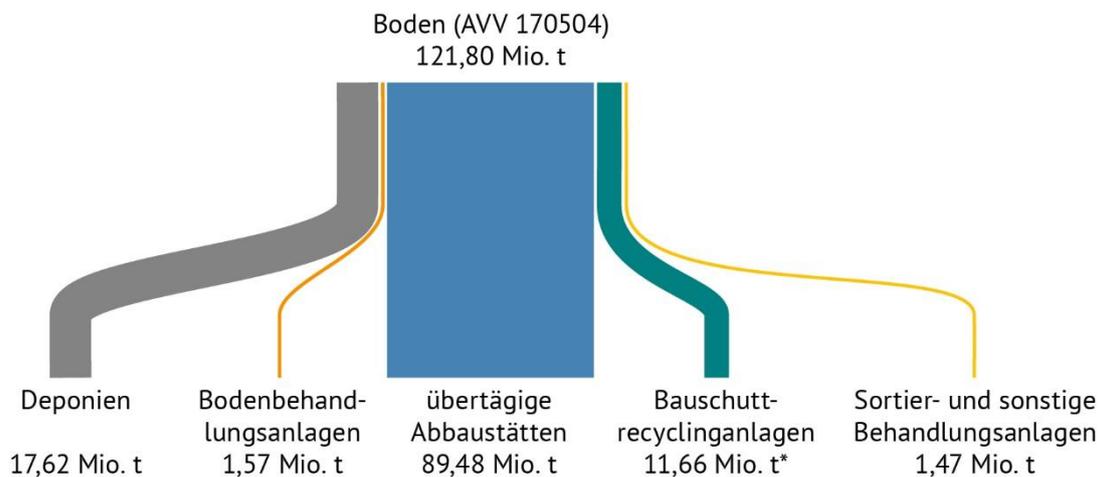
⁸⁶ Der Bereitstellung erfolgt ebenfalls über »GENESIS-Online«; zitiert im Folgenden als Destatis (o.J.b).

Insgesamt ist die Aussagekraft der verfügbaren Daten zum Aufkommen von Bau- und Abbruchabfällen von Unsicherheiten geprägt (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 7 f.). So werden etwa Bauabfälle, die über mobile Anlagen vor Ort aufbereitet und/oder direkt verwertet werden, über die Statistiken nicht unbedingt erfasst. Eine vollständige statistische Erhebung der Gesamtmengen wäre folglich nur direkt an der Anfallstelle möglich. Außerdem wird nicht weiter aufgeschlüsselt, welche Anlagen unter die Kategorie »sonstige Behandlungsanlagen« fallen. Die Anlagen können sowohl spezialisierte Recyclinganlagen darstellen, als auch Anlagen, die Abfälle für die Entsorgung über Deponien, Verfüllstätten und Verbrennungsanlagen umschlagen oder vorkonditionieren. Die Statistik erlaubt es somit also nur nachzuvollziehen, welchem Anlagentyp die Abfälle als erstes zugeführt werden. Daher wurde von Muchow et al. (2022) für jede Abfallart anhand von Praxiserfahrungen abgeschätzt, welcher Art der Entsorgung die Abfälle letztendlich am wahrscheinlichsten zugeführt wurde.

Bodenaushub

2019 fielen über 120 Mio. t Bodenaushub (AVV 170504) an, was knapp 60% der statistisch erfassten Bauabfälle entspricht. Davon wurden knapp 90 Mio. t (73%) als Verfüllmaterial in übertägigen Abbaustätten (z. B. Kies, Sand- oder Tongruben) verwertet. 17 Mio. t (14%) wurden auf Deponien entsorgt (Abb. 3.14). Für die 11 Mio. t (9%), die Bauschuttrecyclinganlagen zugeführt werden, ist für einen relevanten Anteil die Verwertung im Erdbau wahrscheinlich, da die dafür übliche und einfache Siebtechnik in diesen Anlagen vorhanden ist. Bei den weiteren Behandlungsanlagen ist dies nicht zu erwarten, sodass zu vermuten ist, dass die diesen Anlagen zugeführten Böden zu einem erheblichen Anteil nur umgeschlagen und den beiden Hauptentsorgungswegen zugeführt werden.

Abb. 3.14 Aufkommen und Entsorgung von Bodenaushub in Deutschland (2019)



* Bezugsjahr 2018

Quelle: nach Muchow et al. 2022, S. 10; nach Destatis o.J.a u. o.J.b

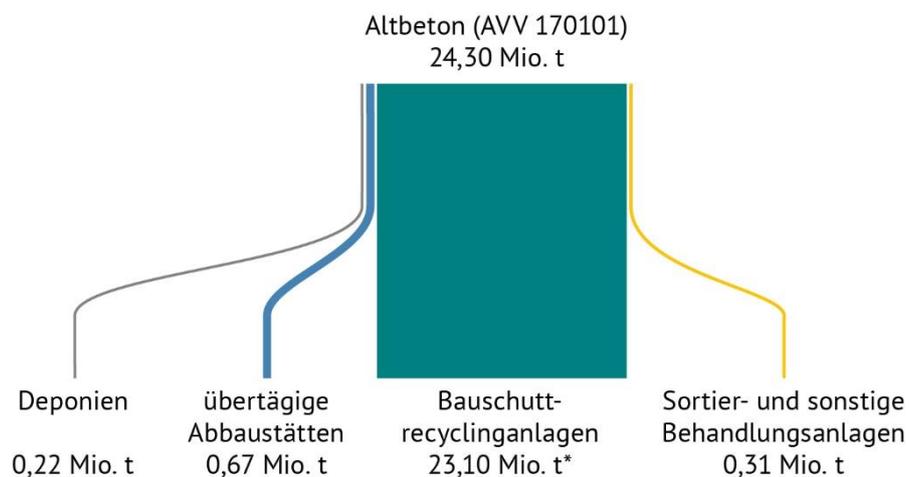
Die direkte Zuführung von über 100 Mio. t Boden und Steine in Verfüllstätten oder Deponien zeigt, dass der Großteil des Bodenaushubs ohne eine nennenswerte Aufbereitung entsorgt wird (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 11). Daraus sollte jedoch nicht der Schluss gezogen werden, dass diese Massen aufgrund ihrer technischen Eigenschaften für ein Recycling vollständig ungeeignet wären oder gar aufgrund der Schadstoffbelastung aus dem Baustoffkreislauf ausgeschleust werden müssten. Die derzeitige Entsorgungspraxis macht vielmehr deutlich, dass in der Entsorgungswirtschaft keine zielgerichteten Aufbereitungsstrategien für gering belastete Böden etabliert sind. Aussortierte und konfigurierte Gesteinskörnungen aus Steinen, Sanden, Lehmen oder Tonen können in der Beton-, Ziegel- oder Leimbauindustrie durchaus eingesetzt werden und Primärrohstoffe ersetzen. Dies zeigen sowohl praxisnahe Forschungsvorhaben als auch innovative Strategien der Rohstoffversorgung aus der Industrie, die in der Praxis auf Initiative von Baustoffherstellern bereits umgesetzt werden (Feeß 2020).

Das tatsächliche Aufkommen von Bodenaushub dürfte deutlich über den statistisch erfassten Mengen liegen (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 10 f.). Bodenaushub gilt nach § 2 Abs. 2 Nr. 11 KrWG rechtlich nicht als Abfall, wenn es sich um nicht kontaminiertes Bodenmaterial handelt und an dem Ort, an dem es ausgehoben wurde, für Bauzwecke verwendet wird. Daher werden Böden, die direkt an der Anfallstelle verwertet oder unmittelbar in einer anderen Baumaßnahme eingesetzt werden, über die Abfallstatistik nicht erfasst. Darunter fallen z. B. auch die Böden, die bei Kanal- und Leitungsbaumaßnahmen ausgehoben und wieder eingebaut werden. In Summe dürfte es sich um erhebliche Mengen handeln.

Beton

2019 wurden 24,3 Mio. t Altbeton (AVV 170101) Abfallbehandlungsanlagen zugeführt. Davon wurden 23,1 Mio. t (95%) über Bauschuttrecyclinganlagen entsorgt und knapp 3% als Verfüllmaterial verwertet. Weniger als 1% wurde auf Deponien entsorgt (Abb. 3.15).

Abb. 3.15 Aufkommen und Entsorgung von Altbeton in Deutschland (2019)



* Bezugsjahr 2018

Quelle: nach Muchow et al. 2022, S. 12; nach Destatis o.J.a u. o.J.b

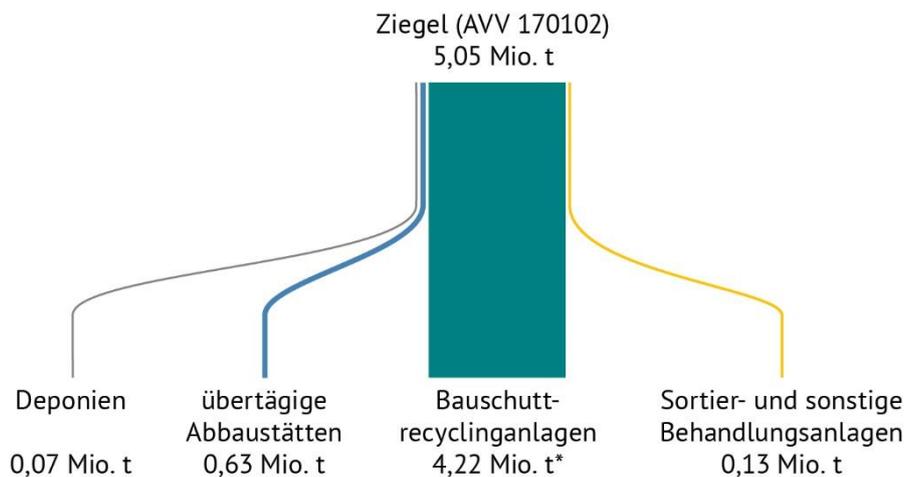
Beton wird zusätzlich in relevanten Mengen auch über den gemischten Bauschutt erfasst (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. S. 12 f.). Zwar gibt es keine repräsentativen wissenschaftlichen Untersuchungen über die Zusammensetzung von gemischtem Bauschutt, es gibt jedoch Hinweise, dass Beton regelmäßig den größten Massenanteil ausmacht. So enthalten beispielsweise Recyclingbaustoffe, die aus gemischtem Bauschutt für den Einsatz im Wege- oder Erdbau aufbereitet werden, bis zu 80% Beton (Müller 2016, S. 56).

Aus Altbeton lassen sich rezyklierte Gesteinskörnungen herstellen, die gemäß den Regelwerken des Straßenbaus und der Betonindustrie je nach Spezifikation für die Produktion von Beton oder im Oberbau einer Straße eingesetzt werden können (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 13 f.). Während die Betonindustrie allerdings bisher nur in geringem Umfang auf Recyclingbaustoffe zurückgreift (2018: 0,5 Mio. t) – zu den Gründen siehe nachfolgend –, ist Altbeton für den Straßen- und Wegebau sehr gefragt und wird daher von den Bauschuttrecyclern zu deutlich niedrigeren Preisen als andere mineralische Fraktionen zur Entsorgung angenommen (UBA 2019a, S. 4). Der Mehraufwand auf der Baustelle zur Getrennthaltung wird durch niedrigere Entsorgungskosten honoriert.

Mauer- und Dachziegel

2019 wurden rund 5 Mio. t Ziegelabfälle (AVV 170102) Abfallbehandlungsanlagen zugeführt (Abb. 3.16). Davon wurden 4,2 Mio. t (84 %) über Bauschuttrecyclinganlagen entsorgt. 0,6 Mio. t (12 %) wurden als Verfüllmaterial verwertet. Etwa 1 % der Ziegelabfälle wurde auf Deponien entsorgt.

Abb. 3.16 Aufkommen und Entsorgung von Mauer- und Dachziegeln in Deutschland (2019)



* Bezugsjahr 2018

Quelle: nach Muchow et al. 2022, S. 16; nach Destatis o.J.a u. o.J.b

Ziegelabfälle umfassen sowohl Tondachziegel als auch Mauerziegel (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 16 f.). Während Dachziegel aufgrund ihrer meist rein mechanischen Befestigung auf dem Dach auch nach dem Rückbau wenig Verunreinigungen aufweisen und als sortenrein gelten, haften rückgebauten Mauerziegeln deutliche Verunreinigungen insbesondere von Putzen und Mörteln an. Im Gegensatz zu sauberen Mauerziegeln, die als Übermengen auf der Baustelle übrig geblieben sind, werden rückgebaute Mauerziegel mit Anhaftungen in relevanten Mengen auch als gemischter Bauschutt (AVV 170107) erfasst (UBA 2019d, S. 5). Studien zeigen, dass der dortige Ziegelanteil regelmäßig zwischen 25 % und 44 % betragen kann (Knappe et al. 2020). Daraus lässt sich abschätzen, dass zusätzlich zu den getrennt erfassten Ziegeln weitere 6 bis 8 Mio. t Ziegelabfälle pro Jahr als Bestandteil des gemischten Bauschutts entsorgt werden.

Die Rückführung von gebrannten Ziegelprodukten in die ursprüngliche Produktion ist aus technischen Gründen nur bis zu einem Anteil von max. 30 % möglich (Muchow et al. 2022, S. 17). Diese Mengen werden durch die Ziegelindustrie durch den innerbetrieblichen Produktionsausschuss gedeckt (Ziegel 2020). Eine ideale Kreislaufführung ist für Ziegelprodukte daher nur eingeschränkt möglich und es müssen andere Verwertungswege erschlossen werden. Dazu gehören die Aufbereitung von Tondachziegeln zu Vegetations- und Dachbegrünungs-substrat sowie von Mauerwerksziegeln zu Recyclingbaustoffen, die im Erd- und Tiefbau oder Hochbau verwertet werden können.

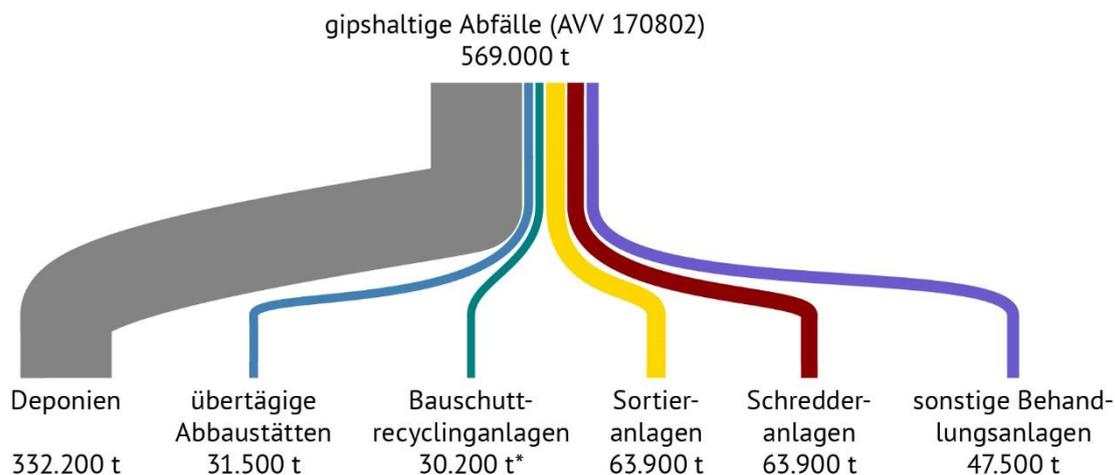
Seit 2007 sind Mauerziegel mit integrierten Dämmstoffen auf dem Markt erhältlich (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 18). Die Füllung besteht je nach Produkttyp aus künstlichen Mineralfasern, Holzfasern oder aus Dämmgranulat auf Kunststoff- oder Gesteinsbasis. Derzeit fallen nur Kleinmengen aus Überschüssen an, die entweder von den Herstellern zurückgenommen oder einer Beseitigung auf der Deponie zugeführt werden. Aufgrund der heterogenen Materialzusammensetzung sind diese Abfälle als gemischter Baustellenabfall (AVV 170904) zu entsorgen. Relevante Mengen werden erst in einigen Jahrzehnten zur Entsorgung anfallen (Ziegel 2020).

Gipshaltige Baustoffe

Das Statistische Bundesamt erfasste im Jahr 2019 0,57 Mio. t gipshaltige Bauabfälle – dazu gehören sowohl Gipskartonplatten als auch Baustoffe wie Porenbeton, Gipsestrich, Putz und Mörtel, die über einen Gipsanteil von weniger als 10% verfügen (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 19 f.). Davon werden 64% direkt auf Deponien abgelagert oder als Verfüllmaterial in übertägigen Abbaustätten entsorgt (Abb. 3.17). Die restlichen 36% werden unterschiedlichen Arten von Behandlungsanlagen zugeleitet. Es ist davon auszugehen, dass die Abfälle in den Behandlungsanlagen in erheblichen Anteilen nur umgeschlagen und ebenfalls deponiert werden. Da gipshaltige Abfälle gemäß § 14 Abs. 2 Satz 3 DepV nicht dafür geeignet sind, um im Deponiebau als Deponieersatzbaustoffe verwertet zu werden, werden gipshaltige Bauabfälle auf Deponien grundsätzlich einem Beseitigungs- und nicht einem Verwertungsverfahren zugeführt.

Gipshaltige Baustoffe sind ein exemplarisches Beispiel dafür, wie wichtig die sortenreine Erfassung der Bauabfälle ist, um ein zirkuläres Wirtschaften zu ermöglichen (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 20). Das im Gips enthaltene Sulfat würde die Einsatzmöglichkeiten von Recyclingbaustoffen im Erd- und Tiefbau erheblich reduzieren, da selbst bei geringen Anteilen Grenzwerte zum Schutz von Boden und Grundwasser nicht eingehalten werden können. Aus diesem Grund werden gipshaltige Fraktionen heute in hohem Maße aus mineralischen Bauabfallmassen, die für ein hochwertiges Recycling vorgesehen sind, ferngehalten.

Abb. 3.17 Aufkommen und Entsorgung von gipshaltigen Abfällen in Deutschland (2019)



* Bezugsjahr 2018

Quelle: nach Muchow et al. 2022, S. 20; nach Destatis o.J.a u. o.J.b

Ein besonderes Problem stellt Porenbeton⁸⁷ dar, der aufgrund seiner guten Dämmeigenschaften seit mehreren Jahrzehnten verstärkt im Wohnungsbau eingesetzt wird (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 22). 2018 betrug der Marktanteil im Mauerwerksbau 18% (UBA 2019c, S. 2). Obwohl langfristig mit relevanten Mengen von Porenbeton aus dem Abbruch und der Sanierung von Gebäuden zu rechnen ist, kann der Werkstoff aktuell nur über Deponien entsorgt werden. Aufgrund dieser schwierigen Rahmenbedingungen für ein hochwertiges Recycling von Porenbeton sind verschiedene Forschungsinitiativen seit Ende der 1990er Jahre aktiv, um Rezepturen für Baustoffe zu entwickeln, die Porenbetongranulat enthalten (z. B. Kreft 2016). Federführend sind dabei die Amtliche Materialprüfungsanstalt der Freien Hansestadt Bremen, die Hochschule Bremen sowie die Forschungsvereinigung Recycling und Wertstoffverwertung im Bauwesen (RWB) e. V.

⁸⁷ Die Verwendung des Begriffs »Beton« ist missverständlich, da sich Porenbeton und Beton in ihren Eigenschaften und den verwendeten Rohstoffen deutlich unterscheiden (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 22). Porenbeton weist im Vergleich zu Beton und anderen Mauerwerksbaustoffen eine niedrigere Festigkeit und Rohdichte und ein hohes Wasseraufnahmevermögen auf. Aufgrund der daraus resultierenden geringen Frost- und Witterungsbeständigkeit eignet sich Porenbeton nicht als Bestandteil von Recyclingbaustoffen für den Straßenbau oder als Zuschlagstoff in der Betonindustrie (UBA 2019c, S. 4).

Deutlich weiter ist die Rückgewinnung von Gips aus Gipskartonplatten; hierfür hat sich seit 2014 in Deutschland eine eigene Recyclingindustrie entwickelt (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 20). 2021 sind bundesweit fünf Anlagen in Betrieb, die Inbetriebnahme einer weiteren Anlage ist für Mitte 2022 geplant (bvse 2021). Der rückgewonnene Recyclinggips substituiert Naturgips 1:1, d. h., Gips kann direkt im Baustoffkreislauf gehalten werden. Nach Angaben des Bundesverbands der Gipsindustrie e. V. (GIPS 2021) werden derzeit jedoch nur etwa 10 % der statistisch erfassten Gipsabfälle in die Gipsindustrie zurückgeführt, obwohl 50 % des Aufkommens als recyclingfähig eingestuft werden (VDPM/ GIPS 2020). Die Kapazitäten der Recyclinganlagen sind somit seit ihrer Inbetriebnahme nicht ausgelastet, was auf zwei Hauptursachen zurückzuführen ist (zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 20 f.):

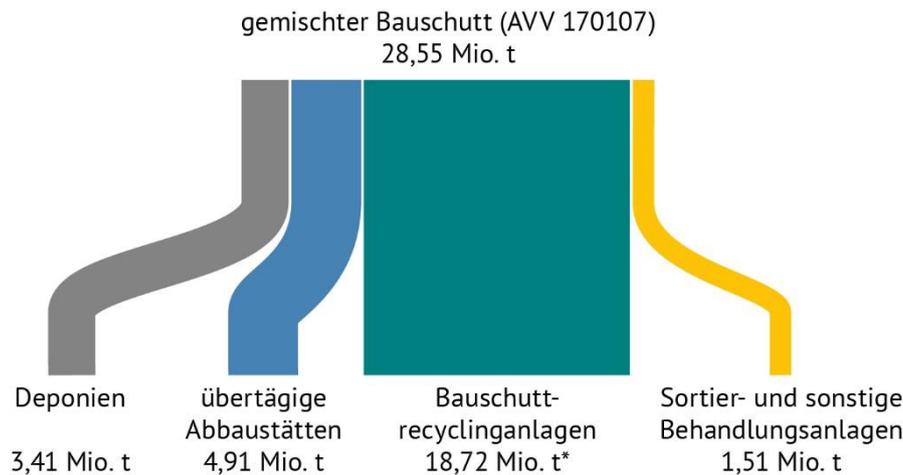
- › Gipskartonabfälle werden als Füll- und Abdeckmaterial für Uranschlammabsetzbecken in Tschechien eingesetzt. Das Umweltbundesamt schätzt die physikalische und technische Eignung der Gipsabfälle für diesen Zweck als ungeeignet ein (Buchert et al. 2017, S. 13).⁸⁸ Die Kosten dieses Entsorgungswegs dürften jedoch um ein Vielfaches günstiger sein als die Deponierung oder die Aufbereitung in Recyclinganlagen. Es wird geschätzt, dass jährlich etwa 100.000 t Gipskartonplatten aus Deutschland so entsorgt werden und dadurch für ein Recycling verloren sind (Buchert et al. 2017, S. 13), obwohl Recyclinggips ein zunehmend gefragter Rohstoff ist (VDPM/ GIPS 2020).
- › Die Erfassung von möglichst reinen Fraktionen von Gipskartonplatten ist Voraussetzung für ein hochwertiges Gipsrecycling. Denn mit einem Gipsgehalt von 80 bis 95 % eignen sich diese sehr gut für die Gewinnung von Recyclinggips, während die anderen gipshaltigen Baustoffe einen deutlich geringeren Gipsgehalt aufweisen und daher für ein Recycling ungeeignet sind. In der Praxis werden jedoch unterschiedliche gipshaltige Baumaterialien unter dem Abfallschlüssel AVV 170802 erfasst: Neben den klassischen Wandbauplatten für den Innenausbau werden auch Porenbetonsteine, Estriche sowie gipshaltige Putze und Mörtel in dieser Fraktion gesammelt. Für das Gipsrecycling ist das ein großes Problem, da Gipsplatten im Aufbereitungsprozess nicht abgetrennt werden können und somit nicht genügend hochwertige Gipsabfälle zur Verfügung stehen.

Gemischter Bauschutt

Nach § 9 Abs. 1 Nr. 2 GewAbfV ist Bauschutt (AVV 170107) ein Gemisch, das überwiegend Beton, Ziegel, Fliesen oder Keramik enthalten darf (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 27 f.). Obwohl gemischter Bauschutt nur in begründeten Ausnahmefällen anfallen darf, hat diese Abfallfraktion mengenmäßig eine enorme Relevanz. Im Jahr 2019 wurden 28,5 Mio. t gemischter Bauschutt entsorgt. Davon sind 18,7 Mio. t (66 %) direkt einer Bauschuttrecyclinganlage zugeführt worden. 4,9 Mio. t (17 %) wurden verfüllt und 3,4 Mio. t (12 %) auf einer Deponie abgelagert (Abb. 3.18).

⁸⁸ Die Verbringung erfolgt unter dem Code B2040 in Anhang III der Verordnung EG 1013/2006 über die Verbringung von Abfällen (Abfallverbringungsverordnung – VVA) als »grüne« Abfälle. Für diese Abfälle gilt das vereinfachte Informationsverfahren nach Art. 18 VVA, d. h., die vorherige Notifizierung und Zustimmung der Behörde ist nicht erforderlich (Muchow et al. 2022, S. 21).

Abb. 3.18 Aufkommen und Entsorgung von gemischtem Bauschutt in Deutschland (2019)



* Bezugsjahr 2018

Quelle: nach Muchow et al. 2022, S. 28; nach Destatis o.J.a u. o.J.b

Gemischter Bauschutt ist gemäß GewAbfV einer Aufbereitungsanlage zuzuführen, in der aus mineralischen Bau- und Abbruchabfällen nach den anerkannten Regeln des Straßenbaus definierte Gesteinskörnungen hergestellt werden (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 28 f.). In der Regel handelt es sich um Bauschutt-aufbereitungsanlagen, die über eine einfache technische Ausstattung mit Sieben und Brechern verfügen (Kap. 3.3.2). Für die rund 8 Mio. t Bauschutt, die direkt Verfüllstätten oder Deponien zugeführt wurden, müsste entsprechend der Rechtslage ein begründeter und dokumentierter Ausnahmefall vorliegen. Davon auszugehen ist jedoch, dass in der Praxis insbesondere der Standort und die Entsorgungskosten über die Art der Entsorgung entscheiden.

Es gibt keine repräsentativen wissenschaftlichen Daten zur stofflichen Zusammensetzung von gemischtem Bauschutt (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 29 f. u. 34). Anhaltspunkte gibt die Studie »Analyse der Recyclingstruktur der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle in Schleswig-Holstein« (Knappe et al. 2020, S. 10 ff.). Darin wurden Recyclingbaustoffe, die auf Basis gemischter Bauschuttfraktionen hergestellt wurden und aus acht Aufbereitungsanlagen stammen, hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzung analysiert.⁸⁹ Es zeigte sich folgendes Ergebnis: Beton und Kies waren mit 44 bis 70 % Hauptbestandteil des Recyclingbaustoffes. Ziegel waren zwischen 15 und 38 % enthalten, Kalksandstein zwischen 8 und 19%.⁹⁰ Aus dem heterogenen Aufkommen wird deutlich, dass sich die technischen Eigenschaften und die Einsatzmöglichkeiten von gemischtem Bauschutt als Recyclingbaustoff nicht einheitlich bewerten lassen. Die Verwertung erfolgt je nach Zusammensetzung im Wegebau oder in Erdbaumaßnahmen. Zum Wegebau zählen z. B. die Erschließung von land- und forstwirtschaftlichen Flächen oder die Errichtung von Wegen in Parkanlagen. Die bauphysikalischen Anforderungen an die Baustoffe sind hierfür geringer als im Straßenoberbau und erlauben höhere Anteile von sandigen Materialien im Vergleich zu Kies und Splitt.

Absatzmärkte für mineralische Recyclingbaustoffe

2020 wurden laut der Initiative Kreislaufwirtschaft Bau (2023) in Bauschuttrecyclinganlagen 76,9 Mio. t Gesteinskörnungen produziert, die als Recyclingbaustoffe zum Einsatz kommen. Damit lässt sich 13,2% des Gesamtbedarfs an Gesteinskörnungen decken (produzierte Menge insgesamt 584,6 Mio. t).⁹¹ Abbildung 3.19 zeigt, welchen Verwertungszweigen die Recyclingbaustoffe 2020 zugeführt wurden. 50,3% der Recyclingbaustoffe

⁸⁹ Müller (2016) kommt in ihrer Studie zu ähnlichen Ergebnissen.

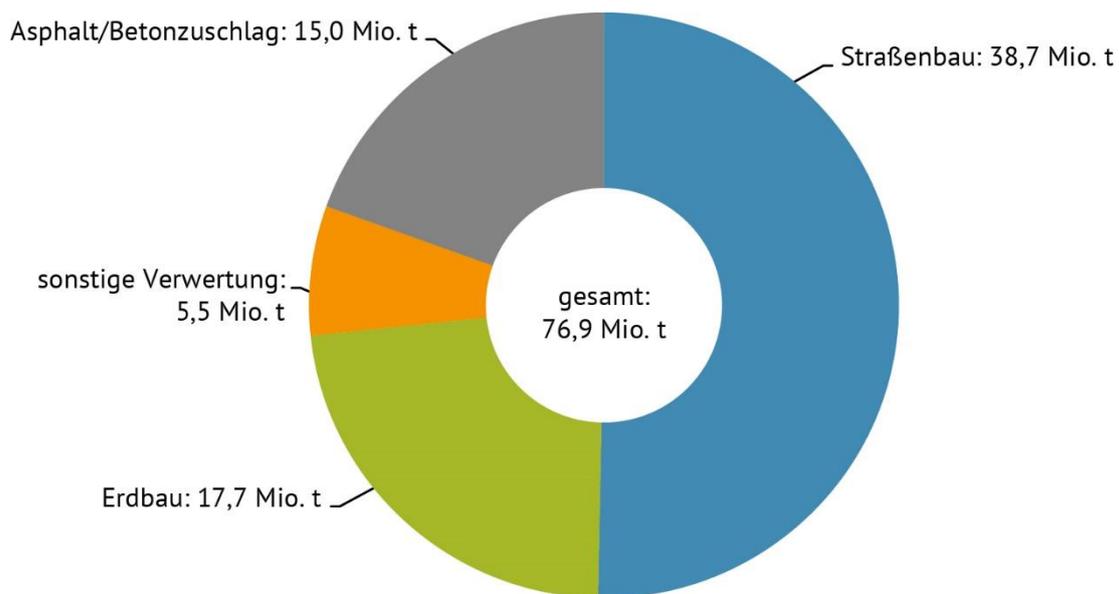
⁹⁰ In der Praxis können jedoch auch Fraktionen anfallen, die überwiegend aus Beton- oder Ziegelabbruch und einem geringen Anteil von Fremdstoffen bestehen.

⁹¹ In Deutschland werden jährlich ca. 262 Mio. t an Kies und Sanden sowie 223 Mio. t Naturstein verbaut (Initiative Kreislaufwirtschaft Bau 2023). Elsner et al. (2017, S. 10) gehen allein für den Straßenbau von einem jährlichen Bedarf von 90 Mio. t Sand und Kies aus (als Frostschutzkies, Tragschichtkies, Auffüllmaterial, Verfüllung z. B. von Rohrleitungen, Drainagekies).

wurden im Straßen- und Wegebau, 23 % in Erdbaumaßnahmen und nur 19,5 % hochwertig als Asphalt- oder (in geringfügigem Umfang) als Betonzuschlag eingesetzt.

Der Straßen- und Wegebau stellt somit den bei Weitem größten Absatzmarkt für aufbereitete Bau- und Abbruchabfälle dar (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 34 f.). Die bautechnischen Anforderungen an Recyclingbaustoffe sind hier jedoch sehr unterschiedlich. Im Straßenoberbau sind natürliche Gesteinskörnungen aus Kies, Sand und gebrochenem Festgestein zu substituieren, die anspruchsvolle technische und bauphysikalische Eigenschaften zu erfüllen haben. Baumaßnahmen im Unterbau einer Straße umfassen hingegen meist einfachere Erdarbeiten (z. B. Bodenaustausch zur Optimierung der Tragfähigkeit des Planums, Ausgleich von Unebenheiten).

Abb. 3.19 Verbleib der Recyclingbaustoffe (20)



Quelle: nach UBA o.J.c, basierend auf Initiative Kreislaufwirtschaft Bau 2023

Die Datenlage lässt keine genauere Abschätzung zu, wie hochwertig die Recyclingbaustoffe im Straßen- und Wegebau eingesetzt werden. Knappe (2019) kommt in seiner Studie zu dem Ergebnis, dass der Absatz von Recyclingbaustoffen im Oberbau des Straßenkörpers in der Praxis – zumindest regional – kaum stattfindet und überwiegend Naturmaterialien eingesetzt werden. Trotz Gütesicherung und Eignungsnachweis für die Recyclingbaustoffe scheint dies vor allem daran zu liegen, dass Recyclingbaustoffe bei Bauherren noch auf mangelnde Akzeptanz stoßen, obwohl sie für den Straßenbau qualitätsgesichert und in ausreichendem Maße verfügbar wären.

Zwar fungieren Bauschuttrecycler noch nicht in nennenswertem Umfang als Rohstofflieferanten für die Baustoffindustrie (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 11 f. u. 80). Für diese sind Baustoffe aus dem Materialkreislauf dennoch zunehmend attraktiv. Denn die natürlichen Rohstoffvorkommen sind endlich und eine Erweiterung der Abbauflächen oder gar Neuausweisung von neuen Abbaustätten lässt sich kaum mehr durchsetzen. Bodenaushubmassen, die in unterschiedlichen Anteilen Sande und Kiese aufweisen, werden schon heute als Rohstoffquelle genutzt. Das ist vor allem dann der Fall, wenn diese sich im Umfeld der Abbaustätten befinden und somit in der Zusammensetzung kaum von den abgebauten Rohstoffvorkommen abweichen. So unterscheiden sich Bodenaushubmassen in Regionen mit Kiesabbau häufig nur wenig von den abgebauten Kiesen. Erste Kieswerke nutzen die bei ihnen vorhandene Technik zur Klassierung von Fremdböden, die nicht aus der eigenen Kiesgrube stammen, um die kiesigen Anteile an die Betonindustrie zu vermarkten (Aichele 2022). Vereinzelt werden Bodenaushubmassen auch direkt von der Leimbau- oder Ziegelindustrie als Rohstoffquelle genutzt (Haas 2022; Leipfinger-Bader 2018). In größerem Umfang ist dies beispielsweise im Zuge der Neubaustrecke der Deutschen Bahn zwischen Stuttgart und Ulm erfolgt (Ziegel o.J.).

Die Frage der Recyclingfähigkeit der Materialien und die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten des Recyclings spielen zunehmend auch in der Baustoffherstellung eine Rolle (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 80 f.). Indem aufbereitete Altmaterialien zu Recyclingbaustoffen verarbeitet werden, lassen sich besonders hochwertige Absatzmöglichkeiten schaffen. So arbeiten die Produzenten der klassischen Wandbaustoffe – Beton, Ziegel, Kalksandstein etc. – an Verwertungslösungen für die aus der Sanierung oder dem Rückbau von Bauwerken anfallenden Altmassen. Seit Längerem etabliert ist beispielsweise der Rückgriff auf rezyklierte Gesteinskörnungen aus Altbeton für die Betonproduktion – das entsprechende Regelwerk für die Herstellung von ressourcenschonendem Beton (R-Beton; substituiert werden die Primärrohstoffe Kies und Sand) gibt es als Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton seit mehr als 20 Jahren (DAfStb 2010). Obwohl R-Beton in den zugelassenen Anwendungsbereichen die gleichen Anforderungen wie ein Beton erfüllt, der ausschließlich aus natürlichen Gesteinskörnungen produziert wird, wird er in Deutschland bislang kaum verbaut (Kasten 3.8). Nur 0,5 Mio. t Recyclingbaustoff wurden 2018 als Betonzuschlag verwendet. Gründe sind u. a. mangelnde Akzeptanz bei Abnehmern sowie fehlende Verfügbarkeit der rezyklierten Gesteinskörnung, die bundesweit nur von wenigen Bauschuttrecyclern produziert wird. Hinzu kommt der Umstand, dass die Herstellung der Gesteinskörnung aufwendig und kostenintensiv ist, sodass R-Beton preislich meist nicht mit der herkömmlichen Alternative konkurrieren kann.⁹² Insbesondere bei öffentlichen Ausschreibungen kann der finanzielle Mehraufwand dazu führen, dass Angebote dieser Art keine Chance haben.

Thema der Forschung ist zudem, inwiefern ziegelreiches Feinmaterial, das beispielsweise bei der Aufbereitung von Mauerwerk als Brechsand anfällt, in der Zementherstellung verwendet werden kann (Böing et al. 2022; VDZ o.J.). Auf diese Weise könnte ggf. Zementklinker, dessen Herstellung sehr energie- und ressourcenintensiv ist, in Anteilen substituiert und Zement so klimafreundlicher produziert werden. Weitere Beispiele für die Verwertung mineralischer Bauabfälle durch die Baustoffindustrie sind gebrochene Altziegel als Substrat für die Begrünung von Flachdächern (Roth-Kleyer 2018) oder Mauerwerksbruch für die Herstellung von Leichtbeton (Müller 2014), auch neue Bauprodukte wie Kaltziegel aus Brechsanden sind in Entwicklung, wenn auch bis dato noch nicht in der Praxis umgesetzt (Leipfinger-Bader 2020).

Kasten 3.8 R-Beton

Nach der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton ist der Einsatz einer rezyklierten Gesteinskörnung auch für die Betonproduktion zulässig (DAfStb 2010). Die Qualitätsanforderungen an die rezyklierten Gesteinskörnungen sind jedoch deutlich höher als für den Einsatz im Straßenbau. Erlaubte Hauptbestandteile sind v.a. Altbetone, Ziegel und Kalksandstein. Genormt sind zwei Typen von rezyklierten Gesteinskörnungen (Knappe et al. 2017, S. 11): Typ 1 erfordert mind. 90% Altbeton und begrenzt die Summe von Mauerziegel und Kalksandstein auf max. 10%. Typ 2 benötigt mind. 70% Altbeton und erlaubt max. 30% Mauerziegel oder Kalksandstein.

R-Beton verfügt in den zugelassenen Festigkeitsklassen und Anwendungsbereichen über die gleichen Eigenschaften wie herkömmlicher Beton. Die allgemeinen Bemessungs- und Verarbeitungsregeln der Bauausführung können ohne Einschränkungen angewandt werden. Anpassungen in der Statik sind beim Einsatz von R-Beton nicht erforderlich (IZB 2021). Die Gütesicherung der Produktion und der Produktionsanlagen selbst erfolgt nach DIN EN 12620, also dem gleichen Regelwerk, dem auch die Gütesicherung der primären Gesteinskörnung unterliegt. Demnach muss von allen Herstellern von Beton eine werkseigene Produktionskontrolle durchgeführt werden, die alle Maßnahmen umfassen muss, die für die Erzielung der Eigenschaften des Betons erforderlich sind.

⁹² Kostenvorteile können sich in Regionen ergeben, in denen Primärrohstoffe über weite Strecken angeliefert werden müssen, die Hersteller der rezyklierten Gesteinskörnungen aber in unmittelbarer Umgebung liefern können (Muchow et al. 2022, S. 38).

Das Regelwerk für den Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen im Beton wird im Moment aktualisiert. Anstatt der bisherigen Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton werden die Vorgaben zum Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen im Beton in die novellierte Betonproduktnorm DIN 1045-2 aufgenommen. Nach den aktuell gültigen Regelwerken sind aufbereitete Baustoffe als rezyklierte Gesteinskörnung erst ab einer Korngröße ≥ 2 mm zulässig, d. h., die feinen Zuschlagsstoffe im Beton müssen (noch) primären Ursprungs sein. Nach dem zukünftigen Regelwerk werden auch Brechsande aus der Betonaufbereitung im R-Beton verwertet werden können. Dies wird die Aufbereitung von Altbeton und mineralischen Bauabfällen zu hochwertiger Gesteinskörnung für die Betonwerke wirtschaftlich deutlich attraktiver machen.

Quelle: Muchow et al. 2022, S. 13 f., 33 u. 37 ff.

3.3.2 Aufbereitung von Bauabfällen: Stand der Technik und Innovationen

Mineralische Bauabfälle können nur dann als Recyclingbaustoff einer hochwertigen Verwertung zugeführt werden, wenn eine zielgerichtete Aufbereitung in dafür vorgesehenen Anlagen (stationär oder mobil) vorgeschaltet ist (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 33 u. 72). Ziel ist es, dass die Eigenschaften der Recyclingbaustoffe die Anforderungen der technischen Regelwerke erfüllen, nach denen sie eingesetzt werden sollen.⁹³ Damit die Recyclingbaustoffe, die den Aufbereitungsprozess verlassen, diesen Qualitätsanforderungen entsprechen – und zwar über große Massenströme hinweg in gleichbleibenden Qualitäten –, hat eine Güteüberwachung von Produktion sowie »Produkt« durch die Anlagenbetreiber zu erfolgen.

Die Aufbereitungstechnik beinhaltet die Aufgabe, alle störenden Bestandteile verlässlich auszuschleusen und gesondert zu entsorgen. Dafür bedarf es einer separaten Aufhaldung verschiedener Abfallfraktionen (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 74). So sind Bauabfallmassen aus Sanierungsbaustellen, Anlieferungen durch Containerdienste bzw. Kleinanlieferungen durch das Bauhandwerk oder auch Privathaushalte möglichst separat zu sammeln, da sie in aller Regel höhere Anteile an Fremdstoffen aufweisen, die eine gesonderte Aufbereitung oder eine separate Entsorgung zur Folge haben. Dasselbe gilt für Baustoffe, die die umwelttechnische Eignung von Recyclingbaustoffen negativ beeinflussen und sich im Aufbereitungsprozess schwer separieren lassen wie beispielsweise Gipsbaustoffe oder Porenbeton. Zum anderen lassen sich bestimmte Bauabfallmassen zu speziellen Produkten verarbeiten, was ebenfalls eine separate Lagerung bedingt. Die Eingangskontrolle sollte entsprechend dazu führen, dass Altbeton, Mauerwerk guter und weniger guter Qualität, Altasphalte, Altziegelmaterialien, Bodenaushubmassen und Gleisschotter voneinander getrennt werden.

Die eigentliche Aufbereitung mineralischer Bauabfälle erfolgt anschließend klassisch über einen Brechvorgang mit einer vor- und nachgeschalteten Siebung (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 74 f.):

- > Ziel der Vorsiebung ist es, Feianteile aus dem Inputmassenstrom zu separieren, vor allem Bodenmassen und den bei Abbruch von Mauerwerk entstehenden Feianteil. Die Siebung schon die Brechertechnik (Abraasion) und stellt wesentlich die Qualität und umwelttechnische Eignung des Recyclingbaustoffes sicher. Sie wird vor allem dann benötigt, wenn gemischter Bauschutt aufbereitet wird.
- > Die Brechertechnik besteht häufig aus einer Prallmühle oder aus einem Backenbrecher; in einigen Fällen erfolgt die Aufbereitung zweistufig, d. h., es sind zwei Brechertypen hintereinandergeschaltet. Der Backenbrecher wird zur groben Zerkleinerung der Materialien genutzt. Über einen Trichter fällt das Aufgabegut in die Brechkammer und wird dort zerdrückt. Die in der Brecheranlage einstellbare Spaltweite zwischen den beiden Brechbacken definiert die endgültige Größe des Schüttguts. In einer Prallmühle wird das Material zerkleinert, indem es stark beschleunigt und auf ein feststehendes Prallwerk geschleudert wird. Das Material wird immer wieder aufgenommen und neu gebrochen, bis es über einen Siebboden abgezogen werden kann.

⁹³ Zu beachten sind z. B. Regelwerke wie die Normen der Betonproduktion oder die technischen Regeln des Straßenbaus, die die geforderten technischen Eigenschaften und Qualitäten der Bauprodukte sicherstellen sollen.

- › Anschließend erfolgt eine Klassierung (Siebung) in eng abgestufte Teilmassenströme, um Endprodukte mit der vorgegebenen Kornabstufung zu erhalten.⁹⁴ Dazu werden Siebdecks mit verschiedenartigen Siebauflagen eingesetzt.⁹⁵ Zusätzlich sind an verschiedenen Stellen im Verfahrensablauf Metallabscheider integriert, um Metalle magnetisch zu separieren.⁹⁶

Leichtstoffe werden in der Regel über einen Windsichter abgeschieden, indem ein Luftstrom auf den Materialstrom geleitet wird (Muchow et al. 2022, S. 74 f.). Das leichte Material – entscheidend sind das spezifische Gewicht in Verbindung mit der Partikelgröße – wird ausgetragen, das schwerere Material verbleibt auf dem Förderband. Das spezifische Gewicht wird auch über die Materialfeuchte beeinflusst, sodass die Abscheideleistung umso besser wird, je enger das Kornspektrum durch die Klassierung eingegrenzt und eine gleichbleibende Materialfeuchte gewährleistet ist.

Innovative Aufbereitungstechniken

Die Anforderungen an die Kreislaufwirtschaft für Bauabfälle steigen und haben in den letzten Jahren merklich zugenommen. Wurden bisher vor allem Bauwerke aus Bauepochen rückgebaut, die in ihrer Tragkonstruktion einfache massive Baustoffe verwendet haben (Beton, Mauerziegel), stehen zunehmend Gebäude zum Rückbau an, die aus Baustoffen mit einer höheren Materialvielfalt bestehen (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 77 f.). Zusätzlich sind Stoffe verbaut worden, die heute als schadstoffhaltig gelten (z. B. asbesthaltige Kleber und Dichtmassen) und die sich aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften schwerlich zu Recyclingbaustoffen aufbereiten lassen. Für die zunehmende Vielfalt an Materialien sowie die wachsende Komplexität von Material- und Konstruktionsverbunden braucht es neue Aufbereitungsstrategien und innovative Aufbereitungstechniken. Die nachfolgend aufgeführten Lösungen und Techniken sind über Pilotvorhaben umgesetzt und zeigen exemplarisch auf, welche Anpassungen in der Aufbereitung und der Verwertung notwendig werden (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 78 ff.):

- › *Sortierung*: Um einen sortenreinen Materialstrom zu bekommen, werden in stationären Aufbereitungsanlagen nichtmineralische Materialien an Förderbändern häufig noch händisch entnommen. Für andere Abfallarten wie Verpackungen oder Gewerbeabfälle sind bereits deutlich ausgefeiltere Lösungen Stand der Technik, die eine weitgehend automatisierte Sortierung nach Materialien ermöglichen und sich auch beim Bauabfallrecycling durchsetzen könnten. Dazu gehört neben der Metallabscheidung z. B. die Kombination aus einer Detektionseinheit (z. B. Kamerasystem) und gezielter Ausschleusung von Partikeln über Düsen mit Druckluft. So lassen sich einzelne störende Materialien – beispielsweise Asphalte, Gips- oder Porenbetonpartikel – erkennen und abscheiden. Sollen Fremd- und Störstoffe verlässlicher und in größerem Umfang abgetrennt werden, bieten sich nasse Aufbereitungstechniken wie z. B. die Schwimm-Sink-Trennung an, bei der die Materialien nach Dichte getrennt werden.
- › *Auftrennung von Materialverbunden*: Eine hochwertige Verwertung von mineralischen Bauabfällen ist darauf angewiesen, dass Materialverbunde gelöst und aufgetrennt werden. Ein Beispiel ist Konstruktionsbeton, der klassischerweise durch Brechen und Zerkleinerung von der Stahlbewehrung gelöst wird. Für Ziegelmauersteine, die per Steckverbindung mit Dämmstoffen gefüllt sind, wird aktuell eine ähnliche Aufbereitungsstrategie entwickelt (Rosen 2021). Das Ziegelmaterial wird dabei schonend gebrochen und die Dämmstoffstecklinge lassen sich nachfolgend aufgrund ihres deutlich geringeren spezifischen Gewichts über eine klassische Dichtentrennung (beispielsweise Windsichter) aus dem Materialstrom entfernen. Mittels Brecher und Mühlen lassen sich auch Putze vom Mauerwerk teilweise abtrennen. Hierzu gibt es Versuche am Institut für

⁹⁴ Unter anderem werden abhängig vom vorgesehenen Einsatzzweck des Recyclingbaustoffs Größt- und Kleinstkorn festgelegt. Für den Straßen- und Erdbau sind dies beispielsweise oft 0/32 mm, 0/45 mm oder 0/63 mm, wobei die Sieblinien bei Erdbaustoffen und Frostschutzschichten relativ weit, bei Schottertragschichten enger gefasst sind (Muchow et al. 2022, S. 75).

⁹⁵ Gängige Siebfractionen sind 0/5 mm, 0/8 mm, 8/16 mm, 16/32 mm, 32/45 mm, 45/x mm, wobei letztere Fraktion als Überkorn dem Brechvorgang erneut zugeleitet wird.

⁹⁶ Im Hochbau wird Beton meist zusammen mit Stahl als Bewehrung verbaut (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 12). Die in Form von Stäben oder Matten verbauten Bewehrungselemente können auf der Baustelle nicht vollständig vom Beton getrennt werden, somit ist Stahl in relevanten Anteilen in der Betonfraktion enthalten. Da die Abtrennung des Metalls mittels Brecher und Magneten mit wenig Aufwand verbunden ist und Stahl an die metallverarbeitende Industrie verkauft werden kann, stellt die Bewehrung für die Aufbereiter keinen problematischen Fremdstoff dar.

Angewandte Bauforschung (IAB) in Weimar, die auf Attritionstrommeln⁹⁷ zurückgreifen (eine in der Aufbereitung von Erzen bewährte Technik; EnBauSa 2013). Das Material wird in der Trommel bei geringer Geschwindigkeit umgewälzt, wobei die Partikel einer Reibung ausgesetzt und so Anhaftungen selektiv gelöst werden. Die Putze finden sich dann angereichert im Feinmaterial.

- › *Nassklassierung*: Die Klassierung, die traditionell per Siebung erfolgt, kann durch eine nasse Klassierung (Siebung unter Zugabe von Wasser) optimiert werden. Eine derartige Anlage ist bei der Heinrich Feeß GmbH & Co. KG (Feeß o.J.) in Kirchheim/Teck in Betrieb und dient der Aufbereitung von Bodenaushubmassen. Ergebnis ist eine genauere Kornabstufung (bei gleichzeitiger Abtrennung von Bodenpartikeln bzw. Feinanteilen). Das Material ist zudem gewaschen und damit frei von der Anhaftung von Feinstpartikeln, die nicht nur den optischen Eindruck, sondern auch wesentlich die Güte des Materials negativ beeinflussen können. Abschlämbbare Anteile⁹⁸ zu limitieren, ist vor allem bei Gesteinskörnungen für die Betonindustrie wichtig. Sichergestellt werden kann das z. B. durch eine Aufstromklassierung. Dabei wird das Material in ein Absetzbecken gegeben, das von Wasser durchströmt wird, um feine Bestandteile und grobe Korngrößen voneinander zu trennen.

Betriebliche Aspekte

Aufbereitungsanlagen werden von Unternehmen betrieben, die Investitionen nur dann tätigen, wenn es wirtschaftlich vorteilhaft ist oder wenigstens die Wirtschaftlichkeit dadurch nicht gefährdet ist (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 72 f.). Den wirtschaftlichen Deckungsbeitrag ziehen Aufbereiter aus zwei Quellen: Zum einen werden Recyclingbaustoffe hergestellt, die mit einem Erlös vermarktet werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass mit dem Aufbereitungsprozess zwangsläufig Teilmassenströme separiert werden, die für ein Recycling ungeeignet sind und kostenpflichtig entsorgt werden müssen. Recyclingbaustoffe stehen zudem in Konkurrenz zu Primärrohstoffen, die in Steinbrüchen oder Gruben gewonnen werden. Sie finden beim Kunden meist nur dann ausreichend Akzeptanz, wenn sie kostengünstiger angeboten werden (Knappe et al. 2012). Entscheidend sind dabei die Gesamtkosten, d. h. die Summe aus Produktpreis und Transportkosten. Zum anderen erzielen die Aufbereitungsunternehmen Erlöse über die Annahme der Abfälle. Sortenreine und qualitativ hochwertigere Abfallfraktionen werden zu einem niedrigeren Preis angenommen als Bauabfallgemische. Aufbereitungsanlagen stehen dabei jedoch in Konkurrenz zu einfachen Entsorgungslösungen wie Deponien, die weniger Aufwand erfordern und kostengünstiger angeboten werden können. In Nachbarschaft zu ausreichenden Verfüllkapazitäten können sich Bauschuttrecyclinganlagen deshalb wirtschaftlich kaum halten. Daher gilt sicherzustellen, dass – wie gemäß GewAbfV sowie DepV vorgesehen (Kap. 3.3.1) – diese Entsorgungsmöglichkeiten tatsächlich nur für Abfallmassen in Anspruch genommen werden, die sich nicht für ein Recycling eignen. Außerdem besteht die Notwendigkeit, dass die entsprechenden Vorgaben in der Praxis einheitlich umgesetzt werden, um zu verhindern, dass Unternehmen im Wettbewerb Entsorgungslösungen anbieten, die gesetzliche Mindeststandards unterlaufen und so kostengünstiger agieren können.

Deutliche Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit von Bauschuttrecycling hat die ab August 2023 geltende Ersatzbaustoffverordnung (ErsatzbaustoffV), die verbindliche Umwelanforderungen u. a. für die Herstellung mineralischer Ersatzbaustoffe definiert (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 68 f. u. 73) (Kasten 3.9).

Kasten 3.9 Ersatzbaustoffverordnung

Mit der ErsatzbaustoffV, die zum 1. August 2023 in Kraft tritt, werden erstmalig bundeseinheitliche und rechtsverbindliche Umwelanforderungen für die Herstellung, an das Inverkehrbringen und den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken geschaffen. Als technische Bauwerke sind ausschließlich Anlagen des Tiefbaus definiert, d. h. insbesondere Straßen, befestigte Plätze, Erdbauwerke und Aufschüttungen. Primäres Ziel ist der »Schutz von Boden und Grundwasser«.⁹⁹ Bislang sind die Herstellung

⁹⁷ In Attritionstrommeln wird das Material umgewälzt und so einer Reibungsbeanspruchung ausgesetzt, wodurch Anhaftungen mit einem geringeren Zerkleinerungswiderstand selektiv zerkleinert werden (Muchow et al. 2022, S. 78).

⁹⁸ Bei abschlämbbaren Bestandteilen handelt es sich um anhaftendes Material (z. B. Gesteinsmehl, Tonmineralien), das aufgrund der Korngröße nicht abgesiebt, sondern nur durch ein Waschverfahren abgetrennt werden kann (Muchow et al. 2022, S. 79).

⁹⁹ Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung

und die Verwendung von Recyclingbaustoffen nur in allgemeiner und nicht rechtsverbindlicher Form über technische Regeln – insbesondere in Anlehnung an die Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA 2003) – oder länderspezifische Erlasse geregelt. Diese uneinheitliche und unklare Rechtslage gilt als Hemmnis für die Herstellung von hochwertigen Recyclingbaustoffen und für Investitionen in Aufbereitungstechnik (Hinzmann et al. 2019, S. 15).

Die neuen Vorgaben verpflichten Aufbereitungsanlagen zur zwingenden Güteüberwachung (bestehend aus Eignungsnachweis, werkseigener Produktionskontrolle und Fremdüberwachung) von sämtlichen Recyclingbaustoffen – und zwar unabhängig von der Anlagengröße. Umweltrelevante Parameter/Grenzwerte (Materialwerte) der Ersatzbaustoffe müssen vor dem Inverkehrbringen chemisch bestimmt werden (z. B. Sulfatgehalt, Gehalt von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen – PAK). Je nach Höhe des gemessenen Materialwertes werden die Ersatzbaustoffe in Materialklassen eingestuft (z. B. Recyclingbaustoff der Klasse 1, 2 oder 3). In Abhängigkeit der ermittelten Materialklasse werden für die Recyclingbaustoffe in Anlage 2 der ErsatzbaustoffV zulässige Einbauweisen¹⁰⁰ in technische Bauwerke beschrieben. Werden die Ersatzbaustoffe entsprechend der vorgegebenen Einbauweisen eingesetzt, entfällt damit die Pflicht zur Einholung einer wasserrechtlichen Erlaubnis, was zu einer Entlastung der Genehmigungsbehörden führt.

Der bürokratische Aufwand für den Einsatz von Recyclingbaustoffen in einem technischen Bauwerk (also Anlagen des Tiefbaus gemäß Definition der ErsatzbaustoffV) steigt dadurch jedoch deutlich, da jede einzelne Anlieferung über einen Lieferschein dokumentiert sein muss. Die neuen Vorgaben könnten aber auch dazu beitragen, dass die Akzeptanz von Recyclingbaustoffen bei Bauherren und Bauunternehmen steigt. Denn nachteilige Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit und schädliche Bodenveränderungen sind praktisch ausgeschlossen, wenn Recyclingbaustoffe nach den Regeln der ErsatzbaustoffV hergestellt und eingebaut werden.

Quelle: Muchow et al. 2022, S. 67 f.

Die bisherige Praxis lässt es zu, dass auch nicht qualitätsüberwachte Recyclingbaustoffe eingesetzt werden. Dies ist mit Inkrafttreten der EBV nicht mehr möglich. Jede Tonne Recyclingbaustoff, die eine stationäre oder mobile Aufbereitungsanlage verlässt, muss einer standardisierten Güteüberwachung unterzogen werden. Dazu zählen ein Eignungsnachweis der Behandlungsanlage sowie regelmäßige Fremdüberwachungen durch eine akkreditierte Überwachungsstelle in Kombination mit fortwährenden werkseigenen Produktionskontrollen durch den Hersteller der Ersatzbaustoffe. Das erfordert ein Umdenken der bisherigen Aufbereitungspraxis: Das reine Sieben und Brechen von Materialien, ohne eine zielgerichtete Einstellung von Qualitätseigenschaften, wird nicht mehr ausreichen, um Recyclingbaustoffe in Verkehr bringen zu dürfen. Getrennte Annahme, Lagerung und Aufbereitung von Bauabfällen unterschiedlicher Qualitäten und ein Stoffstrommanagement werden Voraussetzung sein. Laut Muchow et al. (2022, S. 73) dürften vor allem kleinere Betriebe mit einfacher technischer Ausstattung Mühe haben, diese Anforderungen zu erfüllen und die damit verbundenen Zusatzkosten zu tragen. Kleine Anlagen finden sich aufgrund der relativ geringen Abfallmengen insbesondere in ländlichen Regionen (Destatis o.J.b). Die Aufbereitung ist dort häufig bei Bauunternehmen, Abbruchunternehmen oder Betrieben des Garten- und Landschaftsbaus angesiedelt, die jeweils Abfallmassen aufbereiten, die bei ihren eigenen Baustellen zur Entsorgung anfallen.

3.3.3 Herausforderungen und Perspektiven

Trotz hoher Verwertungsquoten (rund 90 %) von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen, welche die gesetzlichen Vorgaben von 70 % klar überschreiten, weist die Kreislaufführung von Bauabfällen noch deutliches Optimierungspotenzial auf (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 99). So findet die Rückführung von Baustoffen aus dem anthropogenen Lager in den Baustoffkreislauf bislang noch nicht in einem Maße statt, dass dadurch Primärrohstoffe in größeren Anteilen substituiert würden. Mineralische Bauabfälle werden häufig einfachen Verwertungsmaßnahmen zugeführt (z. B. wird knapp 75 % des Bodenaushubs in Abbaustätten verfüllt) oder direkt auf Deponien entsorgt (dies betrifft ca. 13 % des Bodenaushubs und ca. 6 % des gemischten Bauschutts),

¹⁰⁰ Die Einbauweisen berücksichtigen die Bodenart am Einbauort, die Mächtigkeit der Grundwasserdeckschicht sowie die Frage, ob sich der Einbauort innerhalb oder außerhalb eines Wasserschutzbereiches befindet.

obwohl die zielgerichtete Aufbereitung dieser Materialien ökologisch vorteilhaft ist.¹⁰¹ Aktuell wird nur knapp 13 % (73 Mio. t) des jährlichen Bedarfs an Gesteinskörnungen durch Recyclingbaustoffe gedeckt. Eingesetzt werden diese zum größten Teil im Straßen- und Erdbau, kaum hingegen in der Betonherstellung. Es handelt sich also meist um ein Downcycling (Baronick et al. 2019, S. 2). Auch die Potenziale der öffentlichen Beschaffung für den Einsatz von Sekundärbaustoffen sind bei Weitem nicht ausgeschöpft (Kap. 4.2.3).

Angesichts des enormen Rohstoffbedarfs der Bauindustrie ist weniger die Frage der Aufnahmekapazitäten der Verwertungswege relevant. Stattdessen wird die Dringlichkeit deutlich, Bau- und Abbruchabfälle effizient und umfassend als hochwertigen Recyclingbaustoff bzw. Rohstoffersatz aufzubereiten. Wesentliche Hindernisse sind dabei vor allem auf drei Ebenen zu verorten (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 38 u. 40 f.):

- › *Alternative Entsorgungsoptionen:* Es ist für Bauherren oft einfacher und kostengünstiger, für Bau- und Abbruchabfälle Deponien, Verfüllstätten etc. zu nutzen – vor allem, dann wenn diese im nahen Umfeld der Baumaßnahme zur Verfügung stehen –, als die Materialien einer Aufbereitungsanlage zuzuführen. Ein typisches Beispiel ist der Export recyclingfähiger Gipsabfälle zur Verfüllung nach Tschechien. Auch Defizite in der Umsetzung der GewAbfV tragen dazu bei, dass anfallende Baumaterialien nicht sachgerecht aufbereitet, sondern anderweitig entsorgt werden (Kap. 3.3.1).
- › *Höhere Kosten:* Abnehmer erwarten in der Regel, dass der Einsatz von Recyclingbaustoffen automatisch mit einer Kostenreduktion verbunden ist. Dies ist jedoch selten der Fall. Die Aufbereitung von Abbruchmaterial ist meist deutlich aufwendiger und kostenintensiver als der Abbau von Naturstein.¹⁰² Insbesondere bei öffentlichen Ausschreibungen kann das dazu führen, dass Recyclingbaustoffe aufgrund der Mehrkosten nicht konkurrenzfähig sind.
- › *Mangelnde Akzeptanz:* Recyclingbaustoffe leiden trotz umfassender Gütesicherungssysteme unter einem schlechten Image (Knappe et al. 2012). Teilweise kann das dem Umstand geschuldet sein, dass in den 1990er Jahren deutlich schlechtere Qualitäten von Recyclingbaustoffen (damals ausschließlich für den Straßenbau) auf dem Markt waren. Obwohl rezyklierte Gesteinskörnungen heutzutage dieselben technischen Eigenschaften wie primäre Rohstoffe erfüllen müssen, werden Letztere von Bauunternehmen und Bauherren meist bevorzugt, was sich negativ auf die Nachfrage nach Recyclingbaustoffen auswirkt.

Die Folge ist eine Gemengelage, in der der Konkurrenzdruck von aufbereitungsarmen und kostengünstigen Entsorgungsoptionen so hoch ist, dass sich Investitionen in innovative Aufbereitungstechnik für Bauschutt-aufbereiter kaum rechnen (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 3, 38 u. 99). Bereits heute ist der technische Aufwand für die Aufbereitung der häufig als heterogenes Gemisch angelieferten mineralischen Bauabfälle erheblich. Hinzu kommt die geringe Nachfrage nach Recyclingbaustoffen wie z. B. R-Beton. Aufgrund dieser Rahmenbedingungen besteht für die Betreiber von Aufbereitungsanlagen kein ausreichender wirtschaftlicher Anreiz, hochwertige Recyclingbaustoffe aufwendig zu produzieren, was wiederum zu einer fehlenden Verfügbarkeit der rezyklierten Gesteinskörnungen führen kann.¹⁰³ Zur Überwindung dieser Hemmnisse bieten sich Ansatzpunkte in den folgenden Bereichen:

- › Optimierung der Sammlung von Bauabfällen (sortenreine Erfassung und Aufbereitung),
- › Verbesserung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen des Recyclings sowie
- › Lockerung regulatorischer Vorgaben an den Rezyklateinsatz.

¹⁰¹ Die Produktion von Recyclingbaustoffen stellt zwar keinen großen Hebel zur Einsparung von Treibhausgasemissionen dar, wie die Analyse von Muchow et al. (2022, S. 48 ff.) zeigt. Aus Umweltsicht relevant ist jedoch die Substitution von mineralischen Primärrohstoffen, da schädliche Eingriffe in Ökosysteme vermieden werden (dazu (Baronick et al. 2019, S. 8 f.; Hinzmann et al. 2022, S. 62). Zudem sind die Transportketten aus ökologischer Sicht bedeutend. Häufig ist die Nutzung von Sekundärrohstoffen dabei vorteilhaft, da die abzubrechenden Bauwerke näher am Ort der Baustoffnachfrage liegen als Steinbrüche (Muchow et al. 2022, S. 3).

¹⁰² Ausnahmen können sich in Regionen ergeben, in denen Primärrohstoffe über weite Strecken angeliefert werden müssen, die Hersteller der rezyklierten Gesteinskörnungen aber in unmittelbarer Umgebung liefern können (Muchow et al. 2022, S. 38; UBA 2019a, S. 7).

¹⁰³ So wird etwa die Gesteinskörnung Typ 2 bundesweit bislang offenbar nur von einem Bauschutt-aufbereiter produziert (UBA 2019a, S. 5).

Sammlung

Recyclingbaustoffe müssen dezidierte Produkthanforderungen erfüllen, wofür entsprechende Aufbereitungstechniken (Zerkleinerung, Sortierung und Klassierung) eingesetzt werden (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 76 f.). Bis dato sind die technischen Möglichkeiten allerdings relativ begrenzt – insbesondere die Zusammensetzung der aufzubereitenden Materialien lässt sich kaum beeinflussen. Eine normgerechte Produktion der rezyklierten Gesteinskörnungen Typ 1 und Typ 2 ist beispielsweise nur dann möglich, wenn die beiden zugelassenen Bestandteile Altbeton und Mauerwerk getrennt bereitgestellt, aufbereitet und abschließend gezielt dosiert werden. Denn eine Auftrennung von Altbeton und Mauerwerksbruch ist im Rahmen der Aufbereitung nicht durchführbar. Zwar ist es bis zu einem gewissen Grad möglich, nichtmineralische Fremd- und Störstoffe (Holz oder Kunststoffe, Metalle) sowie – in begrenzterem Umfang – mineralische Leichtbaustoffe abzuscheiden. Dies gelingt aber niemals vollständig, außerdem steigen damit Aufwand und Kosten der Aufbereitung erheblich.

Deshalb ist es entscheidend, dass die Materialströme, die einer Aufbereitung zugeführt werden, in Zusammensetzung und Qualität so weit wie möglich den geforderten Eigenschaften der Recyclingbaustoffe entsprechen (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 77 u. 84 f.). Eine getrennte, möglichst sortenreine Erfassung von Bauabfällen ist dafür eine wichtige Voraussetzung – sichergestellt werden soll dies durch die Getrennthaltungspflicht der GewAbfV. Allerdings werden die zuständigen kommunalen Abfallbehörden in der Regel nur dann überwachend tätig, wenn der Verdacht eines Verstoßes vorliegt. Eine routinemäßige Überprüfung von Baustellen findet aufgrund von Personalmangel sowie aus Unkenntnis über geplante oder bereits in der Umsetzung befindliche Bauvorhaben kaum statt, sodass die Pflichten offenbar regelmäßig nicht erfüllt werden (Knappe et al. 2023). Diese Vollzugsdefizite zu beheben wäre ein wichtiger erster Schritt, um das hochwertige Recycling von Bauabfällen zu verbessern.

Von Bedeutung ist zudem der möglichst selektive Rückbau¹⁰⁴ von Gebäuden oder auch Straßenbauwerken, um sicherzustellen, dass die Massenströme nach Materialien separiert der Entsorgungswirtschaft übergeben werden (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 77). Für den Straßenbau bedeutet dies beispielsweise ein lagenweises Fräsen der Asphaltdeckschichten, da die Deck-, Binder und Tragschichten aus Asphalt nach unterschiedlichen Rezepturen hergestellt wurden und idealerweise dem ursprünglichen Schichttyp wieder zugeführt werden sollten. Auch die ungebundenen Schichten (Gesteinskörnungen der Frostschutz- oder Schottertragschicht) des Straßenkörpers sollten getrennt von Materialien des Straßenunterbaus gewonnen werden. So separiert, lassen sich diese Materialien jeweils gezielt aufbereiten und wieder dem ursprünglichen Zweck zuführen.

Bauabfälle werden nur dann ausreichend sortenrein und frei von Schad- und Störstoffen erfasst, wenn die Art des Rückbaus und die Entsorgung bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2022, S. 28; Muchow et al. 2022, S. 83 u. 95). Dies ist in der Praxis häufig nicht der Fall. Die Erstellung von Rückbau- und Entsorgungskonzepten – vor Beginn der Baumaßnahme – könnte verpflichtend eingefordert werden, beispielsweise über die Musterbauordnung. Unterstützen lässt sich der selektive Abbruch weiterhin durch die Nutzung von Building Information Modeling (BIM). Mithilfe von BIM können Gebäude konsequent von Beginn an digital geplant – alle gebäuderelevanten Informationen werden über den gesamten Lebenszyklus hinweg digital an einem virtuellen Ort gespeichert und sind dort abrufbar (TAB 2022, S. 61 ff.). Neben einer erhöhten Planungsqualität, besserer Zusammenarbeit und höherer Planungssicherheit bezüglich Kosten und Zeit bietet BIM auch Vorteile für das hochwertige Recycling von Baustoffen. Informationen dazu, wo welche Baustoffe und mit welchen Materialien verbaut sind, wer der Hersteller ist und wie alt diese jeweils sind, sind auch am Lebensende des Gebäudes noch verfügbar. Der selektive Rückbau im Zuge von Sanierungen oder Abrissen ist so insgesamt besser plan- und organisierbar. Anstatt Gebäudeteile oder komplette Bauwerke abzureißen, können im Idealfall sämtliche eingesetzten Bauteile und -stoffe sortenrein zurückgebaut werden, was ein hochwertiges stoffliches Recycling oder bestenfalls sogar eine Wiederverwendung von Bauteilen ermöglicht (Kovacic et al. 2019). Durch einen weitflächigen Einsatz ließe sich zudem auf Stäteebene eine Art urbanes Rohstoffkatasster erstellen. In Deutschland ist der Einsatz von BIM für Bauvorhaben auf der Bundesebene bereits verbindlich, in privaten Bauvorhaben wird die Methode allerdings noch nicht verbreitet eingesetzt (TAB 2022, S. 71 ff.).

¹⁰⁴ Ein selektiver Rückbau umfasst die vollständige Demontage eines Gebäudes. Alle Bau-, Konstruktions- und Ausrüstungsteile werden nach ihrer Funktion oder nach ihrer Materialzusammensetzung demontiert, meist in umgekehrter Reihenfolge zum Auf- und Einbau (Muchow et al. 2022, S. 77).

Wirtschaftlichkeit des Recyclings

Die geringe Nachfrage nach Recyclingbaustoffen hat verschiedene Ursachen und ist neben ihrem schlechten Image vor allem auf die mangelnde Konkurrenzfähigkeit gegenüber Primärrohstoffen zurückzuführen, die u. a. in Kostennachteilen begründet ist. Verantwortlich dafür ist nicht nur die aufwendige Aufbereitung von Recyclingbaustoffen. Verschärfend kommt hinzu, dass die Umweltkosten, die beim Abbau von Primärmaterialien entstehen, nicht in vollem Maße durch die Abbaunternehmen getragen werden (Hinzmann et al. 2022, S. 62). Dieser Nachteil ließe sich dadurch mindern, dass Extraktion oder Verbrauch von Primärrohstoffen durch steuerliche Maßnahmen verteuert werden. Recyclingbaustoffe gewinnen dadurch an Wettbewerbsfähigkeit und es würde für Bauherren interessanter, sie einzusetzen. Dadurch könnten die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für das Recycling insgesamt verbessert werden. Erfahrungen dazu liegen aus anderen EU-Ländern vor; beispielsweise wurde in Großbritannien bereits 2002 eine Baustoffsteuer eingeführt (Kasten 3.10).

Kasten 3.10 Baustoffsteuer in Großbritannien

Eine Besteuerung der Extraktion oder dem Verbrauch von Baumaterialien ist in vielen EU-Ländern verbreitet. Etwa die Hälfte der EU-Mitgliedsstaaten hat entsprechende Abgaben eingeführt. Dabei dürfte in den meisten Fällen aber das primäre Motiv darin liegen, Gewinne aus der Nutzung natürlicher Ressourcen abzuschöpfen, jedenfalls legen das die häufig niedrigen Steuersätze nahe (Postpischil/Jacob 2018). In Großbritannien (wie auch in Dänemark und Schweden) soll mit der Steuer hingegen nicht nur Aufkommen generiert werden, sondern es wird auch eine ökologische Lenkungswirkung angestrebt (Bahn-Walkowiak et al. 2012; Söderholm 2011). Die britische Steuer auf den Abbau von Primärbaustoffen (Aggregate Levy) wurde 2002 in Reaktion auf eine Studie zu den Kosten der Umweltfolgen der Extraktion von Baustoffen eingeführt. Bei der Einführung wurden zunächst 1,60 britische Pfund/t erhoben, das wurde 2008 auf 1,95 und 2009 auf 2 britische Pfund angehoben. Der Satz ist seitdem unverändert. Die Steuer wird auch bei Importen fällig (wird beim Reexport der Materialien jedoch zurückerstattet).

Bis 2011 wurde ein Teil des Aufkommens (ca. 50 Mio. britische Pfund) in den Aggregate Levy Sustainability Fund geleitet. Aus diesem Fonds wurde Innovationsförderung betrieben, um die Nachfrage nach Primärmaterialien zu reduzieren, umweltfreundliche Methoden der Extraktion und des Transports zu etablieren und die lokalen Effekte der Extraktion zu mindern, indem Projekte zur Kompensation der Eingriffe in Ökosysteme beim Abbau von Baumaterialien gefördert wurden (EEA 2008; LE 2006). Der Fonds wurde 2011 aufgelöst, seitdem geht das Aufkommen in den Staatshaushalt. Das Aufkommen liegt in den letzten Jahren bei etwa 350 bis 400 Mio. britische Pfund pro Jahr (HM Revenue & Customs 2021).

Die Primärbaustoffsteuer entfaltet ihre Wirkung gemeinsam mit der schon 1996 eingeführten Deponiesteuer (UK Landfill Tax), die bei der Deponierung von Abfällen erhoben wird. Die Effekte der beiden Instrumente (Primärbaustoff- und Deponiesteuer) lassen sich nicht sinnvoll voneinander trennen. Die vorliegenden Evaluationen zu Umweltwirkungen kommen zu dem Befund, dass die Instrumente in ihrer Kombination wirksam sind (EEA 2008; Elliott 2017; Ettliger 2017; Ludewig/Meyer 2012; Söderholm 2011; Watkins et al. 2017). Die Extraktion von Baustoffen hat sich deutlich verringert. Zwischen 2000 und 2014 wurde pro Baueinheit ein Rückgang der Menge der eingesetzten Primärmaterialien um 40% beobachtet. Zugleich nahm der Anteil von Rezyklat im Baumaterial zu und liegt bei 29% des eingesetzten Materials, was deutlich über dem EU-Durchschnitt liegt (HM Treasury 2020). Die Deponierung von Bauabfällen sank von 50 Mio. t im Jahr 2001 auf 12 Mio. t im Jahr 2016.

Diese Entwicklungen lassen sich nicht alleine der Primärbaustoffsteuer zurechnen, sondern sind auch Ergebnis der Verteuern der Deponierung, einem Rückgang von Bautätigkeit und technischen Innovationen. Dennoch wird der Primärbaustoffsteuer ein wesentlicher Anteil zugesprochen, dass die Nachfrage nach Natursteinen abnahm und die nach Sekundärmaterialien entsprechend zunahm. Eine umfassende Studie zu ökologischen Steuerreformpotenzialen in den EU-Mitgliedstaaten im Auftrag der Europäischen Kommission kommt entsprechend zu dem Ergebnis, dass die britische Abgabe als beste Praxis gewertet werden kann und eine ähnliche Abgabe in den EU-Mitgliedstaaten implementiert werden sollte (Hogg et al. 2016, S. 36).

Quelle: Hinzmann et al. 2022, S. 63 ff.

Auch in Deutschland wird über entsprechende Maßnahmen diskutiert. So haben Baronick et al. (2019) die Implementierung einer *Primärbaustoffsteuer* vorgeschlagen (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 90 f.). Ziel einer solchen Steuer ist es, durch Besteuerung von Primärbaustoffen deren Inanspruchnahme zu reduzieren und so »alternative Verwertungswege [für Bau- und Abbruchabfälle] im Sinne eines hochwertigen Recyclings« zu forcieren (Baronick et al. 2019, S. 2). Auf diese Weise könnte die Primärbaustoffsteuer zur Ressourcenschonung beitragen und gleichzeitig helfen, Umweltschäden zu verringern, die beim Abbau von Primärbaustoffen entstehen. Über eine entsprechend geeignete Verwendung der entstehenden Steuereinnahmen kann diese Lenkungswirkung noch verstärkt werden. Für Deutschland schlägt das Umweltbundesamt die Besteuerung von Baukies, Bausand und Naturgips vor, womit etwa 50 % der Primärbaustoffe über die Steuer erfasst wären (Baronick et al. 2019, S. 6). Empfohlen wird eine mengenbezogene Steuer, die sich auf die Tonne Rohstoff bezieht, mit einem anfänglichen Steuersatz von 3 Euro je Tonne. Die Höhe sollte jedoch regelmäßig evaluiert und bei Bedarf angepasst werden können (Baronick et al. 2019, S. 8). Geschätzt ergäbe sich damit ein Steueraufkommen von rund 750 Mio. Euro pro Jahr, das genutzt werden könnte, um das Baustoffrecycling gezielt zu unterstützen, ressourceneffizientes Bauen zu fördern und die Baustoffgewinnung effizienter und umweltschonender zu gestalten. Das Umweltbundesamt schlägt z. B. vor, dass Fördermittel im Bereich Forschung und Entwicklung von Aufbereitungstechnik und alternativen ressourcenschonenden Bauweisen bereitgestellt werden könnten (Baronick et al. 2019, S. 11).

Ein weiterer Hebel, die Nachfrage nach Recyclingbaustoffen zu erhöhen, besteht schließlich darin, Recyclingbaustoffe in *öffentlichen Beschaffungsmaßnahmen* stärker zu berücksichtigen (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 86 ff.). Der Staat hat für die Steigerung des Einsatzes von Recyclingbaustoffen eine wichtige Vorbildfunktion. Denn Baumaßnahmen, die von öffentlichen Auftraggebern ausgeschrieben und vergeben werden, stellen einen wesentlichen Anteil am gesamten Baugeschehen dar. Mit einem Umsatz von knapp 40 Mrd. Euro pro Jahr entfallen etwa 25 bis 30 % des Gesamtumsatzes im Bauhauptgewerbe auf öffentliche Baumaßnahmen (Statista o.J.h.). Durch Bevorzugung von Recyclingbaustoffen in der öffentlichen Beschaffung wäre den Bau-schuttrecyclern eine höhere Liefersicherheit gegeben, die zu einer besseren Wettbewerbsfähigkeit des aufbereiteten Materials beitragen kann. Die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die Aufbereitung von Bauabfällen würden sich so insgesamt verbessern. Nicht zuletzt könnte auf diese Weise auch das Image von Recyclingbaustoffen gesteigert und damit die Akzeptanz im privaten Bausektor erhöht werden.

Doch bislang wird die Chance vertan, über den flächendeckenden Einsatz in öffentlichen Baumaßnahmen den Absatz von ressourcenschonenden Baustoffen zu fördern und damit Investitionen in Aufbereitungstechnik wirtschaftlich zu machen. Gemäß § 45 KrWG sind bei Bauvorhaben zwar u. a. Erzeugnisse zu bevorzugen, die unter Einsatz von Rezyklaten oder aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt worden sind (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 87 f.). Trotzdem enthalten die Ausschreibungen öffentlicher Auftraggeber häufig die explizite Forderung, dass primäre Rohstoffe eingesetzt werden müssen. Durch den Ausschluss von Nebenangeboten¹⁰⁵ ist häufig auch die Verwendung von Recyclingbaustoffen ausgeschlossen (Dageförde et al. o.J. S. 17). Ein entscheidendes Hemmnis stellt die komplexe Rechtslage dar – bei den Mitarbeitenden der Ausschreibungsstellen bestehen teilweise große Unsicherheiten, ob bei Bevorzugung von Recyclingbaustoffen eine Verletzung des Vergaberechts vorliegen könnte. Zwar sind Vorgaben zur Stärkung des Einsatzes von Recyclingbaustoffen bei öffentlichen Baumaßnahmen in den letzten Jahren zunehmend in die Landesabfallgesetze übernommen worden (z. B. in Nordrhein-Westfalen oder Baden-Württemberg), jedoch ist eine Neuausrichtung der Ausschreibungspraxis kaum zu konstatieren (bvse 2020b). Wichtig sind möglichst verbindliche Vorgaben, wie eine Ausschreibung im Detail zu erfolgen hat. Das Land Berlin setzt in diesem Bereich seit Jahren deutliche Akzente: Basierend auf § 7 Abs. 3 Berliner Ausschreibungs- und Vergabegesetz (BerlAVG; zuletzt novelliert im April 2020) gilt die Verwaltungsvorschrift Beschaffung und Umwelt (VwVBU). Die Umweltschutzanforderungen sind als Mindestkriterien sowie Vertragsbedingungen für Produkte und Dienstleistungen in Form von Leistungsblättern vorgegeben und können unmittelbar in die Ausschreibungsunterlagen übernommen werden. Unter anderem gilt seit 2019 für den Neubau und die Komplettisanierung von bestimmten Gebäuden ab einer Bausumme von 10 Mio. Euro verpflichtend der Einsatz von R-Beton.

¹⁰⁵ Ein Nebenangebot ist ein Angebot, das eine Abweichung von der vorgesehenen Leistungsausführung darstellt.

Gute Erfahrungen mit der öffentlichen Beschaffung hat man in der Schweiz gemacht. Dort hat die Vorgabe der Stadt Zürich, dass öffentliche Gebäude grundsätzlich mit R-Beton zu errichten sind, zu einem enormen Anstieg der Verwendung von R-Beton geführt.¹⁰⁶ Von 2012 bis 2019 ist der Marktanteil von R-Beton am gesamten Betonvolumen der Schweiz von 7 auf 15 % gestiegen (Katerusha 2020; Muchow et al. 2022, S. 39).

Vorgaben für den Rezyklateinsatz

Bislang erlangen auch güteüberwachte Recyclingbaustoffe nicht automatisch den Produktstatus. Gelten Rohstoffe aus dem Materialkreislauf als Abfall, ist die Baustoffindustrie nicht nur zu einem deutlich erhöhten Genehmigungs- und Verwaltungsaufwand verpflichtet (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 62 f.). Auch die Vermarktbarkeit und Akzeptanz der Baustoffe ist stark eingeschränkt, was gegenüber Primärrohstoffen Wettbewerbsnachteile mit sich bringt (HDB 2021). Ändern ließe sich dies durch klare Regeln zum *Ende der Abfalleigenschaft*. Gemäß § 5 Abs. 2 KrWG ist die Bundesregierung zwar ermächtigt, durch Rechtsverordnung näher zu bestimmen, unter welchen Bedingungen für bestimmte Stoffe oder Gegenstände die Abfalleigenschaft entfällt (Kap. 2.2.1).¹⁰⁷ Diese Ermächtigungsgrundlage wurde für mineralische Bauabfälle aber bislang nicht in Anspruch genommen¹⁰⁸ – auch in der vom Bundestag verabschiedeten Fassung der ErsatzbaustoffV sind keine Regelungen enthalten, die die qualitätsgesicherten Ersatzbaustoffe als Produkt einstufen. Die Erarbeitung entsprechender Verordnungen (wie im Koalitionsvertrag der aktuellen Bundesregierung vorgesehen; SPD et al. 2021, S. 34) würde bundeseinheitliche Standards etablieren und könnte so dabei helfen, die Akzeptanz und Wettbewerbsfähigkeit von Recyclingbaustoffen zu stärken.

Halten die aufbereiteten Materialien bestimmte chemische und physikalische Eigenschaften ein, könnten Bauprodukthersteller die Abnahme garantieren (dazu und zum Folgenden Muchow et al. 2022, S. 90). Entscheidend für eine erfolgreiche Einführung entsprechender Vereinbarungen ist – neben der Klärung der Frage zum Ende der Abfalleigenschaft –, dass die Qualitätsanforderungen der Sekundärrohstoffe klar definiert sowie transparent nach außen kommuniziert werden. Vorbild für diese Art der Vereinbarung ist die deutsche Gipsindustrie. Der Bundesverband der Gipsindustrie e. V. (GIPS o.J.) hat in Kooperation mit einer Vielzahl von Gipswerken 2014 Qualitätsempfehlungen zur Rücknahme von Recyclinggips entwickelt und veröffentlicht. Für Recyclinggips, der die Parameter einhält, garantieren die Gipswerke die Abnahme.

Fazit zu den Fallstudien

Die drei Fallstudien bestätigen, dass Deutschland über eine gut ausgestattete und leistungsfähige Abfallwirtschaft verfügt. Bei den Patentanmeldungen im Bereich »Technik für die Abfallwirtschaft« gehört Deutschland zur Weltspitze, im Bereich der »Abfallbehandlung« ist das Land fünfter im internationalen Ranking (Prognos/INFA 2020, S. 136). Bei Multimetallrecycling sind deutsche Unternehmen (z. B. Aurubis, Hamburg) weltweit führend. Auch wenn Deutschland keine Spezialisierung im Bereich des Recyclings von Kunststoffen aufweist, hat das Land den höchsten Anteil an internationalen Patentfamilien in dem Feld (EPO 2021, S. 8). Doch eine starke Abfallwirtschaft resultiert nicht unbedingt in einer starken Kreislaufwirtschaft – auch dies wird durch die Fallbeispiele veranschaulicht. Status quo, Hemmnisse und Potenziale bei Rückgewinnung sowie Einsatz von Rezyklaten lassen sich für die drei Bereiche wie folgt zusammenfassen:

- › *Verpackungsabfälle aus Kunststoff*: Um die im VerpackG vorgeschriebene werkstoffliche Verwertungsquote für Kunststoffe von 70 Massen-% zu erreichen, sind verstärkte Anstrengungen notwendig. Insbesondere liegt der Stand der Technik bei Recyclingunternehmen teils weit hinter dem technisch Machbaren zurück. Erforderlich wären vor allem Investitionen in moderne Sortiertechniken (Sortierung nach Kunststoffsorte, Materialform und Farbe), die zu einer höheren Sortierquote beitragen. Als Investitionshürde erweisen sich jedoch

¹⁰⁶ Die Vorgabe gilt auch für Bauten des Kantons Zürich, wenn der R-Beton in einem Umkreis von 25 Kilometern verfügbar ist. Zu beachten ist dabei, dass es in der Schweiz relativ strenge Vorgaben gibt, wann ein Beton als R-Beton gilt – nämlich erst dann, wenn der Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung mind. 25 % beträgt (Muchow et al. 2022, S. 39). In Deutschland gibt es eine solche Mindestschwelle bislang nicht.

¹⁰⁷ Alternativ können Regelungen zum Ende der Abfalleigenschaften auch auf Ebene der Bundesländer getroffen werden, da die Abfallwirtschaft nach Art. 74 Abs. 1 Nr. 24 Grundgesetz zu den konkurrierenden Gesetzgebungszuständigkeiten zählt (Muchow et al. 2022, S. 63).

¹⁰⁸ So gelang es der Gipsindustrie beispielsweise nicht, den aufbereiteten Recyclinggips als Produkt unter Anwendung von § 5 Abs. 1 KrWG einzustufen. Die jeweils zuständigen abfallrechtlichen Behörden forderten eine Genehmigung im Einzelfall, die letztlich für alle Gipsrecyclinganlagen im Rahmen der Bundesimmissionsschutzgenehmigung erarbeitet werden konnten (Muchow et al. 2022, S. 63).

die niedrigen bzw. volatilen Preise von Primärrohstoffen, die sich – in Kombination mit kostengünstigen thermischen Verwertungsverfahren und teils hohen regulatorischen Anforderungen an den Rezyklateinsatz – negativ auf die Wirtschaftlichkeit des werkstofflichen Recyclings auswirken (Kap. 3.1.3). Für Verpackungsabfälle, die für das werkstoffliche Recycling nicht geeignet sind, kommen perspektivisch innovative Recyclingverfahren wie das chemische Recycling oder das bioenzymatische Recycling für ausgewählte Kunststofftypen infrage. Dennoch sind die ökologischen Vorteile insbesondere der bestehenden chemischen Verfahren mit hohen Unsicherheiten behaftet und die Datenlage für eine Bewertung ist derzeit noch äußerst lückenhaft (Kap. 3.1.2). Stellschrauben sind aber nicht nur auf technischer Ebene zu sehen. Als zentrale Hemmnisse für ein hochwertiges Recycling erweisen sich die komplexe Zusammensetzung der Verpackungen sowie die fehlende Transparenz bezüglich Produktinformationen. Hier braucht es höhere Anreize für ein recyclingfähiges Verpackungsdesign, zusammen mit dem systematischen Einsatz von Markern zur Kennzeichnung und automatischen Erkennung von Kunststoffen bzw. Verpackungen. Ein weiteres Hemmnis besteht darin, dass die Sammlung über duale Systeme zu heterogenen Abfallgemischen führt, die nur mit hohem Aufwand sortenrein zu trennen sind. Hohe Rezyklateinsatzquoten sind deshalb vor allem dort vorzufinden, wo durch spezifische Sammelsysteme eine hochgradig sortenreine Abfallerfassung erfolgt (z. B. PET-Pfandsysteme). Zu überlegen wäre deshalb, inwiefern solche Lösungen auf weitere Verpackungsprodukte erweitert werden können. Zusätzlich sind auch die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für werkstoffliches Recycling zu verbessern, beispielsweise über Maßnahmen, die zu einer Verteuerung von Primärkunststoffen führen.

- > *Elektro- und Elektronikabfälle:* Nominal werden die geforderten Recyclingquoten bei den verschiedenen Gerätekategorien zwar erreicht und bei den Massenmetallen (Kupfer, Aluminium, Eisen) vergleichsweise hohe Rückgewinnungsquoten erzielt (Dittrich et al. 2021, S. 41). Allerdings ist die Sammlung von Elektro- und Elektronikgeräten unvollständig und die geforderte Sammelquote von 65% wird deutlich verfehlt (Kap. 3.2.1). Daneben behindert vor allem die bislang kaum demontage- und recyclinggerechte Gestaltung der Produkte sowie die komplexe Materialzusammensetzung von Elektroschrott ein hochwertiges Recycling. Durch Schreddern der Materialien (bei der Demontage) gehen vor allem gering konzentrierte Metalle dissipativ verloren. Die anschließenden Recyclingprozesse basieren auf metallurgischen Verfahren, sind technisch äußerst anspruchsvoll und für gering konzentrierte Metalle besonders aufwendig. Entsprechend sind die Rückgewinnungsquoten bei kritischen Metallen (bis auf Ausnahmen wie Gold, Silber und Palladium) meist marginal. Verbesserungen des Recyclings könnten zum einen durch Sortiertechnologien erreicht werden, welche eine zielgenaue, legierungsspezifische Trennung der Stoffströme ermöglichen. Für die Rückgewinnung kritischer Metalle (z. B. Seltene Erden), die mit den bestehenden metallurgischen Verfahren nicht effizient durchführbar ist, müssen zum anderen innovative Verfahren weiterentwickelt werden (Kap. 3.2.2). Die Verbesserung der Recyclingprozesse ist für sich alleine genommen aber nicht ausreichend, um die Rückgewinnungsquoten metallischer Wertstoffe zu erhöhen. Vielmehr müssen sie Hand in Hand gehen mit Verbesserungen bei Produktgestaltung und -information (Design für Recycling) sowie bei den Sammelsystemen (z. B. Einführung eines Pfandsystems).
- > *Mineralische Bau- und Abbruchabfälle:* Hier werden die EU-Zielvorgaben für die Verwertung zwar klar übertroffen. Dennoch spielen hochwertige Verwertungswege, insbesondere der Einsatz von Recyclingbaustoffen im Hochbau, noch eine untergeordnete Rolle und liegen teils weit hinter den Möglichkeiten zurück (Kap. 3.3.1; Dittrich et al. 2021, S. 42). Das liegt nicht an limitierten Aufbereitungstechniken, die hauptsächlich auf mechanischen Verfahren beruhen und deutlich weniger anspruchsvoll sind als bei den beiden anderen Bereichen (Kap. 3.3.2). Die hauptsächlichsten Barrieren sind vielmehr darin zu sehen, dass – neben billigen Entsorgungsoptionen (Verfüllungen etc.) und einer in der Praxis mangelhaft umgesetzten Getrennthaltungspflicht (Kap. 3.3.1) – Sekundärrohstoffe nicht mit Primärrohstoffen konkurrieren können, was zum einen auf preisliche Nachteile, zum anderen auf Akzeptanzprobleme zurückzuführen ist. Die Folge ist eine Gemengelage, in der der Konkurrenzdruck von aufbereitungsarmen und kostengünstigen Entsorgungsoptionen so hoch ist, dass für die Betreiber von Aufbereitungsanlagen kein ausreichender wirtschaftlicher Anreiz besteht, hochwertige Recyclingbaustoffe aufwendig zu produzieren. Zur Überwindung dieser Hemmnisse wäre zum einen die Optimierung der Sammlung von Bauabfällen (sortenreine Erfassung und Aufbereitung) wichtig, zum anderen eine Stärkung der Abnahmemärkte für Recyclingbaustoffe, z. B. über eine öffentliche Beschaffung mit Vorbildfunktion.

Die Beispiele Elektro- sowie Bau- und Abbruchabfälle machen exemplarisch deutlich, dass die Recycling- bzw. Verwertungsquote kein besonders guter Indikator für erfolgreiches zirkuläres Wirtschaften ist. Beide Abfallbereiche weisen beeindruckende Recyclingraten auf (jeweils über 80%), die sich jedoch nicht in einer entsprechend hohen Rezyklateinsatzquote widerspiegeln. So lag die zirkuläre Materialnutzungsrate (CMU), die das Verhältnis der im Kreislauf geführten Materialien zur gesamten Rohstoffnutzung abbildet, laut Berechnungen von Dittrich et al. (2021, S. 34) bei den metallischen Erzen bei 32,9% und bei den nichtmetallischen Mineralien bei 17,5%. Dies zeigt, dass anhand der Recyclingquote die Nutzung von Sekundärrohstoffen und damit der Erfolg der Kreislaufwirtschaft überschätzt wird. Die Recyclingquote hat keine Aussagekraft darüber, wie viel recyceltes Material tatsächlich in das Wirtschaftssystem zurückfließt (KRU 2019, S. 8; Raatz et al. 2022a, S. 142). Da auch die Berechnung der CMU auf den Recyclingquoten basiert (Kap. 2.3), ist zu konstatieren, dass die statistische Datengrundlage für eine differenzierte Beurteilung des tatsächlichen Rezyklateinsatzes in den verschiedenen Materialbereichen bislang nicht ausreichend ist. Gefordert wird deshalb die Entwicklung geeigneter Indikatoren, die den Erfolg der Kreislaufwirtschaft bzw. den Rezyklateinsatz realistischer bemessen (z. B. Handke et al. 2019; KRU 2019). In der Diskussion ist insbesondere die Einführung einer Substitutionsquote bzw. Rezyklateinsatzquote, welche »die eingesetzte Menge Sekundärrohstoffe an der insgesamt nachgefragten Menge an Primär- und Sekundärrohstoffen« auf Produkt- oder Rohstoffebene bestimmt (Dittrich et al. 2021, S. 26 f.). Die empirische Datenbasis für die Berechnung einer solchen Quote ist bislang jedoch unzureichend und müsste erst durch ein geeignet ausgestaltetes Monitoring aufgebaut werden (KRU 2019).

Der übergreifende Blick auf die Fallbeispiele zeigt, bei allen Unterschieden zwischen den Produktbereichen, deutliche Parallelen bezüglich typischer Hemmnisse für eine erfolgreiche Kreislaufführung: Dazu gehören ein Produktdesign, das nicht auf Langlebigkeit und Recyclingfähigkeit ausgerichtet ist, eine unzureichende resp. nichtsortenreine Sammlung der Abfälle sowie insgesamt ungünstige ökonomische sowie rechtliche Rahmenbedingungen, welche das Recycling bzw. den Rezyklateinsatz unattraktiv oder gar unwirtschaftlich machen. Vor diesem Hintergrund sind steuernde Maßnahmen erforderlich, um die Kreislaufwirtschaft zu optimieren. Klar ist, dass dafür neue Politikinstrumente benötigt werden, die weit über das bestehende abfallrechtliche Instrumentarium hinausgehen und die gesamte Wertschöpfungskette und alle daran beteiligten Akteure einbeziehen (Rohstoffproduzenten, Produkthersteller, Handel, Konsument/innen und abfallwirtschaftliche Unternehmen; Kap. 2.3). Die große Herausforderung wird darin bestehen, diese Instrumente produkt- bzw. abfallspezifisch auszugestalten und sinnvoll in den bestehenden Politikmix zu integrieren. Möglichkeiten dazu werden im folgenden Kapitel besprochen.

Zu beachten ist, dass die Fallstudien der exemplarischen Darstellung relevanter Fragstellungen dienen, die sich bei der Verbesserung des Rezyklateinsatzes stellen. Sie bieten keinen vollständigen Überblick über die komplexen technischen, rechtlichen sowie wirtschaftlichen Rahmenbedingungen bei den jeweiligen Abfallströmen. Aus wissenschaftlicher Sicht ist vor allem bei den Bauabfällen eine Vertiefung notwendig, um Lösungsansätze zur Steigerung des Rezyklateinsatzes angemessen beleuchten zu können.

4 Politikinstrumente zur Steigerung des Rezyklateinsatzes

Wie die Fallstudien in Kapitel 3 zeigen, wird das Ziel, den Anteil von Rezyklaten in Produkten zu erhöhen, noch durch zahlreiche regulatorische und ökonomische Hemmnisse behindert (wie z. B. zu niedrige Preise für Primärrohstoffe). Insofern stellt sich immer dringlicher die Frage, welche Politikinstrumente bei der Überwindung dieser Hemmnisse helfen und zur Steigerung der Nachfrage für Rezyklate effektiv beitragen können. Politikinstrumente sind Werkzeuge, die dazu dienen, politisch definierte Ziele zu erreichen. Sie lassen sich in verschiedene Typen oder Klassen einteilen, abgestuft nach Grad des staatlichen Zwangs, der mit dem jeweiligen Instrumententyp verbunden ist (Ingold 2022, S. 3 f.). Üblich ist die Dreiteilung nach regulativen, ökonomischen sowie kooperativen Instrumenten (freiwillige Vereinbarungen), die auch hier zugrunde gelegt wird, auch wenn sich Instrumente in der Praxis nicht immer trennscharf der einen oder anderen Kategorie zuordnen lassen.

Die fehlende Trennschärfe ergibt sich zum Teil auch daraus, dass in der Praxis zumeist mehrere Instrumente in einem Politikmix eingesetzt werden, um ein definiertes Ziel zu erreichen. Ein typisches Beispiel für einen Politikmix im Bereich Recycling- und Rezyklatpolitiken sind Systeme der erweiterten Herstellerverantwortung. Diese Systeme umfassen eine Vielzahl von Politikinstrumenten (z. B. Pfandsysteme, Recyclingprogramme oder die Delegation der operativen Entsorgungsverantwortung an dritte Dienstleistende), mit denen das Ziel verfolgt wird, dass Produzierende eine größere finanzielle oder auch operative Verantwortung für die Umweltauswirkungen ihrer Produkte entlang der Wertschöpfungskette übernehmen (Postpischil/Jacob 2017, S. 11). Die Entscheidung für einen Politikmix erfolgt unter der Vorstellung, dass die meisten Politikinstrumente Schwächen aufweisen und ein Instrument die Schwächen eines anderen im Idealfall kompensiert. Beispielsweise kann ein Instrument, welches eine finanzielle Belastung für Verbraucher/innen mit sich bringt, mit Maßnahmen flankiert werden, die die sozialen Auswirkungen abfedern, damit die politischen Maßnahmen in ihrer Kombination auf gesellschaftliche Akzeptanz stoßen (Ingold 2022).

In diesem Kapitel werden anknüpfend an die stoffstromspezifischen Betrachtungen in den Fallbeispielen (Kap. 3) instrumentelle Möglichkeiten zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes übergreifend systematisiert und diskutiert. Dabei wird nicht der Anspruch erhoben, eine vollständige Analyse von Instrumenten zu leisten, die für die Stärkung des Rezyklateinsatzes relevant sind bzw. sein könnten. Stattdessen wurde eine Auswahl auf Basis der folgenden Kriterien getroffen:

- › Relevanz des Politikinstrumentes in den Fallstudien sowie im aktuellen politischen Diskurs
- › Eignung zur Überwindung von bestehenden Hemmnissen für den Rezyklateinsatz
- › erfolgreiche Umsetzung in anderen Ländern

Auf Basis der vorhandenen Sekundärliteratur und des jeweiligen Forschungsstandes¹⁰⁹ werden im Folgenden für jede Instrumentenkategorie (regulativ, ökonomisch, kooperativ) relevante Politikinstrumente zur Steigerung des Rezyklateinsatzes beschrieben und Anforderungen an die Umsetzung skizziert. Eingegangen wird auf den jeweiligen Stand der Einführung in Deutschland und es werden Praxisbeispiele aus dem Ausland vorgestellt. Außerdem wird die Einordnung in den Politikmix diskutiert sowie auf mögliche flankierende Maßnahmen hingewiesen, durch die etwaige Nebenwirkungen gemildert werden können. Bei den folgenden Ausführungen handelt es sich um eine überarbeitete, gekürzte sowie punktuell ergänzte und aktualisierte Fassung des Gutachtens von Hinzmann et al. (2022).

¹⁰⁹ Festzuhalten ist, dass es insgesamt recht wenige Studien gibt, in denen gezielt Politikinstrumente für den Rezyklateinsatz in den Blick genommen werden. Deutlich häufiger werden Politikinstrumente für den Rezyklateinsatz als Teil von Studien mit breiterem Fokus etwa auf Ressourceneffizienzpolitiken oder Kreislaufwirtschaftspolitiken untersucht.

4.1 Regulative Instrumente

Regulative Instrumente setzen auf direkte Steuerung zur Beeinflussung gesellschaftlichen Handelns. Unter diese Kategorie fallen alle Arten von rechtlich gesetzten Vorschriften, Geboten, Verboten, Verordnungen, Erlassen etc. sowie Regeln, Normen oder Standards (Blum/Schubert 2018, S. 123). Zu den regulativen Instrumenten zur Steigerung der Nachfrage nach Rezyklaten zählen zum einen gesetzliche Produktstandards, mit denen verpflichtende Anforderungen an spezifische Produktgruppen definiert werden (Agora Energiewende/Wuppertal Institut 2019, S. 142). Je nach Ausgestaltung werden damit verschiedene Ziele verfolgt, die sich unterschiedlichen Instrumenten zuordnen lassen (Johansson/Forsgren 2020):

- › Vorgaben zu Mindesteinsatzquoten für Rezyklate, um die Nachfrage nach Sekundärrohstoffen zu erhöhen,
- › Vorgaben zum Produktdesign (z. B. zur Demontierbarkeit und Recyclingfähigkeit), um werkstoffliches Recycling zu erleichtern,
- › Vorgabe von Kriterien zum Ende der Abfalleigenschaft, um das Handling von Sekundärrohstoffen durch rechtliche Anerkennung zu vereinfachen.

Zum anderen gehören zu den regulativen Instrumenten auch informatorische Instrumente, die dazu dienen, notwendiges Wissen für die Erfüllung staatlicher Aufgaben zu generieren oder Informationsflüsse zwischen verschiedenen Adressaten sicherzustellen.

4.1.1 Mindesteinsatzquoten für Rezyklate

Häufig fehlt bislang eine verlässliche Nachfrage nach Sekundärrohstoffen, sodass Investitionen in die notwendigen Infrastrukturen zu deren Bereitstellung wenig attraktiv sind, wie in den Fallstudien für Kunststoffrezyklate (Kap. 3.1.3) oder Elektro- und Elektronikabfälle (Kap. 3.2.3) aufgezeigt wurde. Hier setzt die Vorgabe verpflichtender Mindesteinsatzquoten für Rezyklate an. Sie garantiert den Verwertern eine absehbare Mindestabsatzmenge, auf deren Basis notwendige Investitionen in eine hochwertige Aufbereitungsinfrastruktur getätigt werden können. Mit Rezyklateinsatzquoten werden außerdem Anreize geschaffen, die entsprechenden Abfälle stärker als bisher getrennt zu erfassen und dem Recycling zuzuführen, anstatt sie z. B. energetisch zu verwerten, minderwertigen Nutzungen zuzuführen oder zu deponieren. Die Quote kann an verschiedenen Stellen in der Wertschöpfungskette auferlegt werden und so z. B. für Materialhersteller oder aber die Hersteller von Endprodukten gelten (Hogg et al. 2016, S. 48).

Mindestquoten für den Rezyklateinsatz werden aktuell insbesondere auf EU-Ebene diskutiert und sind damit auch in Deutschland auf der politischen Agenda. Mit der Einwegkunststoffrichtlinie wurde in der EU eine Mindesteinsatzquote für Rezyklate bei PET-Getränkeflaschen von 25 % ab 2025 und von 30 % ab 2030 beschlossen. Darüber hinaus ist von der Europäischen Kommission (EK 2020a) vorgesehen, verbindliche Anforderungen an den Rezyklatanteil von Batterien sowie Kunststoffprodukten (bei weiteren Verpackungen, Baustoffen sowie Fahrzeugen) einzuführen. Mindestrezyklateinsatzquoten für Kunststoffverpackungen gibt es z. B. bereits in den USA in mehreren Bundesstaaten (Kasten 4.1).

Kasten 4.1 USA – Mindestrezyklateinsatzquoten für Verpackungen

In den USA wurden Mindestrezyklateinsatzquoten für Verpackungen in mehreren Staaten eingeführt. Kalifornien erließ bereits 1995 erste Regulierungen, die seitdem weiterentwickelt wurden. Seit dem 1. Januar 2022 müssen Getränkeflaschen aus Kunststoff einen Rezyklatanteil von 15 % aufweisen, der bis 2025 auf 25 % und bis 2030 auf 50 % erhöht wird. Die Hersteller sind verpflichtet, jährlich einen Bericht vorzulegen und für jedes Pfund, das die Anforderungen nicht erfüllt, eine Geldsumme von 0,20 US-Dollar zu zahlen (CalRecycle o.J.).

In Washington verpflichtet ein neues Kunststoffgesetz von 2021 die Hersteller unterschiedlicher Einwegkunststoffprodukte zu einem Mindestanteil an recyceltem Kunststoff in ihren Produkten (Washington State Department of Ecology o.J.). Seit dem 1. Januar 2023 gelten dort die ersten Mindestquoten für Getränk-

keflaschen und Müllsäcke. Ab 2025 wird für Kunststoffflaschen, die für Haushaltsreiniger und Körperpflegeprodukte verwendet werden, ein Mindestanteil von 15 % an recyceltem Inhalt vorgeschrieben, welcher wiederum bis 2031 auf 50 % steigt. Diese Anforderungen werden 2028 auf Plastikmilchflaschen ausgeweitet, für die ab 2036 eine Quote von 50 % gilt (Balkan 2021, S. 7). Die Strafen entsprechen denen in Kalifornien.

Anforderungen an die Umsetzung

Eine Mindesteinsatzquote für Rezyklate kann einen hohen Vollzugaufwand mit sich bringen, insbesondere wenn die Anzahl der Adressaten hoch und die Struktur der Wertschöpfungsketten komplex ist. Außerdem ist Downcycling nicht ausgeschlossen, denn gefördert wird ausschließlich die Steigerung der eingesetzten Mengen und nicht die Qualität der Rezyklate (Betz et al. 2022, S. 140 f.). Ein nichtintendierter Effekt könnten Verlagerungseffekte sein. Zielvorgaben für bestimmte Produkte, z. B. ein verpflichtender Rezyklatanteil in T-Shirts, würden so voraussichtlich dazu führen, dass mehr recyceltes Material für diesen spezifischen Zweck verwendet wird und sich die Nachfrage nach Rezyklaten einfach von anderen Zwecken (in diesem Fall z. B. von anderen Textilien) auf den mit der Maßnahme angestrebten Zweck verlagert. Eine produktübergreifende Zielvorgabe für den Rezyklatgehalt wäre weniger anfällig für diesen Effekt (Hogg et al. 2018, S. 48). So könnten beispielsweise Inverkehrbringer von Kunststoffgranulaten dazu verpflichtet werden, für jede der von ihnen in Verkehr gebrachte Mengeneinheit einen Anteil an Rezyklat in Verkehr zu bringen (Betz et al. 2022, S. 108).

Voraussetzung für Mindestrezyklateinsatzquoten sind europäische Normen, die die erforderliche Qualität der Rezyklate für spezifische Anwendungen bestimmen. Erste Normen, wie Gütezeichen für Recyclingkunststoffe, gibt es bereits. Um Verlagerungseffekte durch Rezyklateinsatzquoten zu vermeiden und sicherzustellen, dass alle Unternehmen einer spezifischen Branche zumindest einen finanziellen Beitrag zur Erhöhung des Rezyklateinsatzes leisten, könnten außerdem Rezyklateinsatzquoten mit einem System handelbarer Zertifikate kombiniert werden (Hogg et al. 2018, S. 48 f.). Zunächst würde ein Gesamtziel für den Rezyklatgehalt der Produktion einer bestimmten Reihe von Anwendungen festgelegt. Einzelne Hersteller oder Importeure, die einen höheren Rezyklatanteil verwenden als gesetzlich festgelegt, würden dann Zertifikate erhalten, die sie an andere Hersteller oder Importeure verkaufen könnten. Die Käufer der Gutschriften wären berechtigt, diese Zertifikate als Nachweis für ihren Beitrag zur Erfüllung der Zielvorgaben zu verwenden. Bislang wird ein solcher Zertifikatehandel jedoch noch nicht in der Praxis umgesetzt.

Für Produkte, die unionsrechtlich harmonisiert sind, kann eine nationale Regelung für eine Rezyklatquote ausgeschlossen sein, solange das europäische Recht nationale Regelungen nicht ausdrücklich zulässt (UBA 2016, S. 11). Für die Einführung einer Mindestrezyklateinsatzquote müssen zudem Rezyklate in ausreichender Menge und Qualität zur Verfügung gestellt werden können (UBA 2016, S. 11). Dementsprechend bieten sich Mindestrezyklateinsatzquoten für einzelne Produktgruppen eher an als für andere. Für Verpackungen werden Mindestrezyklateinsatzquoten im Rahmen der Entwicklung von EU-Vorschriften für Verpackungen und Verpackungsabfälle intensiv diskutiert (EK 2022f). Auch der Bausektor weist gute Voraussetzungen für die Einführung einer Sekundärkunststoffquote auf, da hier viele der eingesetzten Produkte im »nicht sichtbaren Bereich« verbaut werden, sodass z. B. Probleme mit der Farbtreue von Sekundärkunststoffen nur eine untergeordnete Rolle spielen (Wilts et al. 2016, S. 631). Mindestrezyklateinsatzquoten wurden ebenfalls für Metalle in Geräten der Informations- und Kommunikationstechnologie, deren Primärextraktion besonders umweltintensiv ist, vorgeschlagen (Bleischwitz et al. 2010b, S. 27 f.; Kristof/Hennicke 2010, S. 37). Vorschriften für einen Mindestrezyklatanteil kommen zudem in bestimmten Werkstoffen von Bauteilen in Fahrzeugen oder für Textilien infrage (Loschwitz/Kopp-Assenmacher 2022, S. 361 f.).

4.1.2 Vorgaben zum Produktdesign

Beim Produktdesign wird, wie die Fallstudien zu Abfallströmen gezeigt haben (Kap. 3), bisher kaum Rücksicht auf die Materialnutzung nach dem Lebensende genommen. So lassen sich beispielsweise defekte Komponenten in Elektrogeräten nur selten austauschen und Verpackungen bestehen oft aus mehreren, schwer zu trennenden Materialien. Dieser Umstand behindert qualitativ hochwertiges werkstoffliches Recycling in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht. Mit gesetzlichen Vorgaben zum Produktdesign, durch welche die Demontier- und Recyclingfähigkeit von Produkten bereits in der Produktionsphase berücksichtigt wird, lässt sich hier Abhilfe schaffen

(Agora Energiewende/Wuppertal Institut 2019, S. 141). Die Vorgaben wären produktspezifisch zu definieren und können Elemente wie die Standardisierung von Produktkomponenten oder die Einschränkung von Verbundstoffen, seltenen Materialien, Farbstoffen und Additiven etc. umfassen. Durch anspruchsvolle Produktstandards steigen zwar die Produktionskosten (die letztlich hauptsächlich von den Käufer/innen getragen werden), jedoch werden dafür die Kosten der aufwendigeren Abfallentsorgung und -verwertung sowie entstehende Umweltbelastungen für die Allgemeinheit reduziert (Fischer et al. 2020, S. 7)).

Über EU-Recht sind einzelne Güter bereits heute reguliert. Nun schlägt die EU-Kommission mit der »Sustainable products initiative« darüber hinaus weitreichende Änderungen vor, um für eine Vielzahl von Produktgruppen Energieeffizienz- und Ressourcenschutzanforderungen durch eine neue Ökodesign-Verordnung zu regeln (Kap. 2.2.2). Die neue Verordnung soll für fast alle physischen Produkte gelten und den rechtlichen Rahmen vorgeben, mit dem Anforderungen für Umwelt- und Ressourcenschutz an Produkte gestellt werden können. Auch soll der gesamte Lebenszyklus der Produkte betrachtet werden. Entsprechend sollen die Vorgaben zu längerer Haltbarkeit, Austauschbarkeit von Einzelteilen und zu mehr Reparierbarkeit führen sowie den Einsatz von Rezyklaten und damit das Recycling insgesamt stärken (EK 2022b u. 2022e). Die neue Verordnung befindet sich aktuell im ordentlichen Gesetzgebungsverfahren.

Anforderungen an die Umsetzung

Vorgaben zur Recyclingfähigkeit oder Demontierbarkeit haben insbesondere für Güter mit geringer Recyclingquote, wie z. B. Lebensmittelverpackungen, großes Potenzial. Auch im Baubereich, z. B. für Zement-, Sand- und Kiesanteile aus Beton, sowie für Stahlprodukte, die sich im Prinzip unendlich rezyklieren lassen (wenn Verunreinigungen z. B. durch Kupfer und Nickel entfernt werden), könnten Vorgaben zur Demontage- und Recyclingfähigkeit zur Steigerung der Qualität von Rezyklaten beitragen (Agora Energiewende/Wuppertal Institut 2019, S. 143 f.). Das Europarecht sieht bereits heute die Möglichkeit vor, spezifische Anforderungen, z. B. die Wiederverwendbarkeit oder Recyclingfähigkeit, an Produkte zu stellen.¹¹⁰ Verpflichtend ist die Festlegung solcher Vorgaben bislang jedoch nicht. Um dies zu ändern, ist eine Änderung der Ökodesign-Richtlinie und je nach adressierten Produkten der Verordnung (EU) Nr. 305/2011¹¹¹ (Bauprodukteverordnung) notwendig. Entsprechende Änderungen sind für die neue Ökodesign-Verordnung geplant. Bei produktspezifischen Vorschriften müssen dabei mit Blick auf das Welthandelsrecht Vorgaben des Übereinkommens über technische Handelshemmnisse (Agreement on Technical Barriers to Trade/TBT-Übereinkommen) (insbesondere Art. 2 Nr. 2.2) beachtet werden (Agora Energiewende/Wuppertal Institut 2019, S. 145).

Nachteilig können sich gesetzliche Produktstandards zur Verbesserung der Recycling- oder Demontierbarkeit insofern auswirken, als kleinteilige Vorschriften auf Produkt- und Materialebene notwendig sind, die häufig angepasst werden müssen. Das hat einen hohen Verwaltungsaufwand zur Folge. Zudem können Mehrkosten bei der Herstellung von Gütern anfallen, die voraussichtlich an Endkunden weitergegeben werden und so zu Preissteigerungen führen. Die Kosten für Verbraucher/innen könnten jedoch mittel- bis langfristig sinken, wenn durch eine bessere Demontierbarkeit auch eine bessere Reparierbarkeit der Produkte erreicht wird und weniger Neuananschaffungen benötigt werden. Volkswirtschaftlich können längere Lebensdauern von Produkten theoretisch zu einer Reduzierung des privaten Konsums führen (Agora Energiewende/Wuppertal Institut 2019, S. 144). Allerdings werden insgesamt positive Effekte einer umfassenden zirkulären Wirtschaft für die Wertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland erwartet (Deloitte/BDI 2021; McCarthy et al. 2018). Zugleich wäre eine Verringerung des Ressourcenverbrauchs makroökonomisch eine Chance, die Abhängigkeit Deutschlands von Rohstoffimporten zu reduzieren (Agora Energiewende/Wuppertal Institut 2019, S. 144).

Um tatsächlich eine Steigerung des Rezyklateinsatzes zu bewirken, müssen Vorgaben zur Recyclingfähigkeit und Demontierbarkeit mit der Verwertungspraxis der jeweiligen Produkte gut ineinandergreifen (UBA 2016, S. 10). Hierfür kommt ggf. eine Verschärfung der Anforderungen an den Stand der Technik der Sortier- und Verwertungsbetriebe infrage (verpflichtende Prozessstandards, Kasten 4.2).

¹¹⁰ Art. 15 Abs. 6 i.V.m. Anhang 1 Ökodesign-Richtlinie sowie Art. 3 Abs. 1 i.V.m. Anhang 1 Nr. 7 Bauprodukteverordnung

¹¹¹ Verordnung (EU) Nr. 305/2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG

Kasten 4.2 Verpflichtende Prozessstandards

Die »Beste Verfügbare Technik« (BVT) ist ein zentrales Konzept der Richtlinie 2010/75/EU¹¹² (Industrieemissionsrichtlinie). BVT beschreiben den effizientesten und fortschrittlichsten Entwicklungsstand von Tätigkeiten und Betriebsmethoden, um Emissionen in und Auswirkungen auf die gesamte Umwelt zu vermeiden oder zumindest zu vermindern. Zur Konkretisierung der BVT existieren für verschiedene Branchen Merkblätter, in denen die besten verfügbaren Techniken zusammengefasst und festgelegt werden (Bayerisches Landesamt für Umwelt o.J.; UBA o.J.g).

Um Recyclingquoten zu erreichen und die Verwertungspraxis zu verbessern, wären vergleichbare Regelungen zur BVT für die Zulassung von Sortier- und Recyclinganlagen denkbar (SYSTEMIQ 2022, S. 49). So erteilen die neuen EU-Vorschriften zur Herstellung von Lebensmittelverpackungen beispielsweise die Zulassung für mehr als 200 PET-Recyclingverfahren (EK 2022a). Verpflichtende Prozessstandards könnten im Politikmix Produktstandards sinnvoll ergänzen.

Laut Milios (2018, S. 872) sollte ein umfassender Politikmix für einen wirksamen Kreislaufansatz verpflichtende Ökodesign-Vorgaben mit einem System der erweiterten Herstellerverantwortung kombinieren, wobei letzteres die Sammlung und das Recycling der jeweiligen Produkte stärkt.

4.1.3 Vorgabe von Kriterien zum Ende der Abfalleigenschaft

Die Abfalldefinition und -gesetzgebung ist zentral, um Natur und Menschen vor kontaminierten und weggeworfenen Materialien zu schützen. Gleichzeitig führt sie aber zu Hindernissen bei der Nutzung von Sekundärmaterialien. Entsprechend geht es bei rechtlichen Vorgaben zum Ende der Abfalleigenschaft darum, dass bestimmte Abfälle nicht mehr als Abfälle gelten, sondern dem Wirtschaftskreislauf wieder zugeführt werden, wenn sie einer entsprechenden Verwertung unterzogen wurden und bestimmte weitere Kriterien erfüllen (Kap. 2.2.1) (Lammers 2022, S. 19 ff.). Mit dem Ende der Abfalleigenschaft entfällt der Geltungsbereich des Abfallrechts und der damit verbundene Verwaltungsaufwand bei der Handhabung von Materialien. Klare Regelungen machen das Recycling attraktiver, fördern die Gewährleistung von Qualität und Sicherheit und verbessern die Rechtssicherheit und Harmonisierung in den Sekundärrohstoffmärkten. Das Ende der Abfalleigenschaft ist damit die Voraussetzung dafür, dass Sekundärrohstoffe zur Herstellung von Produkten verwendet werden können. Kurz gesagt ist das Ende der Abfalleigenschaft »die notwendige Voraussetzung für die Verkehrsfähigkeit von Sekundärrohstoffen« (RESAG 2022, S. 79).

Anforderungen an die Umsetzung

Die Regelungen zum Ende der Abfalleigenschaft gemäß § 5 KrWG (Kap. 2.2.1) haben sich in der Praxis als schwer umsetzbar erwiesen. Akteure auf dem Markt sind mit Wissenslücken und offenen Umsetzungsfragen konfrontiert (Kap. 3.3.3). So kann das Ende der Abfalleigenschaft gemäß § 5 KrWG manchmal erst durch die Nachfrage eines Produkts am Markt sicher festgestellt werden. Das »in den Markt bringen« kann aber wiederum daran scheitern, dass das Ende der Abfalleigenschaft nicht festgestellt wird bzw. werden kann (RESAG 2022, S. 90). Schwierigkeiten ergeben sich auch durch die Schnittstelle zwischen europäischem Chemikalien- und Abfallrecht bei der häufig kontroversen Abgrenzung zwischen Produkt und Abfall, welche bei stofflichen Verwertungsverfahren und der Entstehung von Sekundärrohstoffen besondere Relevanz hat. Eine Sonderarbeitsgruppe zur Stärkung des Rezyklateinsatzes von Kunststoffen der Umweltministerkonferenz (besetzt mit Akteuren aus Politik, Wirtschaft und angewandter Forschung) forderte mehr Rechtssicherheit durch eine klare und praxisnahe Regelungssystematik. Bestenfalls soll diese durch eine oder mehrere Verordnungen der EU, notfalls durch Regelungen des Bundes zum Abfallende umgesetzt werden (RESAG 2022, S. 34).

In der letzten Dekade ist die Umsetzung von Regelungen zum Ende der Abfalleigenschaft in der EU weitgehend gescheitert, da es sich als schwierig erwiesen hat, sich auf gemeinsame Kriterien zu einigen (Johansson/Forsgren 2020). Allerdings sieht der neue EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft von 2020 eine Prüfung der

¹¹² Richtlinie 2010/75/EU über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) (Neufassung)

Kommission mit Blick auf den Erlass weiterer Abfalleneuerordnungen vor. Es werden jedoch keine bestimmten Stoffströme als Kandidaten für neue Regelungen benannt (Lammers 2022, S. 21). Definitionen für prioritäre Abfallströme werden derzeit durch die Europäische Kommission (EK o.J.d) erarbeitet. Solange keine neuen Abfalleneuerordnungen durch die EU erlassen werden, könnte der Bund bzw. das Umweltbundesamt eine Handlungsempfehlung zur Erreichung des Endes der Abfalleigenschaft nach § 5 KrWG erstellen, ggf. in Kombination mit dem Erlass von bindenden Regelungen (RESAG 2022, S. 78). Auch die aktuelle Bundesregierung hat das Thema »Ende der Abfalleigenschaft« auf der Agenda und sich in ihrem Koalitionsvertrag vorgenommen, qualitätsgesicherte Abfallprodukte aus dem Abfallrecht zu entlassen und ihnen Produktstatus zu geben (SPD et al. 2021, S. 42). Vor diesem Hintergrund plant das BMUV aktuell eine eigenständige Verordnung mit Kriterien für das Ende der Abfalleigenschaft bestimmter mineralischer Ersatzbaustoffe (EUWID 2022a).

4.1.4 Informationspflichten und digitale Informationswerkzeuge

Informationspflichten dienen dem Staat dazu, notwendiges Wissen für die Erfüllung seiner Aufgaben zu generieren und Informationsflüsse zwischen verschiedenen Adressaten sicherzustellen. Verpflichtende Vorgaben zu Produktinformationen sind ein wichtiges Mittel der Marktüberwachung. Auf der EU-Ebene besteht eine Reihe von Informationspflichten für das Inverkehrbringen von Waren. Informationspflichten gelten beispielsweise für bestimmte Produktgruppen (u. a. Kühlgeräte und Klimaanlage) bezüglich des Energieverbrauchs. Informationspflichten bestehen auch über die REACH-Verordnung für Chemikalien, die in der EU hergestellt oder importiert werden (Kap. 2.2.2).

Verpflichtende Vorgaben zu Produktinformationen können dabei helfen, informatorische Hemmnisse zu überwinden, die ein hochwertiges Recycling von bestimmten Abfallströmen bremsen. Fehlende Informationen hinsichtlich Materialzusammensetzung und Demontage von Produkten, möglicher Störstoffe oder der Verwendung schädlicher Substanzen können den fachgerechten Recyclingprozess massiv behindern. Verbindliche Informationspflichten sorgen dafür, dass die entsprechend benötigten Daten entlang der Lieferkette transparent weitergegeben werden. Für bestimmte Abfallströme könnte damit die Basis für eine sortenreine Abfalltrennung und ein hochwertiges Recycling geschaffen werden; aber auch die Reparierbarkeit und die Wiederverwendbarkeit von Produkten kann so unterstützt werden. In Frankreich z. B. sind Hersteller von Elektrogeräten dazu verpflichtet, Informationen über die Verfügbarkeit von Ersatzteilen zur Verfügung zu stellen (Ministry for an Ecological and Solidary Transition 2018, S. 19).

Auf technischer Ebene lassen sich Informationspflichten beispielsweise in Form digitaler Produktpässe umsetzen: Ein digitaler Produktpass stellt einen Datensatz dar, der verschiedene Produktinformationen aus allen Phasen des Produktlebenszyklus zusammenfasst, z. B. Zusammensetzung, verwendete chemische Substanzen, Reparierbarkeit, ordnungsgemäße Entsorgung (Adisorn et al. 2021). Die Informationen können elektronisch registriert und bearbeitet und auf digitalem Wege zwischen verschiedenen berechtigten Personen ausgetauscht werden (Unternehmen, Behörden, Verbraucher/innen) (Götz et al. 2022). Für staatliche Akteure kann die Marktüberwachung und die Kontrolle über die Einhaltung von Vorschriften durch digitale Produktpässe dadurch erheblich erleichtert werden. Das besondere Potenzial der digitalen Produktpässe für das Recycling besteht darin, dass sie für verschiedene Akteure der Wertschöpfungskette die für sie relevanten Produktinformationen zuverlässig und schnell zugänglich machen können. Über maschinenlesbare Datenträger (z. B. NRF-Transponder, QR-Codes) könnte es so ermöglicht werden, relevante Informationen automatisiert in Sortier- und Recyclinganlagen auszulesen (Götz et al. 2021). Dadurch können Recyclingprozesse effizienter gestaltet und bessere Sortierqualitäten erzielt werden, was wiederum qualitativ und quantitativ neue Möglichkeiten für den Einsatz von Rezyklaten eröffnet. Initiativen, die tatsächlich auf dem Markt angewendet oder zumindest erprobt werden, kommen größtenteils aus der Privatwirtschaft; teilweise bestehen Kooperationen mit staatlichen Akteuren (Jansen et al. 2022).

Anforderungen an die Umsetzung

Eine wichtige Voraussetzung für die Festlegung von Informationspflichten ist eine Harmonisierung der erforderlichen Angaben. Aktuell plant die EU als Teil der »Sustainable product initiative«, digitale Produktpässe für alle Produkte einzuführen, die unter die Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte fallen sollen (wie z. B. Textilien, Elektrogeräte). Kennzeichnungsanforderungen wird es z. B. in Bezug auf die Reparierbarkeit von Produkten geben. Auch die neuen EU-Energieetiketten werden zusätzliche Informationen zu Kreislaufwirtschaftsaspekten einbeziehen, wie z. B. einen Reparaturwert. Für andere Produkte wird ein neues Ökodesignlabel entsprechende Informationen enthalten (EK o.J.b, S. 6). Die Einführung digitaler Produktpässe für Batterien wurde bereits beschlossen (Gumbau 2022). Auch auf nationaler Ebene sollen laut Koalitionsvertrag digitale Produktpässe und ein digitaler Gebäuderessourcenpass eingeführt werden (SPD et al. 2021, S. 71).¹¹³ Für die konkrete Umsetzung müssen entsprechende Normen und Standards entwickelt werden. Melde- und Registrierungsstrukturen, Anforderungen an Datenübergabe und Bestimmung von datenschutztechnischen Voraussetzungen unter Berücksichtigung des öffentlichen Interesses werden in Österreich und in Finnland diskutiert und zum Teil bereits umgesetzt (Schiller et al. 2022). Es existieren bereits privatwirtschaftliche Initiativen (Kasten 4.3), auf denen gesetzliche Vorhaben und Standardisierungsprozesse aufbauen können.

Kasten 4.3 Offener Datenstandard für digitale Produktpässe der Textilindustrie

Im Textilbereich hat das Start-up circular.fashion UG (2020) den offenen Datenstandard »circularity ID®« entwickelt. Als Basis für diesen Standard wurde berücksichtigt, welche Informationen einerseits Recycler und Sortierer benötigen und welche Daten Hersteller und Modemarken andererseits bereitstellen können. Somit stellt der Datenstandard eine Art Bestandsaufnahme dessen dar, was für das Recycling notwendig und möglich ist. Die Daten werden in einer Datenbank gespeichert und können zusätzlich durch die Hersteller über einen physischen Datenträger (z. B. NFC-Transponder) zur Verfügung gestellt werden, um eine automatisierte Sortierung zu ermöglichen. Circular.fashion hat dafür eine Sortiersoftware für Abfallmanager/innen entwickelt, die auf die hinterlegten Daten zugreifen und so feststellen kann, welcher Abfallfraktion ein Textil zugeordnet werden soll (Duhoux et al. 2021).

Transparenzstandards und -pflichten sind – wie andere Politikinstrumente auch – nicht die alleinige Lösung zur Stärkung des Rezyklateinsatzes. Die Einführung von verpflichtenden Informationsstandards erscheint jedoch als Schlüsselinstrument einer echten Kreislaufwirtschaft in einem gut abgestimmten Politikmix besonders sinnvoll (Adisorn et al. 2021; Götz et al. 2021, S. 13). Informationen über Mengen und Qualitäten von Produkten und die in ihnen enthaltenen Rohstoffe könnten nämlich »das fehlende Bindeglied zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft darstellen« (Wilts 2021, S. 16). Dabei ergänzen sich Transparenzstandards und -pflichten besonders gut mit Vorgaben zum Ökodesign (Adisorn et al. 2021; Milios 2018).

Auch die Umsetzung von nachfrageseitigen Instrumenten wird durch die zusätzlichen Informationen, die Transparenzinstrumente wie Produktpässe liefern, unterstützt. So kann ein Produktpass nützlich für die nachhaltige öffentliche Beschaffung sein (Hochschule Pforzheim 2022). Verpflichtende Transparenzstandards erleichtern auch die Evaluierung politischer Maßnahmen, da sie es politischen Entscheidungsträger/innen erlauben, die Auswirkungen neuer oder überarbeiteter Maßnahmen besser zu erkennen und zu verstehen. Darüber hinaus können sie die Marktüberwachung ermöglichen oder verbessern, sodass ein wirksames Monitoring geltender Vorschriften stattfindet, auf dessen Basis wiederum die Durchsetzung geltender Vorschriften erfolgen kann (Götz et al. 2022).

Informationspflichten zu Materialzusammensetzung und -ursprung bringen ggf. einen erheblichen Mehraufwand für Unternehmen mit sich, weshalb nicht mehr Informationen als notwendig abgefragt werden sollten. Digitale Werkzeuge sind ein wichtiges Hilfsmittel, um die Informationsflüsse handhabbar zu gestalten. Dabei sollte möglichst sichergestellt werden, dass Unternehmen alle verlangten Produktinformationen in eine zentrale Datenbank eingeben können und nicht mehrfach in verschiedene Datenerfassungssysteme eintragen müssen (Götz et al. 2021). Darüber hinaus muss die Sicherheit der Daten gewährleistet werden. Ein Lösungsansatz besteht darin,

¹¹³ In einem Projekt für das Umweltbundesamt wurde die Erarbeitung eines Gebäudepass- und Gebäudekatasterkonzepts bereits konzipiert (Schiller et al. 2022).

über selektive Zugriffsrechte zu regeln, welche Personengruppen bestimmte Teilmengen der digitalen Produktdaten einsehen dürfen (Götz et al. 2021). Auf die Erfahrungen mit dem IMDS-System der Automobilindustrie könnte zurückgegriffen werden.

4.2 Ökonomische Instrumente

Im Unterschied zu regulativen Instrumenten entfalten ökonomische Instrumente eine indirekte Steuerungswirkung, indem über finanzielle Anreize versucht wird, das Verhalten zu beeinflussen. Diese Anreize können entweder einen materiellen Nachteil (z. B. Steuern, Abgaben) oder einen materiellen Vorteil (z. B. Subventionen, Steuererleichterungen) bieten. Es steht den Adressat/innen frei, wie sie auf diesen Anreiz reagieren (Blum/Schubert 2018, S. 186). Für die Förderung des Rezyklateinsatzes sind vor allem Steuern und Abgaben relevant, die entweder produktionsseitig- oder verbraucherseitig belastend wirken. Darüber hinaus zählen Maßnahmen zur Förderung der Nachfrage nach rezyklathaltigen Produkten im Rahmen der öffentlichen Beschaffung ebenfalls zu den zentralen ökonomischen Stellschrauben.

4.2.1 Produktionsseitige Steuern und Abgaben

Steuern und Abgaben können bei der Produktion ansetzen und dazu genutzt werden, Preissignale an Produzenten und Verbraucher/innen zu senden. Entsprechende Instrumente zielen hauptsächlich darauf ab, die externen Effekte einzupreisen, die bei der Ressourcengewinnung, -nutzung und der Entsorgung nach der Nutzungsphase auftreten. Indem Primärrohstoffe (bzw. Produkte aus diesen) besteuert werden, lassen sich so ggf. vorhandene Preisnachteile rezyklathaltiger Produkte gegenüber Neuware aus Primärrohstoffen ausgleichen. Typische Beispiele für Instrumente in dieser Kategorie sind:

- › Steuern auf den Einsatz von Primärressourcen (z. B. auf Aluminium, Kunststoff, Eisen etc.) sowie
- › Abgaben für den Abbau von Primärbaustoffen.

Adressat produktionsseitig belastender ökonomischer Instrumente sind Unternehmen, die durch die Instrumente induzierte Preiserhöhungen in der Wertschöpfungskette weiterreichen. Je nach Ausgestaltung des Instruments können Unternehmen bei der Rohstoffgewinnung (Primärrohstoffsteuer), bei der ersten industriellen Verwendung von Materialien (z. B. Materialinputsteuer) oder auch bei der Produktherstellung besteuert werden (Eckermann et al. 2015). Steuern auf Primärrohstoffe sind grundsätzlich leichter zu erheben als Steuern auf den Materialinput, da sich bei ersteren die zu besteuernde Menge leichter erfassen lässt. Allerdings kann eine Primärrohstoffsteuer nur in Ländern erhoben werden, die entsprechende Rohstoffe auch fördern. Eine Materialinputsteuer hingegen ist ein sinnvolles Instrument in Ländern wie Deutschland, die selbst nur wenige Rohstoffe abbauen (Jaeger 2013).

Durch belastende ökonomische Instrumente steigen die Kosten für die betroffenen Primärrohstoffe. Die Nachfrage nach den entsprechenden Rohstoffen bleibt in der Regel dennoch zunächst relativ konstant, weil es nur wenige oder keine Alternativen für den jeweiligen Stoff gibt und die Substitution wegen der aufwendigen Prozesse zur Gewinnung und Verarbeitung natürlicher Ressourcen (z. B. Metallverhüttung) zu kostspielig und zeitaufwendig ist. Daher können gestiegene Kosten auf Primärrohstoffe die Nachfrage nach Rezyklaten – sofern diese leicht verfügbar sind – anregen, vorausgesetzt, die Kostensteigerung ist hoch genug, um zumindest die Preisdifferenz zwischen neuen Rohstoffen und entsprechenden Recyclingrohstoffen auszugleichen. Auch eine Steigerung der Effizienz im Ressourceneinsatz sowie die Substitution durch Materialien, die weniger knapp (und damit preisgünstiger) sind, können so angeregt werden. Zudem werden Anreize für die Erforschung von Alternativen gesetzt, Innovationen induziert und ressourcensparenden Innovationen zu einer höheren Nachfrage und Marktdurchdringung verholfen (Rennings et al. 2008, S. 34).¹¹⁴

Steuern auf den Einsatz von Primärkunststoffen bei der Verpackungsherstellung werden derzeit in verschiedenen EU-Ländern intensiv diskutiert oder sind in konkreter Planung bzw. wurden teilweise schon eingeführt. So verfügt z. B. Großbritannien seit 2022 über eine Steuer auf Kunststoffverpackungen, die überwiegend aus Primärkunststoffen bestehen (Kasten 3.4). Auf der politischen Agenda stehen entsprechende Maßnahmen

¹¹⁴ So förderte beispielsweise der sehr hohe Kobaltpreis die Entwicklung kobaltfreier Batterien durch Panasonic, einem der Batteriehauptlieferanten von Tesla (Petrova 2021).

seit 2021, als auf EU-Ebene die EU-Plastiksteuer (offiziell Kunststoff-Eigenmittel) eingeführt wurde. Dabei handelt es sich um einen Beitrag von 0,80 Euro/kg, der auf der Menge der nicht recycelten Verpackungsabfälle aus Kunststoff basiert und von den Mitgliedstaaten zu entrichten ist (EK o.J.b). Jeder Staat entscheidet selbst, wie er Maßnahmen ergreift, um die Menge an Verpackungsabfällen zu verringern. Die von der EU erhobene Plastiksteuer wurde in Deutschland bisher nicht an die Hersteller weitergegeben, sondern aus dem Bundeshaushalt bezahlt (2022 waren dies 1,38 Mrd. Euro). Sie wird ab dem 1. Januar 2025 auf die Hersteller umgelegt (Bundesregierung 2024). Außerdem sieht das Einwegkunststofffondsgesetz (EWKFondsG)¹¹⁵ eine Abgabe für einige Produkte aus Einwegplastik vor (Kap. 3.1.3). Mit der im März vorgelegten und inzwischen vom Deutschen Bundestag verabschiedeten Einwegkunststofffondsverordnung (EWKFondsV)¹¹⁶ soll eine Abgabe Einwegprodukte betreffen, die am häufigsten an europäischen Stränden gefunden werden (u. a. Getränkebehälter und -becher und To-go-Lebensmittelbehälter). Die Höhe der Abgabe bemisst sich an der Art und Menge jener Produkte, die betroffene Hersteller zuvor auf den Markt gebracht haben (BMUV o.J.c). Allerdings zielt die Abgabe vor allem darauf ab, dem Littering entgegenzuwirken bzw. die Kosten von im öffentlichen Raum anfallenden Abfällen auf die Hersteller umzuwälzen (UBA o.J.e). Um eine Wirkung auf den Einsatz von Kunststoffrezyklaten zu erzielen, müsste die Abgabe – so wie in Spanien (Kasten 4.4) – den Einsatz von Rezyklaten begünstigen (RESAG 2022, S. 78). Außerdem könnte die Abgabe auf Einwegprodukte um eine Herstellerabgabe auf schwer recycelbare Kunststoffprodukte ergänzt werden, sowie auf Produkte, die nur aus Primärkunststoff bestehen. In der Diskussion ist darüber hinaus, die Recyclingfähigkeit von Verpackungen über die Erhöhung der ökologischen Beteiligungsentgelte zu stärken (Kap. 3.1.3) (RESAG 2022, S. 77).

Außerdem wird in Deutschland die Einführung einer Primärbaustoffsteuer thematisiert (Kap. 3.3.3) (Bahn-Walkowiak et al. 2021, S. 13; NABU Nordrhein-Westfalen o.J.). Erfahrungen zu diesem Instrument liegen in Großbritannien (Kasten 3.10) und Dänemark vor. Beide Länder haben Primärbaustoffabgaben in substantiellem Umfang bereits vor vielen Jahren implementiert.

Kasten 4.4 Einwegkunststoffverpackungssteuer in Spanien

Spanien und Italien haben Steuern auf Einwegplastikverpackungen beschlossen, die in ihrer Ausgestaltung ähnlich sind. Die Steuerpflicht begann jeweils am 1. Januar 2023 (EY 2022a u. 2022b) Die spanische Steuer hat einen sehr breiten Anwendungsbereich und umfasst Einwegverpackungen, die Kunststoff enthalten, halbfertige Kunststoffe, die bei der Herstellung der Verpackung verwendet werden, sowie alle Kunststoffe, die für das Verschließen, den Vertrieb oder die Aufmachung von Einwegverpackungen aus Kunststoff verwendet werden. Die Steuer bezieht sich auf leere Verpackungsmaterialien sowie verpackte Produkte und gilt für die Herstellung, die Einfuhr und den innergemeinschaftlichen Erwerb von Einwegkunststoffverpackungen für die Endverwendung auf dem spanischen Markt.

Die Steuerbemessungsgrundlage ist die Menge an Einwegkunststoffverpackungen in Kilogramm. Der Steuersatz beträgt 0,45 Euro pro kg. Recycelter Kunststoff ist nicht steuerpflichtig. Produkte, die mehr als ein Material enthalten, werden ausschließlich auf der Grundlage des Gewichts des nicht recycelten Kunststoffanteils besteuert. Ausnahmen der Steuerpflicht sieht das Gesetz für verschiedene Produktgruppen wie beispielsweise Medikamente und Sanitärprodukte vor. Auch für Kleinunternehmer, bei denen das Gewicht der Einwegkunststoffverpackungen pro Monat 5 kg nicht überschreitet, gibt es Ausnahmen (EY 2022b).

Anforderungen an die Umsetzung

Das Wirkungspotenzial von produktionsseitigen ökonomischen Instrumenten hängt wesentlich davon ab, wie stark das Preissignal ausfällt (Eckermann et al. 2015). Die entsprechende Bemessung ist daher ein entscheidendes Element für den Erfolg oder Misserfolg der Instrumente dieser Kategorie. Bei einem zu geringen Preis wird keine Lenkungswirkung erzielt. Ist der Preis hingegen (zu) hoch, steigt die Wahrscheinlichkeit von Verlagerungseffekten, die negative soziale und ökologische Folgen in anderen Ländern nach sich ziehen kann (Milios 2021). Deshalb sollte das Instrument, um die negativen Auswirkungen einer reinen Verlagerung des Abbauortes zu vermeiden, bei erheblichem Handelsaufkommen durch die Einführung eines Grenzsteuerausgleichs (nach Vorbild der

¹¹⁵ Einwegkunststofffondsgesetz vom 11.5.2023, zuletzt geändert am 11.5.2023

¹¹⁶ Einwegkunststofffondsverordnung vom 11.10.2023

Kaffeesteuer) für importierte Ressourcen begleitet werden. Ein weiterer Negativaspekt ist, dass die Verteuerung von Primärrohstoffen und entsprechenden Produkten Geringverdienende besonders hart trifft. Entsprechend sind soziale Folgewirkungen vor Einführung eines entsprechenden Instruments abzuwägen und ggf. begleitende soziale Ausgleichsmechanismen ins Auge zu fassen. In Bezug auf Ressourcensteuern sind entsprechende Ausgleichsmaßnahmen aber bisher nicht bekannt (Hinzmann et al. 2022, S. 33 f.).

Bei der Einführung produktionsseitig belastender ökonomischer Instrumente kommt es also ganz besonders auf die konkrete politische Ausgestaltung an, um sicherzustellen, dass positive Effekte überwiegen und negative Effekte abgemildert werden. Die Höhe der Steuersätze oder Abgaben wird in der Regel eher niedrig angesetzt, um negative soziale und wirtschaftliche Auswirkungen gering zu halten. Dadurch entsteht nur ein mäßiger Anreiz, um das Recycling von Abfallprodukten zu fördern. Deshalb sind meist ergänzende Instrumente wie Entsorgungssteuern, Pfandsysteme oder die Subventionierung des Sekundärrohstoffverbrauchs und Recyclings erforderlich, um eine ausreichende Lenkungswirkung zu erzielen (Bibas et al. 2021; Söderholm 2011). Darüber hinaus stellen sich weitere Fragen mit Blick auf die Umsetzbarkeit (Eckermann et al. 2015): Gibt es praktikable Lösungen für die Besteuerung von Halbfertigwaren, d. h., kann die Steuerbemessungsgrundlage genau bestimmt werden? Sind die erforderlichen Daten verfügbar und die Steuern administrativ mit vertretbarem Aufwand zu bewältigen? Welche Auswirkungen hat eine Steuer auf Wohlfahrt und Wirtschaftstätigkeit?

Mit Blick auf Primärrohstoffsteuern ist zudem noch unklar, wie eine solche Steuer in Deutschland institutionell auszugestalten wäre. Es ergibt sich zudem die Schwierigkeit, dass der Bund keine neuen Steuern erfinden darf, die ihrem Typus nach nicht schon im Grundgesetz¹¹⁷ im Finanzverfassungsrecht (Art. 104a bis 115 GG) verankert sind. Als umweltbezogene Steuern eignen sich unter den bestehenden Steuertypen insbesondere die Verbrauchssteuern (Bär et al. 2022, S. 39). Das bedeutet, die Steuer wird bei Unternehmen erhoben, die Abwälzung der Steuerlast auf die Verbraucher/innen ist jedoch vorgesehen (Bär et al. 2022, S. 76). Auf Basis der rechtlichen Möglichkeiten schlägt das Umweltbundesamt (Baronick et al. 2019, S. 7) entsprechend in seiner Position zur Einführung einer Primärbaustoffsteuer von 2019 vor, eine solche Steuer als Verbrauchssteuer auszugestalten, die in der Regel als indirekte Steuern ausgestaltet sind. Es herrscht jedoch teilweise auch die Auffassung vor, dass die Umsetzung einer Primärrohstoffsteuer als Verbrauchssteuer den gesetzlichen Rahmen einer Verbrauchssteuer sprengen würde (Bahn-Walkowiak et al. 2010, S. 31 f.). So darf sich eine Verbrauchssteuer laut Urteil des Bundesverfassungsgerichts (BVerfG 2017) zur Kernbrennstoffsteuer nicht auf »reine Produktionsmittel« beziehen, sondern muss auch einer privaten »konsumtiven Nutzung zugänglich« sein. Wie das Bundesverfassungsgericht eine Primärbaustoffsteuer hier einordnen würde, kann nicht mit abschließender Sicherheit vorhergesagt werden. Eine Alternative wäre deshalb, die finanzverfassungsrechtlichen Bestimmungen im Grundgesetz so zu ändern, dass umweltbezogene Steuern explizit ermöglicht werden, z. B. durch eine neue Steuerkategorie »Umweltbelastungssteuer« (Bär et al. 2022, S. 77; Bahn-Walkowiak et al. 2010, S. 32; Klinski/Keimeyer 2017, S. 14).

4.2.2 Verbrauchsseitige Steuern und Abgaben

Steuern und Abgaben, die beim Verbraucher ansetzen, haben grundsätzlich dasselbe Ziel wie die produktionsseitig belastenden ökonomischen Instrumente. Die nicht im Produktpreis enthaltenen, bisher auf die Gesellschaft abgewälzten Umweltkosten (z. B. Umweltverschmutzung bei nichtfachgerechter Entsorgung) sollen ausgeglichen und so durch Preissignale an die Verbraucher/innen sowie die Abfallwirtschafts- und Recyclingbranche rezyklathaltige Produkte konkurrenzfähiger gemacht werden. Im Unterschied zu den produktionsseitig belastenden ökonomischen Instrumenten belasten verbrauchsseitige Instrumente nicht die Produktion von Gütern oder Dienstleistungen, sondern setzen am Ende des Produktlebenszyklus an (Nutzung, Verwertung, Entsorgung). Damit sich aus den Preissignalen auch die gewünschte Lenkungswirkung ergibt, ist es erforderlich, dass alternative Produkte für Verbraucher/innen verfügbar sind bzw. ein Verzicht auf solche Produkte möglich ist. Beispiele für Instrumente in dieser Kategorie sind:

- Verbrauchssteuern (z. B. Steuern auf Plastiktüten oder Zement),
- Abgaben/Gebühren (z. B. auf Verpackungen oder Elektro- und Elektronikgeräte),

¹¹⁷ Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland vom 23.5.1949, zuletzt geändert am 19.12.2022

- › Pfandpflichten,
- › Steuern/Abgaben auf Entsorgungs- bzw. Verwertungspfade unterhalb eines Recyclings (Deponierung oder thermische Verwertung).

Grundsätzlich kann dabei zwischen Instrumenten unterschieden werden, die die Nutzung von Produkten besteuern, und solchen, welche Preisänderungen für die Entsorgung bzw. Verwertung von Produkten bewirken:

- › *Preisänderung bei der Nutzung*: Hierzu gehören beispielsweise Verbrauchssteuern und Abgaben auf Produkte, die mit einer höheren Ressourceninanspruchnahme einhergehen. Ziel ist es, durch negative finanzielle Anreize dafür zu sorgen, dass Verbraucher/innen Produkte konsumieren, die weniger umweltschädlich sind. Gut konzipierte Steuern oder Abgaben sollten zur Verwendung von langlebigeren und/oder nachhaltigeren Alternativen führen, die nicht mit einer Steuer oder Abgabe belastet sind (OECD o.J.; Postpischil et al. 2021, S. 1).
- › *Preisänderung bei der Entsorgung oder Verwertung*: Solche Instrumente dienen dazu, hochwertiges Recycling attraktiver zu machen, indem eine unzureichende Sammlung, unsachgemäße Entsorgung (z. B. Littering, Fehlwürfe), die Deponierung oder die thermische Verwertung verteuert werden. Dazu zählen z. B. Pfandpflichten oder Steuern bzw. Abgaben auf niedrigwertige Verwertungsverfahren – je nach Instrument werden Verbraucher/innen (z. B. Flaschen- oder Handypfand) oder Unternehmen (z. B. Abfallverbrennungssteuer) adressiert.

Eine Besonderheit beim Pfand ist, dass hier beim Kauf eines Produkts ein Aufpreis gezahlt wird, der jedoch bei Rückgabe des leeren/gebrauchten Produkts zurückerstattet wird. Entsprechend kann ein Pfandsystem auch als eine Kombination aus Steuer und Subvention verstanden werden (Wilts 2020, S. 19). Pfandsysteme sind bei entsprechender Ausgestaltung in ihrer Lenkungswirkung deutlich effizienter als andere Ansätze: Im Gegensatz zu Entsorgungsgebühren oder -steuern wird durch Pfandsysteme vermieden, dass Haushalte und Firmen ihre Abfälle illegal entsorgen. Die Kosten der Umsetzung sind vergleichsweise gering und Steuerhinterziehung und -umgehung sind mit diesem Instrument weniger problematisch (Wilts 2020, S. 19 f.). Vorgezogene Entsorgungsgebühren, die mit dem Kauf eines Produkts erhoben werden, können zwar zu einer Verringerung der Menge der erzeugten Materialien und Produkte und damit einer Reduktion der Abfallmenge führen, damit wird das Recycling aber nicht automatisch gefördert. Umgekehrt erhöht eine Recyclingsubvention zwar das Recycling, durch die Senkung der Produktionskosten (da Sekundärmaterialien billiger werden) besteht aber das Risiko, dass sich die Menge der erzeugten Produkte erhöht (Wilts 2020, S. 5).

Verbrauchsseitig belastende ökonomische Instrumente sind mit Abgaben auf Verpackungen, Einwegkunststofftragetaschen oder Elektronik- und Elektroaltgeräte in Staaten der EU weit verbreitet (z. B. in Schweden und Dänemark; Kasten 4.5). Auch neue Steuern auf die thermische Abfallverwertung wurden in verschiedenen europäischen Ländern in den letzten Jahren erlassen. Noch eher die Ausnahme sind hingegen Pfandsysteme im Baubereich. Vorreiter ist hier Spanien, das ein Pfandrückerstattungssystem für Bau- und Abrisschutt eingeführt hat (Kasten 4.6). In Deutschland gibt es Pfandpflichten für Einweggetränkeverpackungen aus Kunststoff und für alle Getränkedosen sowie eine Mehrwegangebotspflicht für Speisen und Getränke zum Mitnehmen. Die Einführung neuer Pfandpflichten (z. B. für Elektrogeräte; Kap. 3.2.3) wird hierzulande schon seit Jahren diskutiert, allerdings sind daraus bisher keine konkreten Gesetzesvorhaben entstanden.

Kasten 4.5 Schweden und Dänemark – Abgaben auf Elektro- und Elektronikaltgeräte in Kombination mit weiteren Instrumenten

Schweden und Dänemark gelten (wie auch die Schweiz, Kasten 3.7) als Beispiele guter Praxis beim Umgang mit Elektro- und Elektronikaltgeräten. Der dort vorhandene Politikmix umfasst verschiedene verbrauchsseitig belastende ökonomische Instrumente. Beide Länder gehören zu den ersten, die nationale Systeme der erweiterten Herstellerverantwortung eingeführt haben. Hinzu kommt eine kommunale Müllverwertungsabgabe, welche die sachgerechte Entsorgung gewährleistet. Nicht zuletzt führen steigende Deponie- und Müllverbrennungsabgaben sowie anspruchsvolle Emissionsvorgaben für die Deponierung und Verbrennung dazu, dass Elektro- und Elektronikaltgeräte in der Verwertung bei höheren Stufen der Abfallhierarchie landen und außerdem ökologische Produktinnovationen verstärkt angereizt werden. Die Abgaben auf Elektro- und Elektronikaltgeräte werden europaweit beim Kauf für den Endkonsum erhoben. Auch Onlinehändler unterliegen der

Abgabepflicht, selbst wenn sie grenzüberschreitend versenden und damit unterschiedlich ausgestalteten Abgabensystemen unterliegen. Allerdings wird hier ein Vollzugsdefizit beklagt (Postpischil/Jacob 2017).

Kasten 4.6 Spanien – Pfandrückerstattungssystem für Bau- und Abrisschutt

In Spanien müssen gemäß dem Königlichen Erlass 105/2008 Bauträger durch ihre Projektplaner sicherstellen, dass Bauprojekte ein Gutachten zum Abfallmanagement umfassen. Dieses soll eine Schätzung der anfallenden Abfallmengen und die vorgesehenen Maßnahmen für deren Entsorgung enthalten. Kommunalbehörden haben Kontroll- und Gebührenerhebungsfunktionen inne, wodurch sie die Deponierung zugunsten anderer Verwertungswege unattraktiver gestalten können (Rodríguez-Robles et al. 2015, S. 3063).

Einige Gemeinden haben Rückverfolgbarkeitsanforderungen für Bau- und Abrisschutt in ihre lokalen Genehmigungsverfahren aufgenommen (Solís-Guzmán et al. 2009, S. 2543). In der Praxis muss der Bauträger eines neuen Bauvorhabens oder von Abrissarbeiten eine Kautions hinterlegen, deren Höhe mit der Art der Arbeiten und der geschätzten Abfallmenge zusammenhängt. Zurückerstattet wird die Kautions, wenn der Behörde Abfallbehandlungszertifikate vorgelegt werden. Diese werden durch Betreiber von durch die Gemeinde anerkannten Abfallverwertungs- bzw. Entsorgungsanlagen ausgestellt. Allerdings wird auch auf einige Schwächen in der Umsetzung hingewiesen (Gálvez-Martos et al. 2018, S. 171):

- › Das Instrument zielt in der Praxis hauptsächlich darauf ab, illegale Müllentsorgung zu vermeiden, es erhöht aber nicht die Leistungsfähigkeit des Abfallmanagementsystems.
- › Rechtlich gesehen müssen die Gemeinden keine Genehmigungen für ihre eigenen Bauprojekte erteilen. Die Kautions zur Sicherstellung der Abfallentsorgung ist dann für die Auftragnehmer, die mit der Gemeinde zusammenarbeiten, freiwillig.
- › Die mangelnde Durchsetzung der Vorschriften beeinträchtigt die Leistungsfähigkeit des Systems.

Anforderungen an die Umsetzung

Ziel verbrauchsseitig belastender Instrumente sind Ausweichbewegungen auf ökologischere Alternativen, jedoch besteht die Gefahr ökologisch ineffizienter Konsumverlagerungen. Ein typisches Beispiel dafür ist die Nutzung von Einwegpapiertüten statt Einwegkunststofftüten (anstelle von umweltfreundlichen Mehrwegtüten). Entsprechend müssen bei der Ausgestaltung die Umweltwirkungen anderer Alternativmaterialien einbezogen und abgewogen werden oder eine Abgabe muss so umfassend ausgestaltet sein, dass keine negativen Effekte durch Substitution entstehen. In der Praxis sind genaue Daten zu Umweltwirkungen verschiedener Materialien sowie zu Ausweichreaktionen der Verbraucher/innen häufig nicht verfügbar, was eine große Hürde für die sachgerechte Umsetzung solcher Instrumente darstellt (Bär et al. 2022, S. 141). Die entsprechende Lenkungswirkung ergibt sich zudem nur, wenn Externalitäten (z.B. Ressourcenverbrauch, unsachgemäße Entsorgung und Treibhausgasemissionen) auch tatsächlich eingepreist werden. Dies ist z.B. bei der Mehrzahl der existierenden Verpackungsabgaben nicht der Fall, da hier die geringen Gebühren oder Beiträge lediglich die Kosten für die Entsorgung bzw. das Recycling decken, sodass eine Vermeidung nicht angereizt wird (Postpischil et al. 2021, S. 9).

Welche Wirkungen erzeugt werden, ist von der Höhe der Steuer bzw. Abgabe abhängig sowie von der Nachfrageelastizität, welche beschreibt, wie stark sich eine Preisänderung auf die Nachfrage auswirkt (Bär et al. 2022, S. 61). Bei deutlichen Gebühren oder wirksamen Pfandlösungen können sich nichtintendierte soziale Nebenwirkungen ergeben, da es zu einer Verteuerung der Produkte kommen kann. Dies wäre z.B. bei einer Pfandlösung für Elektrik- und Elektronikgeräte zu erwarten. Würden alle relevanten Ströme von Elektroaltgeräten wie Handys, Notebooks und Computer, TV-Geräte und Bildschirme, Tablets, E-Books, Digitalkameras, externe Speichermedien und Navigationsgeräte mit einem wirksamen Pfand versehen, würde dies zu deutlich höheren Anschaffungskosten für Verbraucher/innen führen. Gleichzeitig würde dieses Pfand – anders als bei Produkten, die nur kurz

genutzt werden, wie z. B. Verpackungen – nicht nach kurzer Zeit zurückerstattet. Dies könnte gerade bei einkommensschwächeren Haushalten zu sozialen Benachteiligungen führen, weshalb die optimale Pfandhöhe schwierig festzulegen und das Instrument politisch umstritten ist (Wilts 2020, S. 17).

Instrumente wie Pfandsysteme oder Abgaben auf die minderwertige Verwertung helfen nur dann dabei, hochwertiges Recycling zu steigern, wenn Absatzmärkte für Rezyklate vorhanden sind. Um die Nachfrage nach hochwertigem Rezyklat zu erhöhen und finanzielle Anreize zu schaffen, zusätzliche separate Erfassungssysteme zu etablieren, kann die Einführung von Mindesteinsatzquoten für Rezyklate (Kap. 4.1.1) im Politikmix eine Lösung darstellen. Auch Herstellervorgaben für ein recyclingfreundliches Design (Kap. 4.1.2) (Ostertag et al. 2021, S. 169) und stoffspezifische Rückgewinnungsquoten können die Einführung von Pfandsystemen ergänzen, um neben der Sammlung auch die Rückgewinnung ausgewählter Rohstoffe zu fördern, so beispielsweise kritische Rohstoffe aus Elektro- und Elektronikgeräten (Wilts 2020, S. 25). Ökonomische Instrumente, die Endverbraucher/innen adressieren, lassen sich sehr gut um informatorische Instrumente ergänzen. Beispielsweise kann durch Umweltbildung, Müllsammelaktionen, Marketing für Mehrwegverpackungen zu einer Sensibilisierung der Vorteile von Mehrweg- gegenüber Einweglösungen beigetragen werden (Bär et al. 2022, S. 133).

Die Einführung neuer Verbrauchssteuern (Art. 106 Abs. 1 Nr. 2 GG) ist für den Bund grundsätzlich möglich. Die Voraussetzungen dafür hat das Bundesverfassungsgericht in einem Beschluss zur Kernbrennstoffsteuer konkretisiert. Verbrauchssteuern dürfen als Lenkungssteuern eingesetzt werden. Sie sind im Regelfall indirekte Steuern, die bei Herstellern erhoben werden, aber darauf ausgelegt sind, dass die Kosten auf die (End-)Verbraucher/innen abgewälzt werden. EU-rechtlich ist die Erhebung von Verbrauchsteuern oder anderen verbrauchsbezogenen Abgaben grundsätzlich die eigene Angelegenheit der Mitgliedstaaten. Bei der Ausgestaltung ist zu beachten, dass die Erhebung solcher Steuern nach Art. 1 Abs. 3 Satz 2 der Richtlinie 2008/118/EG¹¹⁸ (nachfolgend Verbrauchsteuersystemrichtlinie) »im grenzüberschreitenden Handelsverkehr zwischen Mitgliedstaaten keine mit dem Grenzübertritt verbundenen Formalitäten nach sich ziehen« darf (Bär et al. 2022, S. 41 f. u. 76 ff.).

4.2.3 Öffentliche Beschaffung

Um den Einsatz von Rezyklaten zu fördern, können öffentliche Stellen gezielt Produkte und Dienstleistungen ausschreiben, die Sekundärrohstoffe beinhalten bzw. einsetzen, nachweislich leicht zu recyceln sind (Alhola et al. 2019; Hartley et al. 2020) oder mithilfe innovativer Recyclingtechnologien hergestellt wurden (Schneider/Schmidt 2020; Wurster et al. 2021). Die öffentliche Beschaffung kann so als mächtiger Hebel genutzt werden, um eine Nachfrage für bestimmte Produkte und Dienstleistungen zu generieren. Staatliche Beschaffungsstellen in Deutschland – von der Bundes- bis zur Kommunalebene – verfügen über eine erhebliche Nachfragemacht. Ihr Beschaffungsvolumen wird auf etwa 500 Mrd. Euro geschätzt (Schneider/Schmidt 2020). Einen besonders hohen Einfluss hat die öffentliche Beschaffung in Teilmärkten, in denen die öffentliche Verwaltung einen großen Anteil an der Gesamtnachfrage ausmacht, wie beispielsweise im Bauwesen (Kap. 3.3.3). Für Marktakteure entsteht durch die staatliche Nachfrage nach Rezyklaten eine gewisse Planungssicherheit für die Ausrichtung ihrer Produktion und die damit einhergehenden notwendigen Investitionen (Hinzmann et al. 2022, S. 45).

Nach aktueller rechtlicher Lage gilt, dass öffentliche Beschaffungsstellen in Deutschland grundsätzlich umweltbezogene Aspekte berücksichtigen dürfen. Dies ist in den Grundsätzen der Vergabe im Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen (GWB) im § 97 Abs. 3 verankert. Demnach ist es prinzipiell möglich und erlaubt, die Recyclingfähigkeit oder Verwendung von Rezyklaten bei der öffentlichen Beschaffung von Produkten und Dienstleistungen zu berücksichtigen. Darüber hinaus sind öffentliche Beschaffungsstellen in bestimmten Teilbereichen sogar verpflichtet, Umweltaspekte zu beachten. In Bezug auf Rezyklate sind die Bestimmungen des KrWG relevant. § 45 KrWG schreibt vor, welchen Erzeugnissen der Vorzug in öffentlichen Beschaffungsprozessen zu geben sind (Kap. 2.2.1). Diese in der Gesetzesnovellierung 2020 neu eingeführte Bevorzugungspflicht gilt insbesondere für Erzeugnisse, die durch Recycling von Abfällen, insbesondere unter Einsatz von Rezyklaten, hergestellt wurden (vorher galt lediglich eine Prüfpflicht). Allerdings gilt die Bevorzugungspflicht bislang nur für Behörden auf der Bundesebene. Der größte Anteil des öffentlichen Beschaffungsvolumens liegt jedoch bei den Ländern und Kommunen, die für etwa 88 % der öffentlichen Ausgaben verantwortlich sind (Agora Energie-

¹¹⁸ Richtlinie 2008/118/EG über das allgemeine Verbrauchsteuersystem und zur Aufhebung der Richtlinie 92/12/EWG

wende/Wuppertal Institut 2019). Eine Ausweitung von verbindlichen Vorgaben auf die Länder- und Kommunal-ebene wäre daher ein wichtiger Hebel, um einen stärkeren Rezyklateinsatz anzuregen und allgemein eine umweltfreundliche und ressourcenschonende öffentliche Beschaffung zum Standard zu machen.

Obwohl die öffentliche Beschaffung im politischen Diskurs in Deutschland als wichtiges Instrument hervor-gehoben wird, um umweltpolitische Ziele zu erreichen (z. B. in der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung [2020] oder im Deutschen Ressourceneffizienzprogramm III des BMU [2020b]), wird ihr Potenzial in der Praxis nicht ausgeschöpft (Chiappinelli/Zipperer 2017). Das zeigt auch die Fallstudie zu mineralischen Bauabfällen (Kap. 3.3.3). Ein gutes Beispiel für die erfolgreiche Beschaffung von rezyklathaltigen Produkten (in diesem Fall Textilien) durch staatliche Einrichtungen gibt es in den Niederlanden (Kasten 4.7).

Kasten 4.7 Niederlande – Mindestvorgabe für Rezyklatanteil bei öffentlichen Ausschreibungen

In den Niederlanden haben 45 öffentliche Institutionen und private Unternehmen 2013 einen Green Deal zu zirkulärer Beschaffung abgeschlossen. Die Unterzeichnenden verpflichteten sich, mittels ihrer Beschaffungspolitik eine Kreislaufwirtschaft anzuregen bzw. zu fördern. Konkret sollte jede Organisation dies in zwei Beschaffungsprozessen in den Jahren 2014 und 2015 umsetzen. Diese Pilotprozesse dienten vor allem dem Erfahrungsgewinn und -austausch, bevor dann bis 2016 eine zirkuläre Beschaffung nachweislich in die Beschaffungsprozesse der teilnehmenden Organisationen integriert sein sollte (Saltzman 2015).

Einer der Unterzeichner war das niederländische Verteidigungsministerium, welches u. a. für die Beschaffung von Textilprodukten für das Militär verantwortlich ist. In einem der Pilotprozesse förderte das Ministerium gezielt den Einsatz von recycelten Fasern. Im Rahmen einer intensiven Vorbereitungsphase wurden Marktakteure konsultiert, die technische Machbarkeit der Vorgaben eruiert und eine angemessene Höhe des Rezyklatanteils bestimmt. Daraufhin beschloss das Ministerium, in der Ausschreibung von Handtüchern, Waschlappen, Schals, Taschentüchern und Overalls zu verlangen, dass diese zu mindestens 10% aus recycelten Zellulosefasern bestehen (DMoD 2017b). Lieferanten waren aufgefordert, den Rezyklatanteil durch mikroskopische Tests nachzuweisen. Der Auftrag wurde an das wirtschaftlichste Angebot vergeben. In den Zuschlagskriterien war geregelt, dass dafür neben dem Preis und der nachweisbaren Qualität des Materials auch der maximale Prozentsatz an recyceltem Inhalt und dessen Zertifizierung herangezogen wurden. Im Ergebnis enthielten die beauftragten Produkte einen höheren als den vorgegebenen Rezyklatanteil: Die Handtücher bestanden zu 36% und die Overalls zu 14% aus recycelten Textilfasern. Dadurch konnten schätzungsweise 233 Mio. l Wasser, 68.880 kg CO₂-Emissionen und 23.520 MJ an Energie eingespart werden (DMoD 2017a).

Anforderungen an die Umsetzung

Das Umweltbundesamt (Schneider/Schmidt 2020) hat 2020 ein Rechtsgutachten zur umweltfreundlichen öffentlichen Beschaffung herausgegeben. Das Gutachten bestätigt, dass öffentliche Beschaffungsstellen auf allen Ebenen (Bund, Länder, Kommunen) umweltbezogene Aspekte in der Beschaffung berücksichtigen dürfen, solange die allgemeinen vergaberechtlichen Grundsätze beachtet werden. Wichtig dabei ist, dass die umweltbezogenen Aspekte im Zusammenhang mit dem Auftragsgegenstand stehen und dass ein transparenter Wettbewerb ermöglicht wird, d. h., Unternehmen dürfen weder willkürlich bevorzugt noch benachteiligt werden. Ein Spannungsfeld kann bestehen, wenn umweltfreundliche Beschaffungsvarianten mehr kosten als konventionelle Alternativen. Denn Beschaffungsstellen in Deutschland sehen aufgrund der erwarteten höheren Kosten häufig davon ab, Umweltaspekte in ihre Ausschreibungen zu integrieren (Chiappinelli/Zipperer 2017). Rechtlich gilt, dass öffentliche Auftraggeber den Zuschlag an das wirtschaftlichste Angebot erteilen müssen (§ 127 Abs. 1 GWB¹¹⁹; § 58 VgV¹²⁰). Jedoch muss es sich dabei nicht zwingend um das billigste Angebot handeln. Vielmehr verfügen öffentliche Beschaffer/innen hier über einen Ermessensspielraum, bei dem der Preis ein Merkmal neben anderen, wie beispielsweise der Qualität, darstellt (Schneider/Schmidt 2020). Über den Ermessensspielraum verfügen sogar einzelne Sachbearbeiter/innen, zumindest solange verbindliche und konkrete Vorgaben der jeweiligen Hausleitung fehlen

¹¹⁹ Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen in der Fassung der Bekanntmachung vom 26.6.2013, zuletzt geändert am 22.12.2023

¹²⁰ Vergabeverordnung vom 12.4.2016, zuletzt geändert am 17.8.2023

(Müller et al. 2021, S. 41). Der Ermessensspielraum schafft gleichzeitig aber auch Unsicherheiten, da Entscheidungen angreifbar werden. Aktuell tragen dieses Rechtfertigungsrisiko die einzelnen Mitarbeiter/innen der Ausschreibungsstellen (Muchow et al. 2022, S. 89). Dass es möglich ist, Umweltaspekte verbindlich in die öffentliche Beschaffung zu integrieren, zeigt das Land Berlin, welches bei der umweltfreundlichen öffentlichen Beschaffung in Deutschland aktuell eine Vorreiterposition einnimmt (Kap. 3.3.3 u. Kasten 4.8).

Um den Einsatz von Rezyklaten durch öffentliche Beschaffungsmaßnahmen maßgeblich zu steigern, ist neben der Entwicklung von Recyclingtechnologien und -infrastrukturen entscheidend, rezyklathaltige Produkte auf dem Markt zu etablieren und ihre breite Anwendung zu sichern. Eine gezielte Förderung der Nachfrage durch das Instrument der öffentlichen Beschaffung kann dabei bestehende, angebotsseitige Instrumente unterstützen und ergänzen. Eine weitere Voraussetzung für die umweltfreundliche öffentliche Beschaffung ist es, dass entschieden wird, anhand welcher Kriterien die Umweltfreundlichkeit bemessen wird (Hermann 2018; Knopf et al. 2011). Orientierung bieten etablierte Labels, Zertifizierungssysteme und Produktstandards (z. B. der Blaue Engel), wobei nicht alle Gütezeichen als geeignete Nachweise rechtlich zulässig sind (Müller et al. 2021, S. 15). Um die Berücksichtigung von Umweltaspekten bei der öffentlichen Beschaffung zu fördern, könnte der deutsche Staat z. B. verbindlich vorschreiben, dass Lebenszykluskosten ermittelt und bei Vergabeentscheidungen beachtet werden. Dies könnte für Teilbereiche (z. B. Bausektor) oder ganz allgemein ab bestimmten Auftragswerten gelten.¹²¹ In den Niederlanden wird für öffentliche Ausschreibungen im Baubereich eine einheitliche Methode genutzt, um die Lebenszykluskosten der jeweiligen Angebote zu ermitteln (Agora Energiewende/Wuppertal Institut 2019; Baron 2016). Auf diese Weise kann die öffentliche Beschaffung auch Standardisierungsprozesse anregen.

Kasten 4.8 Regelungen zur umweltfreundlichen öffentlichen Beschaffung des Landes Berlin

In Berlin regelt § 7 des BerlAVG, dass öffentliche Auftraggeber ökologische Kriterien berücksichtigen und Lebenszykluskosten bei der Bewertung von Angeboten heranziehen müssen. Die VwVBU konkretisiert, wie die ökologischen Kriterien angewendet und Lebenszykluskosten erfasst werden sollen. Die VwVBU ist verbindlich anzuwenden bei Liefer- und Dienstleistungsaufträgen ab einem Auftragswert von 10.000 Euro sowie bei Bauleistungen ab einem Auftragswert von 50.000 Euro. Über Leistungsblätter werden weitere verbindliche Umweltschutzanforderungen gemacht. Interessant für den Einsatz von Rezyklaten im Bausektor ist beispielsweise das Leistungsblatt 26. Dieses verlangt u. a., dass für Neubauten ein Rückbaukonzept erstellt und, sofern verfügbar, Recyclingbeton verwendet wird (SenUVK 2021).

Für Vergabestellen würde ein solcher Schritt hin zu mehr Verbindlichkeit einen (anfänglichen) Mehraufwand bedeuten und ein Umdenken voraussetzen. Handlungsleitfäden, Ausschreibungsempfehlungen und Mustervorlagen sind zu formulieren bzw. stärker zu bewerben (UBA o.J.I.). Außerdem sind Schulungen für das Beschaffungspersonal erforderlich, auch vor dem Hintergrund, dass fehlende Expertise im Bereich der umweltfreundlichen Beschaffung eine zentrale Barriere für die praktische Umsetzung darstellt (Chiappinelli/Zipperer 2017; Müller et al. 2021, S. 44). Staatlich geförderte Schulungen werden von der Kompetenzstelle für nachhaltige Beschaffung beim Beschaffungssamt des Bundesministeriums des Innern (KNB) und vom Kompetenzzentrum Innovative Beschaffung (KOINNO) angeboten.

4.3 Kooperative Instrumente

Um bestimmte Umweltziele zu verwirklichen, kann der Staat kooperative Instrumente einsetzen, um Vereinbarungen mit Akteuren der Wirtschaft zu treffen. Solche Instrumente können auch gezielt eingesetzt werden, um relevante Akteure zusammenzubringen und gemeinsam Bedingungen festzulegen, unter denen Sekundärmaterialien gehandelt und genutzt werden können. In der Literatur und in der politischen Debatte werden diverse Begriffe verwendet, um kooperative Instrumente dieser Art zu beschreiben. Gängige Begriffe im deutschen Sprachraum

¹²¹ Konkrete Vorschläge und eine ausführliche Analyse, auch zu rechtlichen Verankerungsmöglichkeiten, bietet eine gemeinsame Studie von Agora Energiewende/Wuppertal Institut (2019, S. 126 ff.).

sind freiwillige Selbstverpflichtung oder freiwillige Vereinbarung¹²² – teilweise auch Covenant, wenn die Vereinbarung einen stärker verpflichtenden, vertraglichen Charakter besitzt.

Es gibt keine einheitliche Definition für diesen Instrumententyp und was er konkret umfasst (Wurzel et al. 2019). Nachfolgend werden darunter Vereinbarungen verstanden, die das Ergebnis von Verhandlungen zwischen staatlichen Stellen und Akteuren aus Wirtschaft und Gesellschaft sind. Hauptadressat des Instrumententyps sind Unternehmen und Wirtschaftsverbände. Darüber hinaus können weitere Akteure, z. B. aus der Zivilgesellschaft oder Wissenschaft, eingebunden werden. Der Fokus liegt auf dem Verhandlungsansatz, bei dem die beteiligten Akteure sich kooperativ auf ein einerseits machbares und andererseits effektives Zielniveau verständigen und Spielräume abstecken, wie bestimmte Ziele erreicht werden sollen. Zudem wird festgelegt, auf welche Weise die Zielerreichung und ggf. die Schritte dorthin nachgewiesen werden sollen (Postpischil/Jacob 2017). Die Maßnahmen setzen die Marktakteure anschließend weitgehend in Eigenverantwortung um. Dadurch bestehen gute Chancen, dass der gefundene Lösungsansatz von ihnen akzeptiert und mitgetragen wird (Johansson 2021). Für Unternehmen haben freiwillige Vereinbarungen die positive Wirkung, dass sie zu einer höheren Planungssicherheit führen. Während der Laufzeit der Vereinbarung können sie damit rechnen, dass staatliche Behörden weitgehend stabile regulatorische Rahmenbedingungen gewährleisten. Dies schafft gute Ausgangsbedingungen für Investitionen (Bleischwitz et al. 2010a; Johansson 2021; Wilts et al. 2010).

Mit freiwilligen Vereinbarungen können sehr unterschiedliche Zielsetzungen verfolgt werden, sodass das Politikinstrument dazu eingesetzt werden kann, verschiedene Hemmnisse und praktische Barrieren zu überwinden. Eine besondere Stärke des Instruments ist dabei sein kooperativer Charakter, der es ermöglicht, gezielt Interessenkonflikte zwischen verschiedenen Akteuren zu adressieren. Dies hat eine hohe Relevanz, wenn es um die Kreislaufführung von Materialien geht, denn in diesem Bereich liegen die verschiedenen Interessen häufig weit auseinander. Johansson (2021, S. 501) illustriert beispielhaft zwei typische Konflikte, die die Kreislaufführung von Materialien hemmen, solange die einzelnen Akteursgruppen nicht miteinander kommunizieren und kooperieren:

- Akteure, die Abfall generieren, haben ein Interesse, diesen möglichst einfach und günstig entsorgen zu können. Dem gegenüber stehen Akteure, die recycelte Materialien nutzen wollen und dafür einen möglichst hohen Grad an Qualität und Reinheit bei den Sekundärmaterialien benötigen.
- Die zu tragenden Kosten für die Wiederverwendung oder das Recycling von Abfallmaterialien sind häufig ungleich verteilt zwischen den Akteuren entlang der Wertschöpfungskette. So fällt beispielsweise oftmals bei der Abfallsammlung, -sortierung, und -aufbereitung ein großer Teil der Kosten an, jedoch haben die zuständigen Akteure, z. B. die kommunale Abfallwirtschaft, nur einen geringen Nutzen davon, besonders hochwertige und reine Sekundärmaterialien zu produzieren. Daher fehlt ihnen der Anreiz, in entsprechende Technologien und Infrastrukturen zu investieren.

In den beschriebenen Fällen kann das Instrument der freiwilligen Vereinbarung genutzt werden, um die relevanten Akteure zusammenzubringen, damit eine gemeinsame Lösung erarbeitet wird. Dabei sind unterschiedliche Akteurskonstellationen denkbar, z. B. entlang bestimmter Wertschöpfungsketten oder auch branchenübergreifend. Der Staat nimmt dabei eine initiiierende und moderierende Rolle ein. Beispiele sind Vereinbarungen über Mindesteinsatzquoten für Rezyklate mit derzeit verfügbaren Technologien und Rezyklatmengen. Dabei werden Produktgruppen und Quotenhöhe bestimmt. Auch Standards für ein recyclingfreundliches Produktdesign können mithilfe von Vereinbarungen etabliert werden (Agora Energiewende/Wuppertal Institut 2019; UBA 2016). Darüber hinaus eignet sich das Instrument insbesondere, um informatorische Hemmnisse zu adressieren. Akteure, die normalerweise unabhängig voneinander auf dem Markt agieren (z. B. Hersteller und Recycler), können sich im Rahmen von freiwilligen Vereinbarungen zu Informationsbedarfen austauschen und gemeinsam Lösungen suchen. So kann geklärt werden, in welchen Qualitäten recycelte Materialien vorliegen müssen, damit sie in bestimmten Anwendungsgebieten eingesetzt werden können. Zudem können Vereinbarungen dazu getroffen werden, Informationen zur Zusammensetzung von Materialien entlang der Wertschöpfungskette weiterzugeben.

Freiwillige Vereinbarungen, die einen stärker verbindlichen, ggf. vertraglichen Charakter haben, wurden in Deutschland bislang nicht umgesetzt (Wurzel et al. 2019). Beispiele dafür im Kontext Sekundärrohstoffe finden sich in einigen europäischen Ländern, etwa den Niederlanden (Kasten 3.5), Großbritannien oder in Lettland (Kasten 4.9).

¹²² Freiwillig sind solche Vereinbarungen in dem Sinne, dass eine Teilnahme nicht verpflichtend ist. Dennoch kann die Einhaltung der vereinbarten Ziele unter Umständen rechtlich verbindlich ausgelegt werden.

Kasten 4.9 Lettland – Befreiung von der landesweiten Ressourcensteuer als Anreiz für umweltgerechte Abfallverwertung und Recycling

Damit Wirtschaftsakteure in Lettland erweiterte Herstellerverantwortung für bestimmte Abfallarten übernehmen, bietet ihnen das Umweltschutzministerium eine Befreiung von der landesweiten Ressourcensteuer an. Die Unternehmen können auf freiwilliger Basis eine Vereinbarung mit dem Umweltschutzministerium eingehen, in der spezifische Ziele für die Sammlung, Verwertung und das Recycling von bestimmten Abfallarten festgelegt sind. Möglich sind die Vereinbarungen für eine Reihe von Abfallarten, u. a. Verpackungsabfälle, Schmieröle, Reifen, Batterien und Akkumulatoren sowie Elektro- und Elektronikaltgeräte. Die Vereinbarung wird vertraglich festgehalten. Bei Nichteinhaltung der vereinbarten Ziele und festgelegten Standards wird der zehnfache Satz der Ressourcensteuer fällig für die unsachgemäß verwertete Menge der betreffenden Abfälle.

Quelle: EEA 2016; Postpischil/Jacob 2017

Anforderungen an die Umsetzung

Freiwillige Selbstverpflichtungen werden bereits seit Langem in Deutschland angewendet und waren insbesondere in den 1990er Jahren weit verbreitet, u. a. im Abfallsektor, um z. B. die Nutzung von schädlichen Substanzen zu verringern oder ganz auslaufen zu lassen (Wurzel et al. 2013). Beispielsweise ging die Bundesregierung 2016 eine freiwillige Selbstverpflichtung mit dem Handelsverband Deutschland ein. Darin verpflichtete sich eine Vielzahl an Unternehmen, Plastiktüten nicht mehr kostenlos an Kund/innen auszugeben. Obwohl auf diesem Weg ein deutlicher Rückgang von Plastiktüten erreicht werden konnte, beschloss die Bundesregierung 2020, ein bundesweites Plastiktütenverbot einzuführen (Mederake et al. 2020). Eine Hauptmotivation war dabei, jene Unternehmen zu erreichen, die sich nicht an der freiwilligen Selbstverpflichtung beteiligt hatten (BMU 2019).

Ein typisches Merkmal von freiwilligen Selbstverpflichtungen in Deutschland ist jedoch, dass sie – im Unterschied zu Modellen aus anderen europäischen Ländern – rechtlich nicht bindend sind. Zudem werden sie auf eher informellem Wege ausgehandelt und häufig werden keinerlei Bestimmungen festgelegt, um die Einhaltung der gesetzten Ziele zu überwachen. Nur für wenige der abgeschlossenen freiwilligen Selbstverpflichtungen wurde eine unabhängige Prüfstelle beauftragt, um die Fortschritte bei der Zielerreichung zu überwachen (Wurzel et al. 2019). Nichtregierungsorganisationen sehen das deutsche Modell der freiwilligen Selbstverpflichtungen aufgrund der fehlenden Transparenz, fehlender Kontrollmechanismen und der Unverbindlichkeit oft kritisch (Wurzel et al. 2013). Um in Deutschland freiwillige Vereinbarungen mit einem stärker verbindlichen, ggf. vertraglichen Charakter sowie Sanktionsmaßnahmen einzuführen, wie sie in den Niederlanden mit den Covenants angewendet werden (Kasten 3.5), wäre zunächst die Rechtskonformität solcher Maßnahmen zu prüfen. Erste Überlegungen dazu wurden von Wilts et al. (2010) für einen Covenant im Bereich Altautorecycling ausgearbeitet.

Ein möglicher negativer, nichtintendierter Effekt aus ökologischer Sicht besteht darin, dass es zu einer Problemverlagerung kommen kann, da sich freiwillige Vereinbarungen oftmals auf eine bestimmte Problemstellung fokussieren. Wenn beispielsweise das Ziel ist, die Recyclingquote zu erhöhen, können unter Umständen auch sehr energieintensive Prozesse gefördert werden, die zu einem Anstieg von Treibhausgasemissionen führen (Johansson 2021). Aus ökonomischer Sicht besteht bei freiwilligen Vereinbarungen mit der Industrie das Risiko, dass manche Unternehmen sich *nicht* an der Vereinbarung beteiligen und trotzdem von der Vereinbarung profitieren, z. B. durch eine höhere Akzeptanz und Nachfrage für rezyklathaltige Produkte. Weil sie selbst keine Kosten für die Umsetzung von Maßnahmen auf sich nehmen müssen, verschaffen sie sich dadurch Wettbewerbsvorteile (Wurzel et al. 2013). Außerdem können Vereinbarungen – hier insbesondere die rechtlich verbindlichere Form der Covenants – »mit erheblichen Kosten und Arbeitsaufwand für die Verwaltung bei Aushandlung, Umsetzung und Monitoring verbunden sein« (Wilts et al. 2010, S. 57). Dies zeigte sich bei den Vereinbarungen zu den britischen Qualitätsprotokollen, deren Erstellung aufgrund des hohen Zeitaufwands (zumindest vorübergehend) eingestellt wurde (Hinzmann et al. 2019, S. 56).

Je nach inhaltlicher Zielsetzung kann eine kooperative Vereinbarung mit weiteren Instrumententypen kombiniert werden. Die Einbettung der Vereinbarung in eine größere politische Rahmensetzung mit klaren Zielen kann dazu beitragen, die zuvor angesprochenen Probleme zu vermeiden. Insbesondere kann das Instrument ge-

nutzt werden, um Standardisierungsprozesse in die Wege zu leiten bzw. eine Einigung auf die Verwendung bestimmter Standards zu erreichen. Um die Wirkung zu verstärken, können diese Standards beispielsweise in der öffentlichen Beschaffung vorgeschrieben werden (Hinzmann et al. 2019, S. 54).

4.4 Fazit

Die untersuchten Instrumententypen sind unterschiedlich gut geeignet, die in Kapitel 2.3 identifizierten Hemmnisse (insbesondere negative Externalitäten, informatorische Hemmnisse, hemmende regulatorische Vorgaben) für den Rezyklateinsatz spezifisch zu adressieren. Während gesetzliche Produktstandards und die öffentliche Beschaffung je nach Ausgestaltung unterschiedliche Hemmnisse adressieren können, kommen ökonomische Instrumente besonders dafür infrage, die relativen Preisvorteile der ökologisch problematischen Nutzung von Primärmaterialien auszugleichen (negative Externalitäten). Kooperative Instrumente hingegen sind hauptsächlich zur Überwindung informatorischer Hemmnisse geeignet.

Beim Blick auf tatsächlich genutzte Instrumente in Deutschland fällt auf, dass bisher zentrale Hemmnisse noch nicht wirksam adressiert werden. So sind negative Externalitäten (nicht eingepreiste Umwelt- und soziale Wirkungen) entlang der Wertschöpfungskette gegeben, die die relativen Preise zugunsten von Primärmaterialien und zu Lasten von Sekundärrohstoffen verändern. Preissignale, wie z. B. Steuern auf Primärkunststoffe oder Primärbaustoffe, wurden bislang wenig eingesetzt, wenn doch, haben sie kaum eine Lenkungswirkung erzielen können, z. B. Beteiligungsentgelte für Verpackungen. Die Potenziale kooperativer Instrumente – in verbindlicher Form – wurden bislang gar nicht, diejenigen der öffentlichen Beschaffung kaum ausgeschöpft. Zwar ermöglicht es die Rechtslage prinzipiell, Umweltwirkungen bei Beschaffungsentscheidungen zu berücksichtigen, jedoch sind die Verfahren unverbindlich und mit höheren Aufwänden verbunden, sodass sie in der Praxis kaum zur Anwendung kommen. Vorreiter ist Deutschland hingegen bei Pfandsystemen im Getränkebereich, die bereits Anfang der 2000er Jahre eingeführt wurden. Eine Ausdehnung der Pfandpflicht auf andere Produkte fand jedoch nicht statt.

Durch Produktstandards, ökonomische Instrumente etc. können Märkte für Sekundärrohstoffe geschaffen oder gestärkt werden, die Innovationswirkungen erzeugen. Bisher setzt Innovationspolitik hierzulande vor allem auf die Subventionierung von Innovationen, sei es durch Förderprogramme oder durch steuerliche Vorteile für FuE-Tätigkeit. Der Vorteil von Förderprogrammen ist die hohe Zielgenauigkeit. Ein Nachteil sind Mitnahmeeffekte (Graaf/Jacob 2015). Zudem bleibt es für die Akteure unklar, ob sie auch langfristig mit dem für ihre Innovationen günstigen Umfeld rechnen können. Daher ist es sinnvoll, Innovationsförderung auch mit nachfrageseitiger Innovationspolitik zu ergänzen (TAB 2006). Hier können ein stabiler regulatorischer Rahmen und ein Ausgleich der relativen Preise durch ökonomische Instrumente eine entsprechende Nachfrage nach Rezyklaten sowie innovativen Technologien sicherstellen.

Die Transformation zur Kreislaufwirtschaft wird politisch intensiv diskutiert, viele Maßnahmen sind auch in Deutschland auf der politischen Agenda oder zumindest im Gespräch. Mit einer dynamischen Weiterentwicklung des Steuerungsrahmens ist also zu rechnen. Zu vielen Instrumenten liegen in anderen Ländern bereits Erfahrungen vor, z. B. Primärbaustoffsteuern, Abgaben auf Müllverbrennung oder Deponierung, Besteuerung von Kunststoffverpackungen aus Primärkunststoff, Mindestquoten für den Rezyklateinsatz, freiwillige Vereinbarungen mit verpflichtendem Charakter. Weitere Instrumente werden in den kommenden Jahren aufgrund von EU-Vorgaben auch hierzulande eingeführt werden, z. B. Produktpass, Ökodesign-Vorgaben.

Wichtig erscheint bei der Einführung und Weiterentwicklung der Steuerungsmaßnahmen vor allem, in einem gut aufeinander abgestimmten Politikmix verschiedene Instrumente einzusetzen, die gezielt die bestehenden Hemmnisse für den Rezyklateinsatz angehen. Denn kein einzelnes Instrument ist in der Lage, alle bestehenden Hemmnisse zu adressieren und somit für sich allein eine substantielle Steigerung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen zu bewirken. Daher ist es erforderlich, in Kombinationen von Instrumenten zu denken. Da sich die jeweilige Ausprägung und das Ausmaß der Hemmnisse zudem nach Problemfeldern bzw. Materialströmen unterscheiden (Kap. 3), muss ein Politikmix sehr differenziert den jeweiligen Spezifika von Materialien, Akteuren und dem Zeitverlauf Rechnung tragen: Während etwa bei Baumaterialien die negativen Externalitäten im Vordergrund stehen, geht es bei Hightechmaterialien wie Elektrogeräten vor allem darum, Hemmnisse für Innovationen bezüglich Sammlung und Recycling zu adressieren. Dabei sollten grundsätzlich solche Instrumente zum Zug kommen, die mit den größten Wirkungen und geringsten Kosten oder Nachteilen verbunden sind. Zudem können Wechselwirkungen zwischen Instrumenten, die sich gegenseitig verstärken, genutzt werden.

5 Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes – übergreifende Handlungsfelder

In diesem Bericht wurden für drei Abfallströme (Kunststoffverpackungen, Elektroaltgeräte, mineralische Bauabfälle) exemplarische Herausforderungen und Perspektiven für die Verbesserung des Rezyklateinsatzes herausgearbeitet. Anhand dieser Fallbeispiele und unter punktueller Hinzuziehung von bereits umgesetzten Maßnahmen zu weiteren Stoffströmen wurde sodann aus einer übergreifenden Perspektive untersucht, welche Politikinstrumente sich für die Stärkung der Nachfrage nach Rezyklaten in Deutschland als besonders vielversprechend erweisen könnten. Insgesamt zeigt die Analyse, dass in Deutschland zwar beachtliche Mengen von Abfällen dem Recycling zugeführt werden, beim Rezyklateinsatz aber noch erhebliche Verbesserungspotenziale bestehen. Die jeweils maßgeblichen Hemmnisse sind von Abfallbereich zu Abfallbereich unterschiedlich und hängen von den spezifischen Rahmenbedingungen und materialtechnischen Merkmalen ab:

1. Bedeutende Mengenströme gehen bislang in den allgemeinen Abfallstrom und könnten hochwertiger recycelt werden, wenn sie getrennt erfasst und recycelt würden. Dies betrifft z. B. Kunststoffe außerhalb des Verpackungsbereichs, Textilien, Möbel u. v. m. Für diese Abfallbereiche fehlen teilweise spezifische Vorgaben zu Sammlung, Entsorgung und/oder Recycling, die auf gesetzlicher Ebene noch zu schaffen wären. Die Erfahrung zeigt, dass ohne solche Vorgaben und Regelungen zur Kostenverteilung die erforderlichen Sammel- und Recyclinginfrastrukturen kaum in ausreichendem Umfang aufgebaut werden.
2. Bei vielen Stoffströmen, bei denen dank entsprechender Vorgaben bereits eine Pflicht zur separaten Erfassung und Entsorgung besteht, gibt es erhebliche Defizite bei der sortenreinen Sammlung, ohne die ein hochwertiges Recycling schwerlich durchführbar ist. Beispielhaft können hier Bauabfälle genannt werden, die derzeit noch in großem Umfang als schwer verwertbares Gemisch mit minderer Qualität anfallen, oder Elektroaltgeräte, bei denen die Sammelziele in Deutschland bei Weitem verfehlt werden. Diese Defizite lassen sich zum einen auf einen unzureichenden Vollzug bestehender Regelungen (im Baubereich etwa die Gewerbeabfallverordnung, Kap. 3.3.1), zum anderen – wie im Bereich der Elektroaltgeräte – auf umständliche Sammelsysteme und/oder mangelnde Aufklärung der Verbraucher/innen zurückführen (Kap. 3.2.1).
3. Auch bei sortenrein erfassten und dem Recycling zugeführten Stoffströmen werden selbst wertvolle Stoffe teilweise kaum zurückgewonnen. Das gilt insbesondere für solche Materialien, die nur in kleinen Mengen in den eingesammelten Produkten vorkommen (wie beispielsweise Seltene Erden in elektronischen Geräten) und deshalb im Rahmen der bestehenden Recyclingprozesse mit vertretbarem Aufwand kaum recycelt werden können. Um die Recyclingquoten solcher Stoffe zu erhöhen, ist nicht nur bei den Recyclingverfahren, sondern meist auch beim Produktdesign anzusetzen (Kap. 3.2.3).
4. Schließlich bestehen häufig auch dort, wo Rezyklate mit den bestehenden Verfahren in ausreichendem Umfang gewonnen werden, Probleme damit, diese wieder in neuen Produkten hochwertig zum Einsatz zu bringen. Die Gründe dafür sind vielfältig und können mit mangelnder bzw. schwer einschätzbarer Rezyklatqualität (aufgrund von fehlenden Informationen zu Abfallzusammensetzung und möglichen Kontaminationen), mangelnder wirtschaftlicher Konkurrenzfähigkeit gegenüber Primärrohstoffen (z. B. Altkunststoffe) oder fehlender Akzeptanz bei Produktherstellern und/oder Verbraucher/innen (z. B. R-Beton; Kap. 3.3.1) zu tun haben.

Zu konstatieren ist, dass es bislang nur wenige Materialbereiche gibt, in denen das Schließen von Stoffkreisläufen schon relativ gut funktioniert. Beispiele hierfür sind Massenmetalle (Eisen, Kupfer etc.) sowie bestimmte Typen von Verpackungen (z. B. PET-Flaschen, Glasflaschen). Die Transformation in Richtung Circular Economy in Deutschland befindet sich noch in einer frühen Entwicklungsphase und weist eine geringe Dynamik auf (Gandenberg 2021, S. 36). Darauf weist auch der Umstand hin, dass Deutschlands zirkuläre Materialnutzungsrate – ein standardisierter Indikator zur Messung der Circular Economy in Europa – seit Jahren auf einem relativ niedrigen Niveau stagniert (Kap. 2.3).

Aufgrund der Vielfalt der stoffstromspezifischen Rahmenbedingungen und der sehr unterschiedlichen Hemmnisse müssen Lösungsansätze für einen verbesserten Rezyklateinsatz sehr differenziert auf die einzelnen Abfallbereiche zugeschnitten sein. Für die in den Fallstudien beleuchteten Abfallströme zeigt der vorliegende

Bericht einzelne Lösungsansätze auf, die aber insbesondere bei den Bauabfällen einer weiteren Vertiefung bedürfen. Traditionell wird hierzulande vor allem auf Innovationen im Bereich der Abfall- und Recyclingtechnik gesetzt. Deutschland gehört hier weltweit zu den Technologieführern, wie Patentanalysen zeigen, und verfügt über eine starke Forschungs- und Entwicklungslandschaft (Prognos/INFA 2020, S. 137). Neben der Entwicklung ganz neuer, innovativer Lösungen, z. B. für die Rückgewinnung gering konzentrierter Metalle, für die Befreiung der Abfälle von Fremdstoffen oder Additiven, die Trennung von Materialverbänden oder auch die Rückgewinnung der Grundbausteine von Kunststoffpolymeren (chemisches oder enzymatisches Recycling), müssen auch die bestehenden Verfahren effizienter und umweltfreundlicher gestaltet werden. Die Forschungsförderung hat sich des Themas angenommen: Technische Innovationen für eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft wurden und werden z. B. im Rahmenprogramm »Forschung für die Nachhaltige Entwicklung« (FONA) des BMBF (o.J.d) im Bereich »Rohstoffeffizienz und Kreislaufwirtschaft« gefördert. Dabei stehen u. a. folgende Schwerpunkte im Vordergrund:

- › neue Designkonzepte, Geschäftsmodelle und digitale Technologien für innovative Produktkreisläufe zur Stärkung einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft (Fördermaßnahme »ReziProK«; DECHEMA 2020);
- › Markteintritt innovativer Technologien auf den industriellen Markt zur Ressourceneffizienz (Fördermaßnahme »r+Impuls«; BMBF o.J.a);
- › neue Designkonzepte und innovative Bauprodukte sowie Verwertung von mineralischen Stoffströmen (Fördermaßnahme »ReMin«; BMBF o.J.c);
- › Kunststoffrecyclingtechnologien (Fördermaßnahme »KuRT«; BMBF 2020) und ihre Unterstützung durch KI (u. a. im KI-Hub-Kunststoffverpackungen¹²³).
- › Außerdem werden neue digitale Ansätze und Verfahren zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit von Umwelttechnologien, u. a. im Bereich der Kreislaufwirtschaft (Fördermaßnahme »DigitalGreenTech«¹²⁴), sowie die Spitzenforschung von kleinen und mittleren Unternehmen zur Erhöhung der Effizienz des Rohstoffeinsatzes unterstützt (Fördermaßnahme »KMU-innovativ: Rohstoffeffizienz«; (BMBF o.J.b). Demonstrationsprojekte und großtechnische Erstanwendung neuer technologischer Verfahren und Verfahrenskombinationen werden wiederum vom BMUV (2021) im Rahmen des Umweltinnovationsprogramms gefördert.

Förderprogramme zur Unterstützung der Forschungs- und Entwicklungsbemühungen in der Recyclingbranche und darüber hinaus sind zweifelsohne auch zukünftig unerlässlich. Es wäre jedoch deutlich zu kurz gegriffen, die Verbesserung des Rezyklateinsatzes primär als technische Optimierungsaufgabe aufzufassen. Denn zum einen gibt es Grenzen des sinnvoll Machbaren, sodass die Verbesserung der Rückgewinnungsquoten – vor allem bei Materialien, die nur in geringer Menge im Abfallstrom vorhanden sind – ab einem bestimmten Punkt mit einem so großen technischen Aufwand verbunden ist, dass bei der Wirtschaftlichkeit sowie oft auch der Ökobilanz ggf. deutliche Abstriche zu machen sind. Dies scheint z. B. bei vielen Pyrolyseverfahren und Verfahren zur Vergasung noch der Fall zu sein (Garcia-Gutierrez et al. 2023, S. 69). Zum anderen zeigt die Analyse der Fallbeispiele in diesem Bericht, dass die wesentlichen Stellschrauben für die Verbesserung des Rezyklateinsatzes nicht auf technischer, sondern auf rechtlicher sowie wirtschaftlicher Ebene liegen. So ist vieles an technischen Verbesserungen bereits vorhanden (z. B. im Bereich moderner Sortiertechnologien bei Verpackungsabfällen), wird von den Unternehmen aber nicht umgesetzt, da keine ausreichende Investitionssicherheit gegeben ist.

Um innovative Technologien und Prozesse für ein ressourceneffizientes und kreislaforientiertes Wirtschaftssystem in die Praxis zu überführen, bedarf es veränderter Rahmenbedingungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Folgende Handlungsfelder sind dabei zentral:

- › *Entwicklung eines geeigneten Politikmix* durch Schaffung von Anreizsystemen, gesetzlichen Vorgaben sowie Nachfragemechanismen. Das Ziel muss sein, dass Sekundärrohstoffe bei ähnlicher Qualität gegenüber Primärrohstoffen nicht schlechter gestellt sind und Impulse für Marktentwicklung und Innovation gegeben werden.

¹²³ <https://ki-hub-kunststoffverpackungen.de/> (24.1.2024)

¹²⁴ <https://digitalgreentech.de/> (24.1.2024)

- › *Systematische Evaluierung von Politikmaßnahmen*, ihrer Lenkungs- und Nebenwirkungen. Dafür braucht es auch eine Weiterentwicklung der statistischen Datenbasis, um die Transformation zur Kreislaufwirtschaft angemessen bewerten zu können.
- › *Aufbau und Stärkung internationaler Kooperationen*, um integrierte Wertschöpfungsketten für die nachhaltige Kreislaufwirtschaft auf globaler Ebene zu entwickeln und aufzubauen.

5.1 Entwicklung eines geeigneten Politikmix

Aus einer ökonomischen Perspektive bremsen verschiedene Hemmnisse die Nutzung von Sekundärrohstoffen und führen zu einem Marktversagen. Drei Hemmnisse sind besonders relevant (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2022, S. 11 u. 86):

- › Negative Externalitäten (d. h. soziale sowie nicht eingepreiste Umweltwirkungen) entlang der Wertschöpfungskette verändern die relativen Preise auf dem Markt zugunsten von Primärmaterialien und zu Lasten von Sekundärrohstoffen.
- › Geteilte Anreize: Von kreislauffähigen Produkten sowie der Sammlung und Verarbeitung von Sekundärrohstoffen profitieren nur bestimmte Akteure, sodass oft kein übergreifendes Interesse besteht, gemeinsam optimierte Lösungen zu entwickeln und Vorgaben einzuhalten.
- › Informatorische Hemmnisse hindern Akteure daran, ressourcenschonende Lösungsansätze umzusetzen, da ihnen das Wissen zu Umweltwirkungen und Effizienzpotenzialen entlang der Wertschöpfungskette fehlt.

Eine Reihe von politischen Steuerungsinstrumenten, die sich zum Abbau dieser Hemmnisse eignen, wurden in Kapitel 4 untersucht (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2022, S. 86). Diese umfassen gesetzliche Produktstandards, produktions- wie verbrauchsseitig belastende ökonomische Instrumente, die öffentliche Beschaffung sowie kooperative Instrumente (wie freiwillige Vereinbarungen). Bislang wird in Deutschland das sich bietende Repertoire an Politikinstrumenten noch nicht ausgenutzt. Um ausreichende Lenkungswirkungen zu entfalten, ist von zentraler Bedeutung, dass Instrumente in einem Politikmix ineinandergreifen und zusammengedacht werden. Ökonomische Instrumente und verbindliche Produktstandards sind besonders geeignet, negative Externalitäten und geteilte Anreize auszugleichen. Der Politikmix sollte zudem informatorische und kooperative Instrumente enthalten, um die notwendige Wissensbasis für zirkuläre Wirtschaftskonzepte zu schaffen. Neue, verbindliche Vorgaben zu verschiedenen Produktgruppen werden aktuell auf EU-Ebene festgelegt und voraussichtlich neue Dynamiken auf den Märkten für Sekundärrohstoffe auslösen. Deutschland könnte diese Regelungen z. B. mit gezielten ökonomischen Anreizen unterfüttern und so die erwünschte Lenkungswirkung verstärken. Im Folgenden werden weitere Hinweise zur Ausgestaltung eines Instrumentenmix gegeben. Diese können jedoch nur sehr allgemeiner Art sein, da Politikmaßnahmen immer abfallspezifisch entwickelt werden müssen.

Fehlanreize korrigieren

Ökonomische Instrumente können dafür genutzt werden, Fehlanreize wie negative Externalitäten oder die ungleiche Verteilung von Nutzen und Kosten bei der Abfallsammlung und -verwertung auszugleichen (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2022, S. 87). Durch die Besteuerung von Primärrohstoffen oder nicht rezyklathaltigen Produkten lassen sich fairere Ausgangsbedingungen für Rezyklate auf dem Markt schaffen und Anreize für Wirtschaft und Gesellschaft setzen, Ressourcen effizienter zu nutzen und stärker auf ressourcenschonende Alternativen zurückzugreifen. Bis auf wenige Ausnahmen (Pfandpflichten im Getränkebereich und für Autobatterien, Anreizsysteme zur ökologischen Gestaltung von Verpackungen, Aufnahme der Müllverbrennung in den deutschen Emissionshandel für 2024) spielen ökonomische Instrumente zur Stärkung des Rezyklateinsatzes in Deutschland bislang eine untergeordnete Rolle. Zu prüfen wäre, in welchen Bereichen die Einführung produktions- und verbrauchsseitig belastender ökonomischer Instrumente hierzulande sinnvoll sein könnte. Orientierung könnten dabei die Erfahrungen anderer EU-Länder bieten, die solche Instrumente teilweise bereits mit Erfolg eingeführt haben. Für die in den Fallstudien beleuchteten Abfallbereiche könnten insbesondere folgende Möglichkeiten in Betracht gezogen werden (zum Folgenden Hinzmann et al. 2022, S. 87):

- › *Mineralische Bauabfälle:* Vor dem Hintergrund der vielversprechenden Erfahrungen aus Großbritannien wäre die Einführung einer Primärbaustoffsteuer zur Steigerung der Nachfrage nach Sekundärbaustoffen zu erwägen kombiniert mit weiteren Maßnahmen, wie z. B. der Verteuerung bzw. dem Schließen billiger Entsorgungsmöglichkeiten. Anhaltspunkte zur konkreten Ausgestaltung des Instrumentes inklusive flankierender Maßnahmen haben Baronick et al. (2019) in einem Positionspapier dargelegt. Zu klären wäre jedoch, inwiefern eine solche Steuer als Verbrauchssteuer ausgestaltet werden kann, was in Deutschland gemäß den finanzverfassungsrechtlichen Bestimmungen erforderlich wäre (Kap. 3.3).
- › *Kunststoffverpackungen:* Die Lenkungswirkung der Lizenzentgelte der dualen Systeme könnte durch eine deutlichere Gebührenstaffelung gestärkt werden, um wirkungsvolle Anreize für ressourcenschonende und recyclingfähige Verpackungen zu setzen. Außerdem könnte auch die ab 2025 vorgesehene Umlage der EU-Eigenmittel (Plastiksteuer) (Bundesregierung 2024) auf die Herstellung von nicht recyclingfähigen Kunststoffverpackungen in Deutschland einen weiteren Anreiz für einen ressourcenschonenden Umgang mit diesem langlebigen Material setzen. Die vorgesehene Abgabe auf Produkte aus Einwegplastik könnte so ausgestaltet werden, dass der Einsatz von Rezyklaten begünstigt wird, wie es beispielsweise in Spanien der Fall ist.
- › *Elektroaltgeräte:* Angesichts der deutlich verfehlten Sammelziele in Deutschland könnten durch Einführung von Pfandsystemen oder einer vorgezogenen Recyclinggebühr Verbraucher/innen stärker animiert werden, ihre Altgeräte zurückzubringen und so einer hochwertigen Verwertung zuzuführen. Erfahrungen mit ähnlichen Instrumenten liegen z. B. in Schweden (Abgabe auf Elektro- und Elektronikgeräte) sowie der Schweiz (vorgezogene Recyclinggebühr) vor, die beide höhere Sammelquoten als Deutschland aufweisen.

Darauf hinzuweisen ist allerdings, dass die zielgerichtete Ausgestaltung ökonomischer Instrumente mit Blick auf die erwünschten Lenkungswirkungen eine äußerst herausfordernde Aufgabe darstellt. Bei Abgaben beispielsweise gilt es Abgabenobjekt, Bemessungsgrundlage, Höhe und ggf. Freibeträge oder Freigrenzen festzulegen (Wirth et al. 2013, S. 44). Die Schwierigkeit besteht darin, das Preissignal so zu bemessen, dass eine Lenkungswirkung erreicht wird und die Nebenwirkungen nicht zu stark ausfallen. Zu diesen gehören eventuelle soziale Ungleichheiten. Soweit die Instrumente auch die Produktion belasten, wäre ein Grenzsteuerausgleich oder gar Lösungen auf europäischer Ebene anzustreben, um Wettbewerbsnachteile hiesiger Unternehmen in dem gemeinsamen europäischen Markt abzufedern.

Ausreichende Mindeststandards sichern

Im Unterschied zu ökonomischen Instrumenten entfalten gesetzliche Vorgaben ihre Lenkungswirkung auf direktem Weg und werden in der Regel dazu eingesetzt, bestimmte Mindeststandards zu sichern. Zur Stärkung des Rezyklateinsatzes erscheinen hier Maßnahmen auf drei Ebenen besonders vielversprechend: die Konkretisierung der Pflichten zur Produktverantwortung über produktspezifische Regelungen, die Festlegung verbindlicher Informationspflichten sowie Regelungen zum Ende der Abfalleigenschaft.

Konkretisierung der Produktverantwortung: Gemäß dem Prinzip der Produktverantwortung sind Hersteller verpflichtet, ihre Produkte so zu gestalten, »dass bei ihrer Herstellung und ihrem Gebrauch das Entstehen von Abfällen vermindert wird und sichergestellt ist, dass die nach ihrem Gebrauch entstandenen Abfälle umweltverträglich verwertet oder beseitigt werden« (§ 23 KrWG). Die Produktverantwortung gilt als ein »Eckpfeiler der modernen Kreislaufwirtschaft« (BMUV o.J.d). Allerdings wurden die Anforderungen der Produktverantwortung (z. B. Rücknahmepflichten der Hersteller, Sammel- und Verwertungsquoten, Vorgaben zur Recyclingfähigkeit, Rezyklateinsatzquoten) bislang nur für wenige Produktgruppen spezifiziert: Verpackungen, Altöl, Batterien, Kraftfahrzeuge sowie Elektro- und Elektronikgeräte. Zu prüfen wäre deshalb einerseits, für welche weiteren Produktgruppen eine gesetzliche Konkretisierung der Produktverantwortung sinnvoll erscheint (z. B. Textilien, Möbel). Andererseits sind auch die bereits bestehenden Gesetze laufend daraufhin zu überprüfen, inwiefern die dort festgelegten Regelungen ausreichend sind, und bei Bedarf Anpassungen vorzunehmen. Vorgaben zum kreislauffähigen Produktdesign (insb. Demontage- und Recyclingfähigkeit) kommt dabei besondere Bedeutung zu.

Die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft im Allgemeinen sowie der Rezyklateinsatz im Speziellen wird maßgeblich durch Informationsdefizite behindert (Wilts/Berg 2017). Ein weiteres Schlüsselinstrument auf ordnungsrechtlicher Ebene sind deshalb *verbindliche Informationspflichten* (z. B. zu den verwendeten Materialien) für be-

stimmte Abfallströme, um die entlang der Wertschöpfungskette verwendeten Materialien und Chemikalien rückverfolgbar zu machen (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2022, S. 88). Dieser Schritt könnte eine sortenreine Abfalltrennung und dadurch (neue) hochwertige Recyclingpfade maßgeblich erleichtern. Transparenzstandards nützen dabei nicht ausschließlich der Recyclingfähigkeit. Wenn Hinweise zur Materialzusammensetzung, Demontage und fachgerechten Entsorgung vorliegen, können Produkte und Komponenten auch leichter repariert und zum Wiedereinsatz vorbereitet werden. Zudem erleichtern Informationspflichten die Marktüberwachung sowie die Evaluierung von Politikmaßnahmen. Aktuell werden Informationspflichten sowie die Einführung von digitalen Produktpässen vor allem auf der EU-Ebene diskutiert und entsprechende Vorgaben erarbeitet. Deutschland könnte sich dafür stark machen, dass die geplanten Instrumente sowohl ein Recycling als auch die Wiederverwendung von Produkten unterstützen und für eine möglichst breite Produktpalette eingeführt werden. Außerdem bietet sich mit der digitalen Transformation die Chance, die für zirkuläres Wirtschaften erforderlichen Informationsflüsse mittels durchgängiger Datenkreisläufe besser organisieren zu können (Ramesohl et al. 2022), beispielsweise um die Qualität von Rezyklaten zu dokumentieren und für Materialbeschaffende transparent zu machen (Berg o.J.). Bislang wurden digitale Technologien (z. B. Sensorsysteme) allerdings nicht systematisch eingesetzt (Kap. 3.1.3). Entsprechend wäre die Einführung verbindlicher Informationspflichten zusammen mit der konsequenten, praxisorientierten Förderung digitaler Lösungen zu verbinden. Die digitale Vernetzung der Wertschöpfungssysteme ist zudem nur umsetzbar, wenn sich neben Standards und Schnittstellen auch eine »Kultur des proaktiven Teilens von Daten« bei allen involvierten Unternehmen und Akteuren etabliert (Ramesohl et al. 2022, S. 4).

Schließlich erscheint vordringlich, klare Regelungen zum *Ende der Abfalleigenschaft* von aufbereiteten Sekundärmaterialien zu schaffen (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2022, S. 88). Gemäß § 5 des KrWG kann die Bundesregierung entsprechende Rechtsverordnungen für bestimmte Stoffe und Gegenstände erlassen. Die derzeit bestehende Rechtsunsicherheit verunsichert Marktakteure und bremst die Nutzung von Rezyklaten sowie von Investitionen in innovative Recyclingtechnologien. Laut Koalitionsvertrag hat sich die aktuelle Bundesregierung (SPD et al. 2021, S. 34) bereits zum Ziel gesetzt, qualitätsgesicherte Abfallprodukte aus dem Abfallrecht zu entlassen und ihnen Produktstatus zu geben. Es handelt sich hierbei um eine wirksame Maßnahme, um Rechtssicherheit und Planungssicherheit für Unternehmen zu schaffen, insbesondere in Bereichen, für die in näherer Zukunft keine EU-weiten Lösungen zu erwarten sind. Erstens wäre zu prüfen, welche Abfallbereiche neben mineralischen Ersatzbaustoffen – wofür eine Verordnung derzeit erarbeitet wird – hierfür vordringlich zu behandeln sind. Durch die Europäische Kommission (EK 2022c) wurden zunächst Kunststoffe und Textilien priorisiert. Für diese beiden Produktgruppen werden derzeit Abfallendekriterien erarbeitet. Zweitens wären dann erforderliche Qualitäts- und Prozessstandards zu definieren, die es für die Entlassung der Abfallprodukte aus dem Abfallrecht einzuhalten gilt.

Absatzmärkte stärken

Wie die Fallstudien in Kapitel 3 zeigen, ist die mangelnde Nachfrage nach Rezyklaten als eines der zentralen Hindernisse für die Rückgewinnung hochwertiger Sekundärmaterialien anzusehen (siehe auch Gandenberger 2021, S. 31). Verlässliche Absatzmärkte zu schaffen, ist in Verbindung mit verbindlichen Produktstandards sowie Informationspflichten, die für eine ausreichende Rezyklatqualität wichtig sind, eine prioritäre Aufgabe, um Akteuren Planungssicherheit zu geben und Investitionen in moderne Infrastrukturen sowie Anpassungen von Produktionsabläufen anzureizen. Infrage kommen dafür vor allem zwei Instrumente: Mindesteinsatzquoten für Rezyklate sowie die öffentliche Beschaffung.

Produktspezifische *Mindesteinsatzquoten* für Rezyklate gesetzlich festzuschreiben (z. B. über Verordnungen des KrWG), ist ein effektives Instrument für eine Stärkung der Rezyklatnachfrage – allerdings nur dann, wenn bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind. Vor allem müssen die Verfügbarkeit von Rezyklaten in ausreichender Menge sowie die technische Machbarkeit gegeben sein. Zudem braucht es definierte Standards bezüglich Rezyklatqualität sowie Methoden, um diese auch nachzuweisen. Aufgrund dieser zahlreichen Anforderungen setzt die Einführung von Mindestrezyklatquoten viel Wissen aufseiten des Gesetzgebers voraus (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2022, S. 89 f.). Besonders sinnvoll erscheinen Mindestvorgaben für den Rezyklateinsatz für Beton sowie bei Kunststoffverpackungen. Allerdings können Mindesteinsatzquoten für Rezyklate auf nationaler Ebene nur in Bereichen eingeführt werden, für die keine abschließenden europäischen Harmonisierungsvorgaben bestehen. In Bereichen mit entsprechenden europäischen Vorgaben, wie z. B. im Verpackungsbereich, sollte sich die

deutsche Bundesregierung für die Einführung von Mindestrezyklatquoten auf EU-Ebene einsetzen. Als zusätzliche effektive, jedoch weniger verbindliche Option könnten im Rahmen von öffentlichen Ausschreibungen, die über ein entsprechendes Beschaffungsvolumen verfügen, gezielt Produkte mit einem Mindestrezyklatanteil gefordert werden (beispielsweise für Teppiche, Dienstbekleidung, Möbel; siehe das Beispiel Niederlande; Kap. 4.2.3).

Auch darüber hinaus stellt die *öffentliche Beschaffung* eine geeignete Stellschraube zur Stärkung der Rezyklatnachfrage dar (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2022, S. 89). Aus rechtlicher Sicht dürfen öffentliche Beschaffungsstellen in Deutschland grundsätzlich umweltbezogene Aspekte in der Beschaffung berücksichtigen. In öffentlichen Ausschreibungen können beispielsweise gezielt recyclingfähige oder rezyklathaltige Produkte nachgefragt werden. Für Bundesbehörden besteht seit 2020 durch das KrWG sogar die Pflicht, kreislauffähige Erzeugnisse zu bevorzugen. Für Länder und Kommunen, die für den größten Anteil (etwa 88 %) der öffentlichen Ausgaben verantwortlich sind, gibt es jedoch keine verbindlichen Vorgaben. Solange jedoch öffentliche Stellen lediglich auf freiwilliger Ebene motiviert und angeregt werden, Leitlinien für eine umweltfreundliche Beschaffung zu berücksichtigen, gibt es keine verlässliche Nachfrage und daher keinen starken Anreiz für die Wirtschaft. Um die Nutzung von Sekundärmaterialien anzuregen, deutliche Marktsignale zu setzen und allgemein eine umweltfreundliche und ressourcenschonende öffentliche Beschaffung zum Standard zu machen, wären verbindliche Vorgaben möglichst auch auf die Länder- und Kommunalebene auszuweiten. Eine Option dafür könnte sein, öffentliche Vergabestellen zu verpflichten, Lebenszykluskosten zu ermitteln und bei der Vergabe zu beachten. Um die Vergabestellen nicht zu überfordern, könnte dies zunächst nur für bestimmte Teilbereiche und ab einer bestimmten Höhe der Auftragswerte eingeführt werden. Ein Fokus sollte dabei vor allem auf den Bausektor gelegt werden, da die öffentliche Verwaltung in diesem Bereich einen großen Anteil an der Gesamtnachfrage ausmacht und daher eine erhebliche Lenkungswirkung erzielen kann (Kap. 3.3).

Aufgrund der Komplexität des Vergaberechts bestehen bei den Mitarbeiter/innen der Ausschreibungsstellen große Unsicherheiten, wie umweltfreundliche Beschaffungen zu realisieren sind (Muchow et al. 2022, S. 87). Wichtig sind deshalb Begleitmaßnahmen wie die Schulung des Beschaffungspersonals und gleichzeitig die Vereinfachung von Vergabeprozessen, indem beispielsweise Textbausteine für recyclingfähige und rezyklathaltige Erzeugnisse bereitgestellt werden (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2022, S. 89 f.). Mit der Kompetenzstelle für nachhaltige Beschaffung gibt es bereits eine Einrichtung, die dafür zuständig ist. Der Verwaltungsaufwand kann darüber hinaus weiter reduziert werden, indem öffentliche Stellen auf bestehende Standards für Reparierbarkeit, Demontierbarkeit, Recyclingfähigkeit etc. zurückgreifen (Müller et al. 2021, S. 13). Das Land Berlin kann als Vorbild für die Umsetzung dienen. Dort müssen öffentliche Auftraggeber laut § 7 des BerlAVG bereits ökologische Kriterien berücksichtigen und Lebenszykluskosten bei der Bewertung von Angeboten heranziehen.

Eine qualitativ hochwertige Kreislaufführung von Materialien beschleunigen

Um die Kreislaufführung von bestimmten Materialien für ausgewählte hochwertige Anwendungen zu ermöglichen, müssen sich Akteure entlang der Wertschöpfungskette abstimmen und auf bestimmte Qualitätsstandards einigen (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2022, S. 90). Oftmals geht es dabei um sehr detaillierte Bestimmungen zu produktspezifischen Materialanforderungen, die zudem häufig an den aktuellen Stand der Technik angepasst werden müssen. Gesetzliche Vorgaben haben hier den Nachteil, dass sie mit einem hohen Verwaltungsaufwand verbunden sind und dass bis zu ihrem Inkrafttreten viel Zeit vergehen kann. Mithilfe von freiwilligen Vereinbarungen zwischen staatlichen und wirtschaftlichen Akteuren können schneller Lösungsansätze erarbeitet und umgesetzt werden, die auch das erforderliche Detailwissen wirtschaftlicher Akteure berücksichtigen. Auch Grundlagen für die Entwicklung von verbindlichen Produktstandards und freiwilligen Gütesiegeln lassen sich so schaffen. Insbesondere kann das Instrument dabei helfen, höhere Qualitäten von Sekundärmaterialien zu ermöglichen und neue Einsatzgebiete für Rezyklate zu erschließen.

Prinzipiell empfiehlt es sich, auch in Deutschland freiwillige Vereinbarungen gezielt einzusetzen, um zirkuläre Systeme zu fördern. Freiwillige Vereinbarungen haben hierzulande keinen verpflichtenden Charakter und sind daher nicht wirkungsvoll genug, um die skizzierten Ziele zu erreichen. Um freiwillige Vereinbarungen mit einem stärker verbindlichen, ggf. vertraglichen Charakter (sowie Sanktionsmaßnahmen) einzuführen, wäre zunächst die Rechtskonformität solcher Maßnahmen zu prüfen (Wilts et al. 2010). Eine Möglichkeit wäre, sich stärker am Format der niederländischen Green Deals zu orientieren (Kap. 3.1.3). Konkret würde dies ein Programm und eine zentrale Koordinationsstelle für strukturierte, transparente und wirkungsvolle freiwillige Verein-

barungen umfassen (Hinzmann et al. 2022, S. 90). Dabei sollten Pilotprojekte und Erprobungsphasen ein integraler Bestandteil der Vereinbarungen sein und deren zentrale Erkenntnisse sollten veröffentlicht werden. Auf diese Weise könnte das Instrument auch zur Innovationsförderung und -beschleunigung beitragen.

5.2 Systematische Evaluierung von Politikmaßnahmen auf Basis aussagekräftiger Indikatoren

Überall in der EU und auch weltweit werden Instrumente entwickelt und eingesetzt, um die Mengen anfallender Abfälle zu reduzieren bzw. zu verwerten und den Einsatz von Rezyklaten zu steigern. Allerdings bestehen erhebliche Wissenslücken darüber, ob die Instrumente die erzielte Wirkung auch tatsächlich erreicht haben, wie das IRP (2021, S. 9) am Beispiel der Kunststoffpolitik feststellte. So sind in der Datenbank »Plastics Policy Inventory«,¹²⁵ die Public-Policy-Dokumente zu Maßnahmen im Bereich Kunststoffpolitik seit 2000 sowie zu vorliegenden wissenschaftlichen Evaluierungen dieser Politiken dokumentiert, überwiegend Wirkungsmessungen zu Einzelmaßnahmen enthalten. Hingegen wurden die Wirkungen von komplexeren Politikinstrumenten (z. B. Anreizmechanismen) bislang kaum systematisch evaluiert. Ein systematisches Monitoring der Wirkungen neu eingeführter Instrumente, ihrer Kosten, nicht intendierten Folgen und sozioökonomischen Wirkungen wäre jedoch wichtig, um Effektivität und Effizienz der Maßnahme ex post beurteilen und ggf. nachsteuern zu können (Kwon 2023; OECD 2021, S. 40).

Für ein Monitoring der Lenkungswirkungen von Politikmaßnahmen, die spezifisch auf eine Verbesserung des Rezyklateinsatzes abzielen, werden vor allem Statistiken zur tatsächlich genutzten Menge an Sekundärrohstoffen benötigt, aufgeschlüsselt nach Materialien/Produktgruppen. Dazu gibt es bislang jedoch keine aussagekräftigen Indikatoren, sodass eine evidenzbasierte Politikentwicklung kaum möglich ist. Erfolge der Kreislaufwirtschaft werden in der EU vor allem anhand von Recyclingquoten beurteilt. Bis vor Kurzem wurden sie an der Menge der Abfälle bemessen, die einer stofflichen Verwertung zugeführt werden (Inputberechnung; Dittrich et al. 2021, S. 13). Für Siedlungsabfälle gilt zwar seit der novellierten Abfallrahmenrichtlinie eine neue outputorientierte Berechnungsmethode, an der sich jedoch ebenfalls nicht ablesen lässt, »welche Menge an Sekundärmaterial real wieder der Produktion und einer neuen Nutzung zugeführt wird« (KRU 2019, S. 9). Sie spiegelt eher die Qualität der Sammel- und Recyclinginfrastruktur als die Qualität und Funktionsfähigkeit der Kreislaufwirtschaft oder die Umsetzung der Abfallhierarchie (KRU 2019, S. 4). In welchen Mengen Rezyklate produziert und eingesetzt werden und zu einer Substitution von Primärmaterialien führen, wird somit in den von Eurostat bzw. dem Statistischen Bundesamt erhobenen Statistiken zu Abfallaufkommen und -bewirtschaftung nicht abgebildet.¹²⁶ Auch die CMU, welche im Rahmen des neuen Monitoringframeworks des Aktionsplans für eine Kreislaufwirtschaft 2018 eingeführt wurde, um den Anteil des erfassten Sekundärmaterials für die stoffliche Verwertung an der gesamten Rohstoffnachfrage abzubilden, basiert auf diesen Statistiken (Kap. 2.3; Dittrich et al. 2021, S. 30).

Erforderlich wäre deshalb die Entwicklung geeigneter Indikatoren, die den Erfolg der Kreislaufwirtschaft bzw. den tatsächlichen Rezyklateinsatz realistischer bemessen (Handke et al. 2019; KRU 2019). Eine Quote, die das Verhältnis von eingesetzten Sekundärrohstoffen zum insgesamt genutzten Materialaufwand (Primärrohstoffe und Sekundärrohstoffe) für einzelne Materialien oder Produktgruppen quantifiziert und idealerweise auch die Hochwertigkeit des Rezyklateinsatzes berücksichtigt, würde sich dafür besser als die bisherigen Indikatoren eignen. Eine solche Substitutions- oder Rezyklateinsatzquote wäre nicht nur ein wichtiger »Erfolgsmaßstab für die Kreislaufwirtschaft« (KRU 2019), sondern auch hilfreich für die zielgerichtete Förderung des Rezyklateinsatzes. Ihre Berechnung ist für verschiedene Materialien/Produktgruppen unterschiedlich schwierig zu realisieren, je nachdem, ob auf Daten der Branchenverbände zurückgegriffen werden kann, die bislang nicht in die offiziellen Statistiken einfließen. Zu prüfen wäre deshalb, welche Optionen es zur Einführung einer Substitutionsquote gibt und welche empirischen sowie methodischen Fragen für eine konsistente Berechnung zu klären wären. Dabei könnte auf bereits vorliegenden Untersuchungen aufgebaut werden (Dittrich et al. 2021; KRU 2019; Steger et al. 2019). Eine Weiterentwicklung der bestehenden Abfallstatistik auf europäischer Ebene wäre grundsätzlich zu befürworten. Deutschland könnte aber auch mit gutem Beispiel vorangehen und auf nationaler Ebene verlässliche Datengrundlagen für ein Monitoring der Kreislaufwirtschaft schaffen.

¹²⁵ <https://nicholasinstitute.duke.edu/effectiveness-study-library> (24.1.2024)

¹²⁶ <https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/waste/data> (24.1.2024)

5.3 Aufbau und Stärkung internationaler Kooperationen

Angesichts einer global hochgradig vernetzten Wirtschaft sowie der hohen Handelsintensität und Rohstoffabhängigkeit Deutschlands haben Maßnahmen zur Entwicklung der Kreislaufwirtschaft auf nationaler Ebene nur eine begrenzte Reichweite. Mehr als die Hälfte der weltweiten Kunststoffproduktion erfolgt in Asien, ein knappes Drittel alleine in China (Plastics Europe 2022, S. 20). Elektro- und Elektronikprodukte wurden 2021 zu 48 % aus Südostasien inklusive China und Japan nach Deutschland importiert (Statista o.J.c). Auch der internationale Handel mit Abfällen floriert.¹²⁷ Vor diesem Hintergrund sollte insbesondere die globale Wirkung von EU-Vorgaben nicht unterschätzt werden, da auch international operierende Hersteller ihre Produkte nur dann auf dem wichtigen EU-Markt in Verkehr bringen dürfen, wenn sie alle geltenden Anforderungen erfüllen.¹²⁸ Aufgrund dieser internationalen Handelsströme bringen viele der vorab beschriebenen Instrumente, die zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes zielführend erscheinen, potenziell zunächst Wettbewerbsnachteile hiesiger Unternehmen mit sich gegenüber solchen, die von diesen Maßnahmen nicht betroffen sind. Die Instrumente werden deshalb üblicherweise so ausgestaltet, dass ihre Lenkungswirkung moderat bleibt. Wichtig erscheint deshalb, auf internationaler Ebene darauf hinzuwirken – auch über den EU-Binnenmarkt hinaus –, dass ein möglichst klarer und einheitlicher Rahmen für die Erzeugung von und den Handel mit Rezyklaten geschaffen wird. Ansatzpunkte bieten sich auf folgenden Ebenen:

- > Über internationale Kooperationen kann Einfluss auf das Design bzw. die Recyclingfähigkeit von Produkten genommen werden, die außerhalb der EU gehandelt werden. Zudem können auf diesem Weg Umweltzeichen und Informationspflichten harmonisiert und die Informationsgrundlage über Materialflüsse verbessert werden (OECD 2021, S. 40 f.). Möglichkeiten dazu bieten sich beispielsweise dann im Rahmen des rechtlich verbindlichen UN-Plastikabkommens, welches bis 2024 erarbeitet werden soll, um auf globaler Ebene Instrumente und Maßnahmen für die Regulierung von Kunststoffen entlang des gesamten Lebenszyklus festzulegen (UNEP 2022).
- > Der internationale Handel von Abfällen könnte so reguliert werden, dass diese nur noch in Länder exportiert werden dürfen, die in der Lage sind, sie hochwertig zu recyceln. Außerdem sollten die Importländer über ausreichende Kapazitäten für die Verwertung der importierten Abfälle verfügen. Für eine Verschärfung der Regulierung des internationalen Handels von Abfällen wäre das Basler Übereinkommen in passender Weise weiterzuentwickeln (IRP 2021, S. 9 u. 43).
- > Eine Möglichkeit zur Förderung von Sammlungs- und Verwertungsinfrastrukturen in Importländern bieten bilaterale Rohstoffpartnerschaften, die als Instrument der Rohstoffstrategie der Bundesregierung der Versorgung der deutschen Industrie mit Rohstoffen dienen, aber auch einen »nachhaltigen Umgang mit Rohstoffen fördern und einen entwicklungspolitischen Beitrag leisten« sollen (UBA o.J.k). Sie könnten zum einen auf Länder erweitert werden, wo rohstoffhaltige Produkte als Abfall anfallen, und zum anderen verstärkt die produzierende Industrie und die Recyclingwirtschaft einbeziehen (Wilts et al. 2014, S. 63). Zugleich wären Handelsbeschränkungen, die den internationalen Transfer von besten verfügbaren Techniken (BVT) behindern, möglichst abzubauen (OECD 2021, S. 40 f.).

5.4 Schlussbemerkung

Bei der Erarbeitung von Strategien und Instrumenten zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes muss berücksichtigt werden, dass das Recycling und die Nutzung von Rezyklaten nur einen Baustein in einer ressourcenschonenden Kreislaufwirtschaft darstellen (dazu und zum Folgenden Hinzmann et al. 2022, S. 86). Gemäß dem Leitbild der Abfallhierarchie ist das stoffliche Recycling nachrangig nach der Abfallvermeidung und Wiederverwendung einzuordnen. Bei der Einhaltung dieser Rangfolge kann es zu Zielkonflikten zwischen den einzelnen Stufen kommen und es besteht zudem die Gefahr, dass Pfadabhängigkeiten entstehen. So stehen beispielsweise vorhandene Ka-

¹²⁷ Insgesamt exportierten die EU27-Staaten 2020 27,5 Mio. t recycelbare Rohstoffe, gleichzeitig wurden 8,3 Mio. t Abfall aus Nicht-EU-Staaten importiert (Statista 2023, S. 16).

¹²⁸ Siehe dazu beispielsweise die kürzliche Anpassung von iPhone-Ladekabeln an die EU-Standards (USB-C-Anschluss) durch Apple (ZEIT ONLINE 2023).

pazitäten von Müllverbrennungsanlagen in einem Interessenkonflikt mit der höheren Stufe, dem Recycling (Salmenperä 2021). Genauso birgt der Ausbau der Recyclingkapazitäten eine gewisse Gefahr, dass Fehlanreize hin zu schnelleren Produktkreisläufen entstehen, um Anlagen dauerhaft rentabel betreiben zu können (Greer et al. 2021). Um einer solchen Entwicklung von vorneherein entgegenzuwirken, darf Recycling nicht einseitig gefördert werden. Vielmehr ist es essenziell, bei der Wahl von Politikinstrumenten die absolute Reduktion von Abfällen und Möglichkeiten der Wiederverwendung mitzudenken. Konkret bedeutet dies, dass das Recycling und die Nutzung von Sekundärrohstoffen im Einklang gebracht und kombiniert werden sollten mit weiteren Kreislaufwirtschaftsstrategien, wie beispielsweise einer langen Nutzungsdauer von Produkten und Materialien oder durch ein Recht auf Reparatur.

Die damit verbundene grundlegende Umstellung des Wirtschaftsmodells ist aufgrund der Heterogenität der zahlreichen Stoff- und Materialströme, der Vielzahl der involvierten Akteursinteressen (Sammelbetriebe, Sortier- und Verwertungsunternehmen, Verarbeiter, Produkthersteller, Handel, Verbraucher/innen, Forschung) und Governanceebenen (von international bis kommunal) sowie der in vielen Bereichen unzureichenden Datenlage eine äußerst herausfordernde Aufgabe, bei der für Steuerung und Rahmensetzung vor allem die Politik gefragt ist. Gebraucht werden sehr spezifische, kleinteilige Maßnahmen, die auf die relevanten Abfallströme zugeschnitten sind, sich dabei jedoch zu einem stimmigen, kohärenten Ganzen zusammenfügen müssen. Zudem gilt es bei vielen der in den letzten Jahren im Rahmen von Forschungs- und Pilotprojekten erarbeiteten und getesteten Lösungen (z. B. Lösungen für die sichere Weitergabe von Information zu Produkten entlang der Wertschöpfungskette, digitale Lösungen für industrielle Kunststoffkreisläufe), Bedingungen für eine systemische Einführung zu identifizieren und potenzielle Hemmnisse einer Skalierung zu beheben. Eine kritische Masse an Akteuren entlang der Wertschöpfungskette ist für eine Einführung von Schlüsseltechnologien zu gewinnen und Umsetzungsanforderungen sind zu klären.

Zu schaffen sein dürfte all das nur im Rahmen eines breiten, strategisch angelegten Politikansatzes, mit dem die Transformation zur Kreislaufwirtschaft nicht als genuin umweltpolitische Angelegenheit aufgefasst wird, sondern alle Ressorts z. B. mit Sektorzielen in die Pflicht genommen werden. Mit der derzeit in Erarbeitung befindlichen Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie bietet sich die Chance, eine konsistente, ambitionierte Gesamtstrategie zur Kreislaufwirtschaft für Deutschland zu entwickeln, die sich an verbindlichen Zielen und klaren Indikatoren ausrichtet und alle Akteure an Bord holt, um einen systemischen Wandel zu vollziehen. Die Gelegenheit ist günstig: Nicht nur, weil die EU ehrgeizige Pläne zur Kreislaufwirtschaft vorgelegt hat, sondern auch, weil sich mit der laufenden digitalen Transformation von Industrie und Handel Synergieeffekte in Richtung Kreislaufwirtschaft bieten, die es zu nutzen gilt.

6 Literatur

6.1 In Auftrag gegebene Gutachten

- Hinzmann, M.; Mederake, L.; Jacob, K.; Schritt, H. (2022): Politikinstrumente zur Steigerung des Einsatzes von Rezyklaten. Ecologic Institut gGmbH, Berlin
- Muchow, N.; Knappe, F.; Reinhardt, J. (2022): Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes. Themenfeld: Bauabfälle. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Heidelberg/Berlin
- Raatz, S.; Balinski, A.; Dirlich, S. (2022a): Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes. Themenfeld 3: Elektro- und Elektroabfälle. Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie, Dresden
- Seitz, M.; Langner, B.; Sauermann, U. (2022): Technikrends und Entwicklungsmöglichkeiten für einen verstärkten Einsatz von Rezyklaten (Themenfeld 1: Kunststoffverpackungen). Steinbeis-Transferzentrum Ressourcen-Technologie und Management, Halle
-

6.2 Weitere Literatur

- Adisorn, T.; Tholen, L.; Götz, T. (2021): Towards a Digital Product Passport Fit for Contributing to a Circular Economy. In: *Energies* 14(8), Art. 2289
- Agora Energiewende/Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie. Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin
- Aichele, H. (2022): Rohstoffe für den Transportbeton – Betonzuschlag aus überwiegend sekundären Quellen? Vortrag auf dem 9. Fachsymposium »Bausteine zum zirkulären Bauen«, Stuttgart
- Akcil, A.; Ibrahim, Y.; Meshram, P.; Panda, S. (2021): Hydrometallurgical recycling strategies for recovery of rare earth elements from consumer electronic scraps: a review. In: *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 96(7), S. 1785–1797
- Alhola, K.; Ryding, S.-O.; Salmenperä, H.; Busch, N. (2019): Exploiting the Potential of Public Procurement: Opportunities for Circular Economy. In: *Journal of Industrial Ecology* 23(1), S. 96–109
- APK AG (o.J.): Newcycling® – aus komplexen Abfällen werden hochwertige Kunststoffe. <https://www.apk.group/newcycling/> (24.1.2024)
- Aurubis (o.J.): Die Technologie des Recyclings. <https://www.aurubis.com/produkte/recycling/Technologie> (24.1.2024)
- Aurubis (2021): Umweltschutz im Aurubis-Konzern und aktualisierte Umwelterklärung 2021 der Aurubis AG der Standorte Hamburg und Lünen. https://www.aurubis.com/dam/jcr:a976ae9e-1a73-4262-9921-188d8fd30860/2021_aurubis_umweltbericht_de-.pdf (24.1.2024)
- Bahn-Walkowiak, B.; Bleischwitz, R.; Distelkamp, M.; Meyer, M. (2012): Taxing construction minerals: a contribution to a resource-efficient Europe. In: *Mineral Economics* 25(1), S. 29–43
- Bahn-Walkowiak, B.; Bleischwitz, R.; Sanden, J. (2010): Einführung einer Baustoffsteuer zur Erhöhung der Ressourceneffizienz im Baubereich. Meilenstein zu AS3.2: Maßnahmenvorschläge zur Ressourcenpolitik zur Gestaltung der Rahmenbedingungen. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Wuppertal

- Bahn-Walkowiak, B.; Griestop, L.; Gyori, G.; Tauer, R.; Wilts, H. (2021): Impulspaper: Vom Flickenteppich zur echten Kreislaufwirtschaftsstrategie. WWF Deutschland; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Unternehmen/WWF-Impulspapier-circular-economy.pdf> (24.1.2024)
- Balkan, E. (2021): Policy Guidelines for Recycled Content Mandates. ReLoop North America, <https://www.reloopplatform.org/wp-content/uploads/2021/09/Recycled-Content-Mandates-EB2021.pdf> (24.1.2024)
- Ballester, N.; Zaroffe, J. (2022): Der Kreislaufwirtschaftsaktionsplan als wirtschaftliches Kernstück des Green Deal. In: Kurth, P.; Oexle, A.; Faulstich, M. (Hg.): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Wiesbaden, S. 379–400
- BAN (Basel Action Network) (2019): Holes in the Circular Economy: WEEE Leakage from Europe. Seattle
- Bär, H.; Beermann, A.-C.; Schumacher, K.; Siemons, A.; Keimeyer, F.; Postpischil, R.; Jacob, K. (2022): Ökologische Finanzreform: Produktbezogene Anreize als Treiber umweltfreundlicher Produktions- und Konsumweisen. Verbrauchsteuern und weitere produktbezogene ökonomische Instrumente. Umweltbundesamt, TEXTE 100, Dessau-Roßlau
- Van Barnevald, J.; van der Veen, G.; Enenkel, K.; Mooren, C.; Talman-Gross, L.; Eckartz, K.; Ostertag, K.; Duque-Ciceri, N.; Fischer, T.; Gama, M.; Scheidt, L. et al. (2016): Regulatory barriers for the Circular Economy. Lessons from ten case studies. Technopolis Group, Fraunhofer ISI, thinkstep, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Amsterdam
- Baron, R. (2016): The Role of Public Procurement in Low-carbon Innovation. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris
- Baronick, M.; Burger, A.; Golde, M.; Keßler, H.; Unnerstall, H. (2019): Positionspapier zur Primärbaustoffsteuer. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- Bax, V.; Istel, K.; Jedelhauser, M.; Roth, S. (o.J.): Anmerkungen des NABU Bundesverband zum Entwurf einer Novelle des Kreislaufwirtschaftsgesetzes. Naturschutzbund Deutschland, https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/abfallpolitik/190906_nabu_krwg_stellungnahme_lang.pdf (24.1.2024)
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (o.J.): Beste verfügbare Technik BVT (BREFs) - Fakten, Hintergründe und Links. <https://www.umweltpakt.bayern.de/abfall/fachwissen/355/beste-verfuegbare-technik-bvt-brefs-fakten-hintergruende-links> (24.1.2024)
- Berg, H. (o.J.): DiLink – Digitale Lösungen für industrielle Kunststoffkreisläufe. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, [https://innovative-produktkreislaeufe.de/News/ReziProK+Transferkonferenz+2022/_/20220617 %20-%20Poster%20DiLink.pdf](https://innovative-produktkreislaeufe.de/News/ReziProK+Transferkonferenz+2022/_/20220617%20-%20Poster%20DiLink.pdf) (24.1.2024)
- Bergsma, G.; Broeren, M.; Schep, E.; Warringa, G. (2022): Mandatory percentage of recycled or bio-based plastic in the European Union. CE Delft, Delft
- Betz, J.; Hermann, A.; Bulach, W.; Hermann, C.; Dierhoff, J.; Mehlhart, G.; Müller R.; Wiesemann, E. (2022): Prüfung konkreter Maßnahmen zur Steigerung der Nachfrage nach Kunststoffzyklen und rezyklathaltigen Kunststoffprodukten. Umweltbundesamt, TEXTE 128, Dessau-Roßlau
- Bibas, R.; Chateau, J.; Lanzi, E. (2021): Policy scenarios for a transition to a more resource efficient and circular economy. Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD Environment Working Papers 169, Paris
- Binnemans, K.; Jones, P.; Blanpain, B.; van Gerven, T.; Yang, Y.; Walton, A.; Buchert, M. (2013): Recycling of rare earths: a critical review. In: Journal of Cleaner Production 51, S. 1–22
- Birich, A.; Borowski, N.; Diaz Blanco, F.; Flerus, B.; Trentmann, A. (2016): Effizientes Recycling von Elektronikschrott – Die Herausforderung, 20 Metalle zurückzugewinnen. In: RWTH-Themen 2, S. 50–53

- Bitkom (Bitkom e.V) (2022): Smartphones, Tablets, Laptops: Fast 300 Mio. Alt-Geräte in deutschen Haushalten. <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Smartphones-Tablets-Laptops-300-Mio-Alt-Geraete-deutschen-Haushalten> (24.1.2024)
- Bleischwitz, R.; Bahn-Walkowiak, B.; Wilts, H.; Jacob, K.; Raecke, F.; Werland, S.; Rennings, K.; Sanden, J. (2010a): Ressourcenpolitik zur Gestaltung der Rahmenbedingungen. Abschlussbericht zu AP3. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Wuppertal
- Bleischwitz, R.; Jacob, K.; Rennings, K. (2010b): Ressourcenpolitik – ein neues Politikfeld. Ressourceneffizienz Paper 3.2, Wuppertal
- Blum, S.; Schubert, K. (2018): Politikfeldanalyse. Eine Einführung. Wiesbaden
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (o.J.a): Impulse für industrielle Ressourceneffizienz (r+Impuls). 22.3.2023, <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/r-impuls.php> (24.1.2024)
- BMBF (o.J.b): KMU-innovativ: Rohstoffeffizienz. 17.1.2024, <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/kmu-innovativ-rohstoffeffizienz.php> (24.1.2024)
- BMBF (o.J.c): Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin). 16.11.2023, <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/ressourceneffiziente-kreislaufwirtschaft-bauen-und-mineralische-stoffkreislaeufe.php> (24.1.2024)
- BMBF (o.J.d): Rohstoffeffizienz und Kreislaufwirtschaft. 15.12.2023, <https://www.fona.de/de/themen/rohstoffeffizienz.php> (24.1.2024)
- BMBF (2020): Bekanntmachung der Richtlinie zur Förderung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zum Thema »Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Kunststoffrecyclingtechnologien (KuRT)« im Rahmenprogramm »Forschung für Nachhaltige Entwicklung – FONA3«. https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/bekanntmachungen/de/2020/07/3080_bekanntmachung (24.1.2024)
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (2019): Bundeskabinett beschließt Verbot von Plastiktüten. <https://www.bmuv.de/pressemitteilung/bundeskabinett-beschliesst-verbot-von-plastiktueten> (24.1.2024)
- BMU (2020a): Berichtspflicht gemäß Art. 16 Absatz 4 der Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronikaltgeräte (WEEE-Richtlinie) – Berichtsjahr 2020. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/elektronikgeraete_daten_2020_bf.pdf (24.1.2024)
- BMU (2020b): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III – 2020 bis 2023. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin
- BMU (2021): Europäische Union beschränkt Export von Plastikmüll, <https://www.bmuv.de/pressemitteilung/europaeische-union-beschaermt-export-von-plastikmuell> (24.1.2024)
- BMUV (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz) (o.J.a): Elektro- und Elektronikgeräte. <https://www.bmuv.de/WS2742> (24.1.2024)
- BMUV (o.J.b): Erstes Gesetz zur Änderung des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes. Referentenentwurf, https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/19_Lp/elektrog_aenderung/Entwurf/elektrog_aenderung_refe_bf.pdf (24.1.2024)
- BMUV (o.J.c): Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS). <https://www.bmuv.de/WS7029> (24.1.2024)
- BMUV (o.J.d): Produktverantwortung. <https://www.bmuv.de/WS154> (24.1.2024)
- BMUV (2021): Neues Wasch- und Sortierverfahren ermöglicht mehr Recycling für Kunststoffe aus dem gelben Sack. <https://www.bmuv.de/PM9705> (24.1.2024)

- Böing, R.; Knappe, F.; Müller, C.; Reiners, J.; Reinhardt, J.; Theis, S. (2022): Schlussberichte zum BMBF-Verbundforschungsvorhaben »R-Beton – Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation«. Schwerpunkt 3: Ökobilanz, Praxistest und Transfer. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 641, Berlin
- Bookhagen, B.; Bastian, D.; Buchholz, P.; Faulstich, M.; Opper, C.; Irrgeher, J.; Prohaska, T.; Koeberl, C. (2020): Metallic resources in smartphones. In: Resources Policy 68, Art. 101750
- Bookhagen, B.; Eicke, C.; Elsner, H.; Henning, S.; Kern, M.; Kresse, C.; Kuhn, K.; Liesegang, M.; Lutz, R.; Mähltitz, P.; Moldenhauer, K. et al. (2022): Deutschland – Rohstoffsituationsbericht 2021. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
- Brunn, M. (2022): Scandinavian tax relief on waste incineration will reduce landfill in Europe. RECYCLING magazine, <https://www.recycling-magazine.com/2022/09/20/scandinavian-tax-relief-on-waste-incineration-will-reduce-landfill-in-europe/> (24.1.2024)
- Buchert, M.; Sutter, J.; Alwast, H.; Schütz, N.; Weimann, K. (2017): Ökobilanzielle Betrachtung des Recyclings von Gipskartonplatten. Umweltbundesamt, TEXTE 33, Dessau-Roßlau
- Bulach, W.; Dehoust, G.; Möck, A.; Keimeyer, F.; Christiani, J.; Bartnik, S.; Beckamp, S.; Börgers, M. (2022): Überprüfung der Wirksamkeit des § 21 VerpackG und Entwicklung von Vorschlägen zur rechtlichen Weiterentwicklung. Umweltbundesamt, TEXTE 118, Dessau-Roßlau
- Bundesregierung (2020): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Weiterentwicklung 2021. <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/998194/1875176/3d3b15cd92d0261e7a0bc8f43b7839/deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-2021-langfassung-download-bpa-data.pdf> (24.1.2024)
- Bundesregierung (2024): Verständigung zwischen Bundeskanzler Olaf Scholz, Vizekanzler Dr. Robert Habeck und Bundesfinanzminister Christian Lindner auf Änderungen zur Aufstellung des Haushalts 2024. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/verstaendigung-zwischen-bundeskanzler-olaf-scholz-vizekanzler-dr-robert-habeck-und-bundesfinanzminister-christian-lindner-auf-aenderungen-zur-aufstellung-des-haushalts-2024-2251434> (24.1.2024)
- Burger, A.; Cayé, N.; Schüler, K. (2022): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2020. Umweltbundesamt, TEXTE 109, Dessau-Roßlau
- Business Wire (2023): Frankreich dient als europäischer Pilotmarkt für Digimarc Recycle. <https://www.businesswire.com/news/home/20230118005852/de/> (24.1.2024)
- BVerfG (Bundesverfassungsgericht) (2017): Beschluss des Zweiten Senats vom 13. April 2017. 2 BvL 6/13 -, Rn. 1-45. http://www.bverfg.de/e/ls20170413_2bvl000613.html (24.1.2024)
- Bvse (Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V.) (2020a): Klare Worte – Ende der Abfalleigenschaft. <https://www.bvse.de/sachverstand-bvse-recycling/alles-was-recht-ist/meldungen-recht-recht-entsorgung/6672-klare-worte-ende-der-abfalleigenschaft.html> (24.1.2024)
- Bvse (2022a): Neue EU-Vorschriften ermöglichen Verwendung von recyceltem Kunststoff in Lebensmittelverpackungen. <https://www.bvse.de/gut-informiert-kunststoffrecycling/nachrichten-recycling/8947-neue-eu-vorschriften-ermoeglichen-verwendung-von-recyceltem-kunststoff-in-lebensmittelverpackungen.html> (24.1.2024)
- Bvse (2022b): Rezyklateinsatzquoten bei Lebensmittelverpackungen sind kontraproduktiv. <https://www.bvse.de/gut-informiert-kunststoffrecycling/pressemitteilungen-kunststoffrecycling/9114-rezyklateinsatzquoten-bei-lebensmittelverpackungen-sind-kontraproduktiv.html> (24.1.2024)
- Bvse (Fachverband Mineralik – Recycling und Verwertung) (2020b): Baustoffrecycling wird von Kommunen und Ländern nicht ausreichend gefördert. <https://www.bvse.de/gut-informiert-mineralik/pressemitteilungen-mineralik/5710-baustoffrecycling-wird-von-kommunen-und-laendern-nicht-ausreichend-gefoerdert.html> (24.1.2024)

- Bvse (2021): Gips Recycling Nord GmbH – Millionen-Investition in die Zukunft. <https://www.bvse.de/gut-informiert-mineralik/nachrichten-mineralik/7730-gips-recycling-nord-gmbh-millionen-investition-in-die-zukunft.html> (24.1.2024)
- Bvse (Fachverband Schrott, E-Schrott und Kfz-Recycling) (o.J.): Verwertung: Schadstoffe entsorgen – Rohstoffe sichern. <https://www.bvse.de/fachbereiche-schrott-e-schrott-kfz/elektronik-e-schrott/verwertung-schadstoffe-entsorgen-rohstoffe-sichern.html> (24.1.2024)
- CalRecycle (California Department of Resources Recycling and Recovery) (o.J.): Plastic Minimum Content Standards and Reporting (AB 793). <https://calrecycle.ca.gov/bevcontainer/bevdistman/plasticcontent/> (24.1.2024)
- Chemie.de (2022): Erstes Pfandsystem für Plastikverpackungen aus dem Badezimmer startet in Berlin. <https://www.chemie.de/news/1175763/erstes-pfandsystem-fuer-plastikverpackungen-aus-dem-badezimmer-startet-in-berlin.html> (24.1.2024)
- Chiappinelli, O.; Zipperer, V. (2017): Öffentliche Beschaffung als Dekarbonisierungsmaßnahme: Ein Blick auf Deutschland. In: DIW Wochenbericht 49, S. 1125–1135
- Christiani, J.; Beckamp, S. (2020): Was können die mechanische Aufbereitung von Kunststoffen und das werkstoffliche Recycling leisten? In: Thiel, S.; Thomé-Kozmiensky, E.; Quicker, P.; Gosten, A. (Hg.): Energie aus Abfall. Neuruppin, S. 139–152
- Circular Economy Initiative Deutschland (2021): Circular Economy Roadmap für Deutschland. (Kadner, S. Kobus, J. Hansen, E.; Akinci, S. Elsner, P. Hagelüken, C. Jaeger-Erben, M. Kick, M. Kwade, A. Kühl, C. Müller-Kirschbaum, T. Obeth, D. Schweitzer, K.; Stuchtey, M. Vahle, T. Weber, T. Wiedemann, P. Wilts, H. von Wittken, R.) acatech/SYSTEMIQ, München/London
- Circular.fashion UG (2020): circularity.ID® Open Data Standard Version 2.0, <https://circularity.id/static/circularity.ID-Standard-Specification-v2.pdf> (24.1.2024)
- Crippa, M.; de Wilde, B.; Koopmans, R.; Leyssens, J.; Muncke, J.; Ritschkoff, A.-C.; van Doorselaer, K.; Velis, C.; Wagner, M. (2019): A Circular Economy for Plastics – Insights from research and innovation to inform policy and funding decisions. Brüssel
- DafStb (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton) (2010): Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620. 1. Berichtigung zur DafStb-Richtlinie. https://www.dafstb.de/application/berichtigungen/1_Berichtigung_RL_BREZ_2020-08-18_Druckfassung_Beuth_Verlag_Red_korr_BV.pdf (24.1.2024)
- Dageförde, A.; Meetz, M.; Mettke, A.; Jacob, S. (o.J.): Brandenburger Leitfaden Ausschreibungen. Steigerung der Ressourceneffizienz des Recyclings von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg, Potsdam
- DECHEMA (DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.) (2020): Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Innovative Produktkreisläufe. https://innovative-produktkreislaeufe.de/Publikationen/_/ReziProk_Flyer%202020_dt_neu2_.pdf (24.1.2024)
- Deloitte/BDI (2021): Zirkuläre Wirtschaft. Herausforderungen und Chancen für den Industriestandort Deutschland
- Destatis (Statistisches Bundesamt) (o.J.a): 32111-0004: Abfallentsorgung: Deutschland, Jahre, Anlagenart, Abfallarten. 2006 bis 2021. <https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=32111-0004&bypass=true&levelindex=0&levelid=1679570460656#abreadcrumb> (24.1.2024)
- Destatis (o.J.b): 32141-0001: Bauschutttaufbereitungsanlagen, Asphaltmischanlagen: Deutschland, Jahre, Abfallarten. <https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=32141-0001&bypass=true&levelindex=0&levelid=1706602820927#abreadcrumb> (24.1.2024)
- Destatis (2021a): 10,8 % mehr recycelte Elektroaltgeräte im Jahr 2019. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/02/PD21_064_321.html (24.1.2024)

- Destatis (2021b): Export von Plastikmüll 2020: 33 % weniger Kunststoffabfälle ausgeführt als vor zehn Jahren. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/03/PD21_N016_51.html (24.1.2024)
- Destatis (2022): 11,2 % mehr recycelte Elektroaltgeräte im Jahr 2020. Recyclingquote gegenüber 2019 leicht gestiegen. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/02/PD22_058_321.html (24.1.2024)
- Detzel, A.; Bodrogi, F.; Kauertz, B.; Bick, C.; Welle, F.; Schmid, M.; Schmitz, K.; Müller, K.; Käß, H. (2018): Biobasierte Kunststoffe als Verpackung von Lebensmitteln. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Heidelberg u. a.O.
- Deutscher Bundestag (2022): Bundestag stimmt für CO₂-Preis für Müllverbrennung. <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2022/kw42-de-brennstoffemissionshandel-916766> (24.1.2024)
- Dittrich, M.; Limberger, S.; Ewers, B.; Stalf, M.; Knappe, F.; Vogt, R. (2021): Sekundärrohstoffe in Deutschland. Heidelberg
- DMoD (Dutch Ministry of Defence) (2017a): Purchasing textiles made from recycled fibres. <https://circabc.europa.eu/ui/group/44278090-3fae-4515-bcc2-44fd57c1d0d1/library/e33ceb44-6068-4f3a-9fd6-496c68e4fb71/details> (24.1.2024)
- DMoD (Dutch Ministry of Defence) (2017b): Workwear Dutch Ministry of Defence. <https://www.pianoo.nl/sites/default/files/documents/documents/rebusfactsheet15-kledingdefensie-engels-juni2017.pdf> (24.1.2024)
- Dogu, O.; Pelucchi, M.; van de Vijver, R.; van Steenberge, P.; D'hooge, D.; Cuoci, A.; Mehl, M.; Frassoldati, A.; Faravelli, T.; Van Geem, K. (2021): The chemistry of chemical recycling of solid plastic waste via pyrolysis and gasification: State-of-the-art, challenges, and future directions. In: *Progress in Energy and Combustion Science* 84, Art. 100901
- Dong, Z.; Mattocks, J.; Deblonde, G.; Hu, D.; Jiao, Y.; Cotruvo, J.; Park, D. (2021): Bridging Hydrometallurgy and Biochemistry: A Protein-Based Process for Recovery and Separation of Rare Earth Elements. In: *American Chemical Society Central Science* 7(11), S. 1798–1808
- Dost, G.; Matloubi, M.; Moesslein, J.; Treick, A.; Kummer, B. (2022): Wie digitale Produkt- und Materialpässe umgesetzt werden können. 320°, <https://320grad.de/2022/04/22/wie-digitale-produkt-und-materialpaesse-umgesetzt-werden-koennen/> (24.1.2024)
- Duan, H.; Miller, T. R.; Liu, G.; Zeng, X.; Yu, K.; Huang, Q.; Zuo, J.; Qin, Y.; Li, J. (2018): Chilling Prospect: Climate Change Effects of Mismanaged Refrigerants in China. In: *Environmental Science & Technology* 52(11), S. 6350–6356
- Duhoux, T.; Maes, E.; Hirschnitz-Garbers, M.; Peeters, K.; Asscherickx, L.; Christis, M.; Stubbe, B.; Colignon, P.; Hinzmann, M.; Sachdeva, A. (2021): Study on the technical, regulatory, economic and environmental effectiveness of textile fibres recycling. Europäische Kommission, Brüssel
- Ebin, B.; Isik, M. (2016): Pyrometallurgical Processes for the Recovery of Metals from WEEE. In: Chagnes, A.; Cote, G.; Ekberg, C.; Nilsson, M.; Retegan, T. (Hg.): *WEEE Recycling. Research, Development, and Policies*. Amsterdam, S. 107–137
- ECHA (European Chemicals Agency) (o.J.a): Blei. <https://echa.europa.eu/de/hot-topics/lead> (24.1.2024)
- ECHA (o.J.b): Registrierung. <https://echa.europa.eu/de/regulations/reach/registration> (24.1.2024)
- Eckermann, F.; Golde, M.; Herczeg, M.; Mazzanti, M.; Zoboli, R.; Speck, S. (2015): Material resource taxation: an analysis for selected material resources. Mol
- EEA (European Environment Agency) (2008): Effectiveness of environmental taxes and charges for managing sand, gravel and rock extraction in selected EU countries. EEA report 2, Kopenhagen
- EEA (2016): More from less – material resource efficiency in Europe. 2015 overview of policies, instruments and targets in 32 countries. Latvia. <https://www.eea.europa.eu/publications/more-from-less/latvia-material-resource-efficiency/view> (24.1.2024)

- EEA (2023a): Circular material use rate in Europe (8th EAP). <https://www.eea.europa.eu/ims/circular-material-use-rate-in-europe> (24.1.2024)
- EEA (2023b): Tracking waste prevention progress. A narrative-based waste prevention monitoring framework at the EU-level. EEA report 2, Kopenhagen
- Eichert, C. (2020): Solvolyse von Kunststoffen – neue Ansätze zum Recycling von Plastikabfällen, https://docplayer.org/195551005-Solvolyse-von-kunststoffen-neue-ansaeetze-zum-recycling-von-plastikabfaellen-carsten-eichert.html#download_tab_content (24.1.2024)
- EK (Europäische Kommission) (o.J.a): Ecodesign for Sustainable Products Regulation. https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products_de (19.1.2024)
- EK (o.J.b): Kunststoff-Eigenmittel. https://ec.europa.eu/info/strategy/eu-budget/long-term-eu-budget/2021-2027/revenue/own-resources/plastics-own-resource_en (24.1.2024)
- EK (o.J.c): Umweltfreundliche und kreislauforientierte Produkte. https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products_de (24.1.2024)
- EK (o.J.d): Waste Framework Directive. https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en (24.1.2024)
- EK (2019): Der europäische Grüne Deal. COM(2019) 640 final, Brüssel
- EK (2020a): Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa. COM(2020) 98 final, Brüssel
- EK (2020b): Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken. COM(2020) 474 final, Brüssel
- EK (2022a): Kreislaufwirtschaft: Neue EU-Vorschriften ermöglichen Verwendung von recyceltem Kunststoff in Lebensmittelverpackungen. https://germany.representation.ec.europa.eu/news/kreislaufwirtschaft-neue-eu-vorschriften-ermoglichen-verwendung-von-recyceltem-kunststoff-2022-09-15_de (24.1.2024)
- EK (2022b): Nachhaltige Produkte zur Norm machen. COM(2022) 140 final, Brüssel
- EK (2022c): The Commission starts to develop end-of-waste criteria for plastic waste. https://environment.ec.europa.eu/news/commission-starts-develop-end-waste-criteria-plastic-waste-2022-04-05_en?prefLang=de (24.1.2024)
- EK (2022d): Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die Haftung für fehlerhafte Produkte. Com(2022) 495 final, Brüssel
- EK (2022e): Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte und zur Aufhebung der Richtlinie 2009/125/EG. COM(2022) 142 final, Brüssel
- EK (2022f): Vorschlag für eine Verordnung über Verpackungen und Verpackungsabfälle, zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020 und der Richtlinie (EU) 2019/904 sowie zur Aufhebung der Richtlinie 94/62/EG COM(2022) 677 final, Brüssel
- Ellen MacArthur Foundation (2021): Recycling and the circular economy: what's the difference? <https://ellenmacarthurfoundation.org/articles/recycling-and-the-circular-economy-whats-the-difference> (24.1.2024)
- Elliott, T. (2017): Landfill Tax in the United Kingdom. <https://ieep.eu/wp-content/uploads/2022/12/UK-Landfill-Tax-final.pdf> (24.1.2024)
- Elsner, H.; Kuhn, K.; Schmitz, M. (2017): Heimische mineralische Rohstoffe – unverzichtbar für Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

- EnBauSa (2013): Attritionstrommel trennt Leichtbeton und Gipsputz. Recycling führt Baustoff in großem Umfang zurück. 13.1.2017, <https://www.enbausa.de/daemmung/aktuelles/artikel/attritionstrommel-trennt-leichtbeton-und-gipsputz-3444.html> (24.1.2024)
- EP (Europäisches Parlament) (2018): Abfallwirtschaft in der EU: Zahlen und Fakten. 22.6.2023, <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20180328STO00751/abfallwirtschaft-in-der-eu-zahlen-und-fakten> (24.1.2024)
- EP (2022): Klimaschutz: Einigung über ehrgeizigeren EU-Emissionshandel (ETS), <https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20221212IPR64527/klimaschutz-einigung-uber-ehrgeizigeren-eu-emissionshandel-ets> (24.1.2024)
- EPO (Europäisches Patentamt) (2021): Patents for tomorrow's plastics. Global innovation trends in recycling, circular design and alternative sources. München
- Ettlinger, S. (2017): Aggregates Levy in the United Kingdom. Eunomia Research and Consulting, <https://ieep.eu/wp-content/uploads/2022/12/UK-Aggregates-Levy-final.pdf> (24.1.2024)
- EU-Recycling (2019): Feinste Rohstoffpartikel – aus dem Schaumbad (rück)gewinnen. In: EU-Recycling 7, S. 42
- EU-Recycling (2022): Ökodesign-Richtlinie soll von neuer Verordnung abgelöst werden. In: EU-Recycling 5, S. 4
- Eurostat (o.J.a): Circular material use rate. 24.1.2023, https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_AC_CUR__custom_1598253/default/table?lang=en (24.1.2024)
- Eurostat (o.J.b): Material flow accounts statistics – material footprints. 21.6.2023, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Material_flow_accounts_statistics_-_material_footprints#EU.27s_material_footprint_by_material_category_over_time (24.1.2024)
- EUWID (2022a): BMUV veröffentlicht Referentenentwurf zur Änderung der Ersatzbaustoffverordnung. In: EUWID Recycling und Entsorgung 40, 2022
- EUWID (2022b): Chemisches Recycling: Südpack und Clean Cycle beteiligen sich as Carboliq. In: EUWID Recycling und Entsorgung 12, o.S.
- EUWID (2022c): EAR meldet Sammelmenge von über einer Mio Tonnen E-Schrott für 2021. In: EUWID Recycling und Entsorgung 28, S. 7
- EUWID (2022d): E-Schrott: Erfassungsmenge in Europa steigt – Sammelziele in meisten EU-Staaten verfehlt. In: EUWID Recycling und Entsorgung 51, S. 32–33
- EUWID (2022e): Rückgabemöglichkeiten alter Elektrogeräte in Supermärkten bisher wenig genutzt. In: EUWID Recycling und Entsorgung 51, S. 5
- EUWID (2022f): Vollzug der Gewerbeabfallverordnung: Baden-Württemberg informiert über Kontrollen. In: EUWID Recycling und Entsorgung 39, S. 24
- EUWID (2023a): Altkunststoffe: Nachfrage weit unter normalem Niveau. In: EUWID Recycling und Entsorgung 23, S. 23
- EUWID (2023b): Europäisches Parlament stimmt der Verschärfung des Emissionshandels zu. In: EUWID Recycling und Entsorgung 17, S. 31
- EUWID (2023c): PET-Recycling: Nachfrage erneut unter der Erwartung. In: EUWID Recycling und Entsorgung 19, S. 20–21
- EUWID (2023d): Umweltverbände warnen vor Verwässerung der Recyclingdefinition. In: EUWID Recycling und Entsorgung 17, S. 5
- EY (Ernst & Young Global) (2022a): Italy's plastic tax will enter into force on 1 January 2023. https://www.ey.com/en_gl/tax-alerts/italy-s-plastic-tax-will-enter-into-force-on-1-january-2023 (24.1.2024)

- EY (Ernst & Young Global) (2022b): Spain introduces new indirect tax on non-reusable plastic packaging as of 1 January 2023. https://www.ey.com/en_gl/tax-alerts/spain-introduces-new-indirect-tax-on-non-reusable-plastic-packaging-as-of-1-january-2023 (24.1.2024)
- FAZ (Frankfurter Allgemeine Zeitung) (2018): Amazon vernichtet massenhaft neuwertige Produkte. <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/amazon-vernichtet-massenhaft-neuwertige-produkte-15629631.html> (24.1.2024)
- Feeß, W. (2020): Entwicklung eines Verfahrens zur vollständigen Aufbereitung und hochwertigen Verwertung von Boden- und Bauschuttmaterial für ressourcenschonende Baustoffe. Heinrich Feeß GmbH & Co. KG, Kirchheim/Teck
- Feeß (Heinrich Feeß GmbH & Co. KG) (o.J.): Nassklassierung. Gewaschene Qualitäts-Baustoffe. <https://www.feess.de/nassklassierungsanlage.html> (24.1.2024)
- Finansdepartementet Sverige (2022): Avskaffad avfallsförbränningskatt och slopad energiskattenedsättning för datorhallar. <https://www.regeringen.se/contentassets/ca6c0676a1da47a5a34b8d67a5f12494/avskaffad-avfallsforbranningsskatt-och-slopad-energiskattenedsattning-for-datorhallar.pdf> (24.1.2024)
- Fischer, C.; Muster, V.; Graulich; Prakash, S.; Seidl, R. (2020): Internalisierung von externen Kosten: Die Sicht von Betroffenen. Zwei Fallstudien in den Themenfeldern Reparieren und Sanieren. Öko-Institut e.V.; TU Berlin, Darmstadt u. a.O.
- Fluchs, S.; Neligan, A. (2023): Urban Mining für eine zirkuläre Wirtschaft. Wie hoch sind die Rohstoffpotenziale durch Urban Mining? Institut der deutschen Wirtschaft Köln e. V. IW-Report 2, Köln
- Forti, V.; Baldé, C. P.; Kuehr, R.; Bel, G. (2020): The Global E-waste Monitor 2020. Quantities, flows, and the circular economy potential. https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf (24.1.2024)
- Fraunhofer IPA (Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung) (o.J.): Industrielle Demontage von Batteriemodulen und E-Motoren DeMoBat. <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/DeMoBat.html> (24.1.2024)
- Fraunhofer IVV (Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackungen) (o.J.): Kunststoff-Recycling - CreaSolv® Prozess. <https://www.ivv.fraunhofer.de/de/recycling-umwelt/kunststoff-recycling-creasolv.html> (24.1.2024)
- Gadermann, A.; Knietsch, A.; Haas, C. (2021): REACH und Recycling. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund
- Gaines, L. (2018): Lithium-ion battery recycling processes: Research towards a sustainable course. In: Sustainable Materials and Technologies 17, Art. e00068
- Gálvez-Martos, J.-L.; Styles, D.; Schoenberger, H.; Zeschmar-Lahl, B. (2018): Construction and demolition waste best management practice in Europe. In: Resources, Conservation and Recycling 136, S. 166–178
- Gandenberger, C. (2021): Innovationen für die Circular Economy – Aktueller Stand und Perspektiven: Ein Beitrag zur Weiterentwicklung der deutschen Umweltinnovationspolitik. Ein Beitrag zur Weiterentwicklung der deutschen Umweltinnovationspolitik. Umweltbundesamt, Umwelt, Innovation, Beschäftigung 1, Dessau-Roßlau
- Ganzevles, J.; Potting, J.; Hanemaaijer, A. (2017): Policy Brief: Evaluation of Green Deals for a circular economy. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, Den Haag
- GAO (U.S. Government Accountability Office) (2021): Science & Tech Spotlight: Advanced Plastic Recycling. <https://www.gao.gov/products/gao-21-105317> (24.1.2024)
- Garcia-Gutierrez, P.; Amadei, A.; Klenert, D.; Nessi, S.; Tonini, D.; Tosches, D.; Ardente, F.; Saveyn, H. (2023): Environmental and economic assessment of plastic waste recycling – A comparison of mechanical, physical, chemical recycling and energy recovery of plastic waste. Europäische Kommission, Luxemburg, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/0472> (24.1.2024)

- GDB (Gesamtverband der Deutschen Buntmetallindustrie) (o.J.): Recycling. Kupfer im Kreislauf. https://www.gdb-online.org/wp-content/uploads/2019/12/Factsheet_Kupfer-Recycling.pdf (24.1.2024)
- Gehrke, K.; Lechner, M.; Nordmeier, E. (2020): Makromolekulare Chemie: Ein Lehrbuch für Chemiker, Physiker, Materialwissenschaftler und Verfahrenstechniker. Berlin/Heidelberg
- Gerlitz, E.; Greifenstein, M.; Hofmann, J.; Fleischer, J. (2021): Analysis of the Variety of Lithium-Ion Battery Modules and the Challenges for an Agile Automated Disassembly System. In: Procedia CIRP 96, S. 175–180
- GIPS (Bundesverband der Gipsindustrie e.V.) (o.J.): Qualitätsempfehlungen für Recyclinggips. <https://www.gips.de/aktuelles/detail/qualitaetsempfehlungen-fuer-recyclinggips/> (24.1.2024)
- GIPS (Bundesverband der Gipsindustrie e.V.) (2021): Recycling von Gips als Beitrag zur Ressourcenschonung. Medieninformation 2, Berlin, https://www.gips.de/fileadmin/user_upload/aktuelles/Medieninfo_BV_Gips_02-2021_-_Recyclinggips.pdf (24.1.2024)
- Gordon, K. (2020): A tiny solution for plastic pollution: scientists discover polyurethane feeding bacteria. BioTechniques, <https://www.biotechniques.com/microbiology/a-tiny-solution-for-plastic-pollution-scientists-discover-polyurethane-feeding-bacteria/> (24.1.2024)
- Götz, T.; Adisorn, T.; Tholen, L. (2021): Der digitale Produktpass als Politik-Konzept. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Wuppertal Report 20, Wuppertal
- Götz, T.; Berg, H.; Jansen, M.; Adisorn, T.; Cembrero, D.; Markkanen, S.; Chowdhury, T. (2022): Digital Product Passport: The ticket to achieving a climate neutral and circular European economy? University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership/Wuppertal Institut, Cambridge
- Graaf, L.; Jacob, K. (2015): Kurzanalyse 14: Steuerliche Förderung von Innovationen – Analyse der Potenziale zur Förderung von Ressourceneffizienzinnovationen. Forschungszentrum für Umweltpolitik, Freie Universität Berlin, https://refubium.fu-berlin.de/bitstream/handle/fub188/19937/Kurzanalyse_Steuerliche_Foerderung-2.pdf?sequence=1&isAllowed=y (24.1.2024)
- Greer, R.; Wirth, T.; Loorbach, D. (2021): The Waste-Resource Paradox: Practical dilemmas and societal implications in the transition to a circular economy. In: Journal of Cleaner Production 303, Art. 126831
- Grimm, R. (2018): Kies und Sand für die Bauindustrie. BaustoffWissen, 31.10.2023, <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/grundstoffe-des-bauens/kies-und-sand-fuer-die-bauindustrie-abbau-einsatzbereiche-sandknappheit-sandimporte/> (24.1.2024)
- Gumbau, A. (2022): Digital product passports become the norm in EU's green economy plan. EURACTIV, <https://www.euractiv.com/section/circular-economy/news/digital-product-passports-become-the-norm-in-eus-green-economy-plan/> (24.1.2024)
- Gvm (Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung) (2019): Hemmnisse für den Rezyklateinsatz in Kunststoffverpackungen. Kurzfassung. https://www.hde-klimaschutzoffensive.de/sites/default/files/uploads/document/2019-04/1904_KF_Hemmnisse%20Rezyklateinsatz_HDE-KSO.pdf (24.1.2024)
- Haas, M. (2022): Aushubmassen als wertvolle Rohstoffquelle. Vortrag auf dem 9. Fachsymposium »Bausteine zum zirkulären Bauen«, Stuttgart
- Handke, V.; Bliklen, R.; Jepsen, D.; Rödig, L. (2019): Recycling im Zeitalter der Digitalisierung. Spezifische Recyclingziele für Metalle und Kunststoffe aus Elektrokleingeräten im ElektroG: Regulatorische Ansätze. IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Ökopool – Institut für Ökologie und Politik, Berlin/Hamburg
- Hansen, F.; Seelig, J. (o.J.): Recyclinggerechte Konstruktion & Demontage. Wo stehen deutsche Schlüsselindustrien? Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum (24.1.2024)
- Hao, J.; Wang, Y.; Wu, Y.; Guo, F. (2020): Metal recovery from waste printed circuit boards: A review for current status and perspectives. In: Resources, Conservation and Recycling 157, Art. 104787

- Hartley, K.; van Santen, R.; Kirchherr, J. (2020): Policies for transitioning towards a circular economy: Expectations from the European Union (EU). In: Resources, Conservation and Recycling 155, Art. 104634
- HDB (Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V.) (2021): Stellungnahme. Öffentliche Anhörung des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit des Deutschen Bundestages am 7. Juni zur Verordnung der Bundesregierung »Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung« (sog. Mantelverordnung), BT-Drs. 19/29636 vom 12. Mai 2021. https://www.bauindustrie.de/fileadmin/bauindustrie.de/Themen/Umwelt_Bautechnik/Stellungnahme_MantelV-Anhoerung_HDB-Paetzold_2021_06_07_FINAL.pdf (24.1.2024)
- Heinemann & Partner Rechtsanwälte (2020): Die Novelle des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ist am 29.10.2020 in Kraft getreten. <https://www.heinemann-und-partner.de/wp-content/uploads/2020/12/KrWG-Novelle.pdf> (24.1.2024)
- Hermann, A. (2018): Ressourcenschutz in der umweltfreundlichen öffentlichen Beschaffung. Öko-Institut e.V. <https://refubium.fu-berlin.de/bitstream/handle/fub188/24795/Hermann%202018%20VA%20Ressourcenschutz%20%c3%b6ffentliche%20Beschaffung.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (24.1.2024)
- Hinzmann, M.; Araujo Sosa, A.; Hirschnitz-Garbers, M. (2019): Stärkung der Kreislaufführung von mineralischen Baustoffen mittels freiwilliger Selbstverpflichtung. Akteursperspektiven auf Bedarfe und Optionen. Ecologic Institut, <https://refubium.fu-berlin.de/bitstream/handle/fub188/24796/Hinzmann%20Araujo%20Hirschnitz-Garbers%202019%20Akteursanalyse%20Baustoffsektor.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (24.1.2024)
- HM Revenue & Customs (2021): Aggregates Levy: Proposals on the treatment of aggregate removed during construction works, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/972200/Aggregates_Levy_proposals_on_the_treatment_of_aggregate_removed_during_construction_works_-_consultation.pdf (24.1.2024)
- HM Treasury (2020): Review of the Aggregates Levy: Summary of responses to the discussion paper and government next steps. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/902351/2020_07_20_Review_of_the_Aggregates_Levy_summary_of_responses_to_the_discussion_paper_and_government_next_steps.pdf (24.1.2024)
- Hochschule Pforzheim (2022): Der digitale Produktpass als Instrument in Politik und Wirtschaft – ein Ausblick. https://www.hs-pforzheim.de/news_detailansicht/news/der_digitale_produktpass_als_instrument_in_politik_und_wirtschaft_ein_ausblick (24.1.2024)
- Hogg, D.; Durrant, C.; Thomson, A.; Sherrington, C. (2018): Demand Recycled: Policy Options for Increasing the Demand for Post-Consumer Recycled Materials. Eunomia Research and Consulting, Bristol
- Hogg, D.; Elliott, T.; Elliott, L.; Ettliger, S.; Chowdhury, T.; Bapasola, A.; Norstein, H.; Emery, L.; Skou Andersen, M.; Brink, P.; Withana, S. et al. (2016): Study on assessing the environmental fiscal reform potential for the EU28. Europäische Kommission, Luxemburg
- Huber-Humer, M. (2020): Die ubiquitäre Umweltpräsenz von Kunststoffen: ein Makro- oder Mikroproblem? In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72(9-10), S. 357–360
- HZDR (Helmholtz-Zentrum Dresden Rossendorf) (o.J.): Bioflotation. 21.12.2022, <https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=50680&pNid=1056&pLang=de> (24.1.2024)
- HZDR (2018): Bio-Angeln für Seltene Erden: Wie Eiweiß-Bruchstücke Elektronik-Schrott recyceln. <https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=57034&pNid=99> (24.1.2024)

- Ifo Institut (ifo Institut – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e. V.) (2022): Wie abhängig ist Deutschland von Rohstoffimporten? Eine Analyse für die Produktion von Schlüsseltechnologien. IHK für München und Oberbayern, München
- IGEPA Group (o.J.): HolyGrail 2.0: Digitale Wasserzeichen für Plastikrecycling. <https://www.igepa.de/packaging-insights/verpackungen-und-logistik/holygrail-20/> (24.1.2024)
- IK (Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V.) (2021): Nachhaltigkeitsbericht 2021. Bad Homburg
- Ingold, K. (2022): Policy-Instrumente und ihre Klassifikation: Erkenntnisse aus 30 Jahren Evaluation. In: LeGes 33(1), o.S.
- Initiative Kreislaufwirtschaft Bau (2021): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2018. Berlin
- Initiative Kreislaufwirtschaft Bau (2023): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2020. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2020. Berlin
- IRP (International Resource Panel) (2017): Assessing global resource use: A systems approach to resource efficiency and pollution reduction. United Nations Environment Programme, Nairobi
- IRP (2020): Global Resources Outlook 2019. Natural Resources for the Future We Want. United Nations Environment Programme, Nairobi
- IRP (2021): Policy options to eliminate additional marine plastic litter by 2050 under the G20 Osaka Blue Ocean Vision. (Fletcher, S.; Roberts, K.; Shiran, Y.; Virdin, J.; Brown, C.; Buzzi, E.; Alcolea, I.; Henderson, L.; Laubinger, F.; Milà i Canals, L.; Salam, S.; Schmuck, S.; Veiga, J.; Winton, S.; Youngblood, K.) United Nations Environment Programme, Nairobi
- IZB (InformationsZentrum Beton GmbH) (2021): Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung - R-Beton. Zement-Merkblatt Betontechnik B 30. <https://www.dyckerhoff.com/documents/209745/967758/Zement-Merkblatt+Beton+mit+rezyklierter+Gesteinsk%C3%B6rnung+%E2%80%93+R-Beton+%28B30%29.pdf/2d346aa6-4e58-5b67-1b68-16fb23e15793> (24.1.2024)
- Jaeger, N. (2013): Steckbrief zur Ressourcenpolitik: Ressourcen besteuern. <https://power-shift.de/wp-content/uploads/2013/10/Rohstoffsteckbrief-Ressourcen-besteuern.pdf> (24.1.2024)
- Jansen, M.; Gerstenberger, B.; Bitter-Krahe, J.; Berg, H.; Sebestyén, J.; Schneider, J. (2022): Current Approaches to the Digital Product Passport for a Circular Economy. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Wuppertal Paper 198, Wuppertal
- Johansson, N. (2021): Circular Agreements – Exploring the Role of Agreements and Deals as a Political Tool for a Circular Economy. In: Circular Economy and Sustainability 1(2), S. 499–505
- Johansson, N.; Forsgren, C. (2020): Is this the end of end-of-waste? Uncovering the space between waste and products. In: Resources, Conservation and Recycling 155, Art. 104656
- Jungbluth, J.; Plapper, P.; Gerke, W. (2016): Demontage von Elektroantrieben mit Assistenzrobotern zum wirtschaftlichen Recycling. In: Angewandte Automatisierungstechnik in Lehre und Entwicklung (AALE) (Hg.): Tagungsband AALE 2016: Automatisierung im Fokus von Industrie 4.0. Lübeck
- Katerusha, D. (2020): Einsatz von Recyclingbeton fördern: D versus CH. In: Zürcher Umweltpraxis und Raumentwicklung (98), S. 41–44
- Kaya, M. (2018): Current WEEE recycling solutions. In: Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling 2018, S. 33–93
- Khaliq, A.; Rhamdhani, M.; Brooks, G.; Masood, S. (2014): Metal Extraction Processes for Electronic Waste and Existing Industrial Routes: A Review and Australian Perspective. In: Resources 3(1), S. 152–179
- Klinski, S.; Keimeyer, F. (2017): Erweiterungen des steuer- und abgabenrechtlichen Gestaltungsspielraums für Klimaschutzinstrumente im Grundgesetz. Rechtliche Fragen zum Klimaschutzplan. Öko Institut, Berlin

- Knappe, F. (2019): Hochwertiges Recycling in Schleswig-Holstein und Hamburg. https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/A/abfallwirtschaft/Downloads/fachsymposium2019_vortrag_2.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (24.1.2024)
- Knappe, F.; Dehoust, G.; Petschow, U.; Jakubowski, G. (2012): Steigerung von Akzeptanz und Einsatz mineralischer Sekundärrohstoffe unter Berücksichtigung schutzgutbezogener und anwendungsbezogener Anforderungen, des potenziellen, volkswirtschaftlichen Nutzens sowie branchenbezogener, ökonomischer Anreizinstrumente. Umweltbundesamt, TEXTE 28, Dessau-Roßlau
- Knappe, F.; Muchow, N.; Lobach, T. (2020): Analyse der Recyclingstruktur der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle in Schleswig-Holstein. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, asphalt-labor, Heidelberg/Wahlstedt
- Knappe, F.; Muchow, N.; Oetjen-Dehne, R.; Buschow, N.; Kaiser, F. (2023): Erarbeitung von Grundlagen für die Evaluierung der Gewerbeabfallverordnung. Umweltbundesamt, TEXTE 47, Dessau-Roßlau
- Knappe, F.; Reinhardt, J.; Kauertz, B.; Oetjen-Dehne, R.; Buschow, N.; Ritthoff, M.; Wilts, H.; Lehmann, M. (2021): Technische Potenzialeanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes. Umweltbundesamt, TEXTE 92, Dessau-Roßlau
- Knappe, F.; Reinhardt, J.; Schorb, A.; Theis, S. (2017): Leitfaden zum Einsatz von R-Beton. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart
- Knopf, J.; Kahlenborn, W.; Weiß, D.; Pechan, A.; Khuchua, N.; Jacob, K.; Bär, H.; Grubbe, M.; Münch, L. (2011): Innovationspotentiale der umweltfreundlichen öffentlichen Beschaffung. Umweltbundesamt, TEXTE 54, Dessau-Roßlau
- Kölking, M.; Flamme, S.; Hams, S. (2020): Charakterisierung von Metallschrott durch Multisensor-Systeme. In: Holm, O.; Thomé-Kozmiensky, E.; Goldmann, D.; Friedrich, B. (Hg.): Recycling und Sekundärrohstoffe. Neuruppin, S. 424–443
- Kommission der Niedersächsischen Landesregierung (o.J.): Kriterien zur Beurteilung der wirtschaftlichen Zumutbarkeit im Sinne der Gewerbeabfallverordnung. <https://www.umwelt.niedersachsen.de/download/149610> (24.1.2024)
- Kovacic, I.; Honic, M.; Rechberger, H.; Oberwinter, L.; Lengauer, K.; Hagenauer, A.; Glöggler, J.; Meier, K. (2019): Prozess-Design für den »Building Information Modeling« (BIM) basierten, materiellen Gebäudepass. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Berichte aus Energie- und Umweltforschung 8, Wien
- Kreft, O. (2016): Closed-loop recycling of autoclaved aerated concrete / Geschlossener Recyclingkreislauf für Porenbeton. In: Mauerwerk 20(3), S. 183–190
- Kristof, K.; Hennicke, P. (2010): Mögliche Kernstrategien für eine zukunftsfähige Ressourcenpolitik der Bundesregierung: Ökologische Modernisierung vorantreiben und Naturschranken ernst nehmen. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Ressourceneffizienz Paper 7.7, Wuppertal
- KRU (Ressourcenkommission am Umweltbundesamt) (2019): Substitutionsquote. Ein realistischer Erfolgsmaßstab für die Kreislaufwirtschaft! Dessau-Roßlau
- KU Leuven (2022): Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge. Policymaker Summary. Leuven
- Kummer, S.; Strobelt, A.; Kohlmeyer, R.; Kitazume, C.; Oehme, I.; Schnepel, C. (2020): Empfehlungen des UBA für die Weiterentwicklung der Behandlungsanforderungen nach ElektroG. Umweltbundesamt, TEXTE 148, Dessau-Roßlau
- Kwon, D. (2023): Three ways to solve the plastics pollution crisis. In: Nature 616 (7956), S. 234–237
- LAGA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall) (2019): »Vollzugshinweise zur Gewerbeabfallverordnung«. Anforderungen an Erzeuger und Besitzer von gewerblichen Siedlungsabfällen, sowie bestimmten Bau- und Abbruchabfällen, an Betreiber von Vorbehandlungs- und Aufbereitungsanlagen. <https://www.laga-on>

- line.de/documents/m34_vollzugshinweise_gewabfv_endfassung_11022019_inh-red_aenderung_1554388381.pdf (24.1.2024)
- LAGA (Länderarbeitsgemeinschaft Abfall) (2003): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen – Technische Regeln –. Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall 20, https://www.laga-online.de/documents/m20-gesamtfassung_1643296687.pdf (24.1.2024)
- Lammers, T. (2022): Abfallbegriff – Beginn und Ende der Abfalleigenschaft. In: Kurth, P.; Oexle, A.; Faulstich, M. (Hg.): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Wiesbaden, S. 3–25
- Van Langen, S.; Passaro, R. (2021): The Dutch Green Deals Policy and Its Applicability to Circular Economy Policies. In: Sustainability 13(21), Art. 11683
- Leipfänger-Bader (Leipfänger-Bader GmbH) (2018): Erde als Rohstoff. <https://www.leipfänger-bader.de/news/erde-als-rohstoff> (24.1.2024)
- Leipfänger-Bader (Leipfänger-Bader GmbH) (2020): Aus Ziegelsand ohne Brand. <https://www.leipfänger-bader.de/news/aus-ziegelsand-ohne-brand/> (24.1.2024)
- LE (London Economics) (2006): Study to Inform the Policy Review of the Aggregates Levy Sustainability Fund. <https://londoneconomics.co.uk/wp-content/uploads/2011/09/78-Study-to-Inform-the-Policy-Review-of-the-Aggregates-Levy-Sustainability-Fund.pdf> (24.1.2024)
- Lindner, C.; Schmitt, J.; Hein, J. (2020): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019. Kurzfassung der Conversio Studie. Conversio Market & Strategy GmbH, https://www.conversio-gmbh.com/res/News_Media/2020/Kurzfassung_Stoffstrombild_2019.pdf (24.1.2024)
- Loschwitz, J.; Kopp-Assenmacher, S. (2022): Mindestzyklateinsatzquoten. In: Kurth, P.; Oexle, A.; Faulstich, M. (Hg.): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Wiesbaden, S. 353–378
- Ludwig, D.; Meyer, E. (2012): Ressourcenschonung durch die Besteuerung von Primärbaustoffen. Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft e.V. https://foes.de/publikationen/2012/2012-03-FOES-Diskussionspapier_Baustoffsteuer.pdf (24.1.2024)
- Lutter, S.; Kreimel, J.; Giljum, S.; Dittrich, M.; Limberger, S.; Ewers, B.; Schoer, K.; Manstein, C. (2022): Die Nutzung natürlicher Ressourcen. Ressourcenbericht für Deutschland 2022. Spezial: Rohstoffnutzung der Zukunft. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- McCarthy, A.; Dellink, R.; Bibas, R. (2018): The Macroeconomics of the Circular Economy Transition: A Critical Review of Modelling Approaches. OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development), Environment Working Papers 130, Paris
- Mederake, L.; Hinzmann, M.; Langsdorf, S. (2020): Hintergrundpapier: Plastikpolitik in Deutschland und der EU. Aktuelle Gesetze und Initiativen. Ecologic Institut, Berlin
- Mellen, D.; Becker, T. (2022): Kunststoffe. In: Kurth, P.; Oexle, A.; Faulstich, M. (Hg.): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Wiesbaden, S. 429–448
- Menkhoff, L.; Zeevaert, M. (2022): Deutschland kann seine Versorgungssicherheit bei mineralischen Rohstoffimporten erhöhen. In: DIW Wochenbericht 50, S. 667–675
- Milios, L. (2018): Advancing to a Circular Economy: three essential ingredients for a comprehensive policy mix. In: Sustainability Science 13(3), S. 861–878
- Milios, L. (2021): Towards a Circular Economy Taxation Framework: Expectations and Challenges of Implementation. In: Circular Economy and Sustainability 1(2), S. 477–498
- Ministry for an Ecological and Solidary Transition (2018): Roadmap for the Circular economy. 50 measures for a 100 % circular economy. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/FREC%20anglais.pdf> (24.1.2024)
- MLUK (Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz) (2021): Gewerbeabfälle für den Wirtschaftskreislauf zurückgewinnen. <https://mluk.brandenburg.de/mluk/de/aktuelles/presseinformationen/detail/~02-11-2021-gewerbeabfaelle-fuer-den-wirtschaftskreislauf-zurueckgewinnen> (24.1.2024)

- Müller, A. (2014): Die Herstellung von Aufbaukörnungen aus Mauerwerkbruch. In: Müll und Abfall 11, S. 625–633
- Müller, A. (2016): Erschließung der Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Kreislaufwirtschaft Bau. Weimar
- Müller, R.; Wiesemann, E.; Hermann, A.; Dieroff, J.; Betz, J.; Bulach, W. (2021): Beschaffung von Kunststoffprodukten. Post-Consumer-Rezyklaten. Handreichung für den öffentlichen Einkauf. Umweltbundesamt, TEXTE 130, Dessau-Roßlau
- NABU Nordrhein-Westfalen (o.J.): Artenvielfalt schützen. Forderungen zur NRW-Landtagswahl 2022. <https://nrw.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/gesellschaft-politik/landespolitik/wahlen/2022/30992.html> (24.1.2024)
- Nolte, A. (2018): Metals for Progress – Nachhaltige Multi-Metall-Gewinnung bei Aurubis. In: Thiel, S.; Thomé-Kozmiensky, E.; Goldmann, D. (Hg.): Recycling und Rohstoffe. Neuruppin, S. 300–306
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (o.J.): Taxes on single-use plastics, <https://www.oecd.org/stories/ocean/taxes-on-single-use-plastics-186a058b> (24.1.2024)
- OECD (2021): Towards a more resource-efficient and circular economy. The role of the G20. <https://www.oecd.org/environment/waste/OECD-G20-Towards-a-more-Resource-Efficient-and-Circular-Economy.pdf> (24.1.2024)
- Oexle, A.; Lammers, T. (2022): Kreislaufwirtschaft und Klimaschutz. In: Kurth, P.; Oexle, A.; Faulstich, M. (Hg.): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Wiesbaden, S. 155–172
- Orlando, M.; Molla, G.; Castellani, P.; Pirillo, V.; Torretta, V.; Ferronato, N. (2023): Microbial Enzyme Biotechnology to Reach Plastic Waste Circularity: Current Status, Problems and Perspectives. In: International Journal of Molecular Sciences 24(4), Art. 3877
- Orth, P.; Bruder, J.; Rink, M. (Hg.) (2022): Kunststoffe im Kreislauf. Vom Recycling zur Rohstoffwende. Wiesbaden
- Ostertag, K.; Pfaff, M.; Jacob, K.; Postpischil, R.; Zerkawy, F.; Reuster, L. (2021): Optionen für ökonomische Instrumente des Ressourcenschutzes. Umweltbundesamt, TEXTE 31, Dessau-Roßlau
- Pearce, D.; Turner, R. (1989): Economics of natural resources and the environment. Baltimore
- Perez, J.; Folens, K.; Leus, K.; Vanhaecke, F.; Van Der Voort, P.; Du Laing, G. (2019): Progress in hydrometallurgical technologies to recover critical raw materials and precious metals from low-concentrated streams. In: Resources, Conservation and Recycling 142, S. 177–188
- Petrova, M. (2021): Here's why battery manufacturers like Samsung and Panasonic and car makers like Tesla are embracing cobalt-free batteries. CNBC, <https://www.cnbc.com/2021/11/17/samsung-panasonic-and-tesla-embracing-cobalt-free-batteries-.html> (24.1.2024)
- Plastics Europe (2022): Plastics - the Facts 2022. Brüssel
- Poschmann, H.; Brüggemann, H.; Goldmann, D. (2020): Disassembly 4.0: A Review on Using Robotics in Disassembly Tasks as a Way of Automation. In: Chemie Ingenieur Technik 92(4), S. 341–359
- Postpischil, R.; Jacob, K. (2017): Ressourcenpolitische Innovationen in den EU Mitgliedsstaaten. Inspirationen für Deutschland? Berlin
- Postpischil, R.; Jacob, K. (2018): Evaluationen von Abgaben auf Primärbaustoffe und wechselwirkenden Instrumenten. Eine Auswertung von Evaluationen aus GB, SE, DK und EE hinsichtlich ökologischer Lenkungswirkung, Effizienz und weiterer Effekte. Berlin
- Postpischil, R.; Jacob, K.; Bär, H.; Keimeyer, F.; Schumacher, K. (2021): Mit der Mehrwertsteuer und mit Verbrauchsteuern ökologisch lenken. Forschungszentrum für Umweltpolitik, Freie Universität Berlin, Berlin
- Priya, A.; Hait, S. (2017): Comparative assessment of metallurgical recovery of metals from electronic waste with special emphasis on bioleaching. In: Environmental science and pollution research international 24(8), S. 6989–7008

- Prognos/INFA (Prognos AG; INFA GmbH) (2020): Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2020. Düsseldorf/Ahlen
- Qiu, R.; Lin, M.; Ruan, J.; Fu, Y.; Hu, J.; Deng, M.; Tang, Y.; Qiu, R. (2020): Recovering full metallic resources from waste printed circuit boards: A refined review. In: *Journal of Cleaner Production* 244, Art. 118690
- Quicker, P.; Seitz, M.; Vogel, J. (2022): Chemical recycling: A critical assessment of potential process approaches. In: *Waste Management & Research* 40(10), S. 1494–1504
- Raatz, S.; Seidel, P.; Tuma, A.; Thorenz, A.; Helbig, C.; Reller, A.; Faulstich, M.; Joachimsthaler, C.; Steger, S.; Hagedorn, W.; Bickel, M.; Liedtke, C. (2022b): OptiMet. Ressourceneffizienzsteigerung in der Metallindustrie – Substitution von Primärrohstoffen durch optimiertes legierungsspezifisches Recycling. Umweltbundesamt, TEXTE 81, Dessau-Roßlau
- Ramesohl, S.; Berg, H.; Wirtz, J. (2022): Circular Economy und Digitalisierung – Strategien für die digital-ökologische Industrietransformation. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Wuppertal
- Randerath, A.; Odenthal, S. (2022): Trotz Gesetz: Neuware und Retouren im Müll. <https://www.zdf.de/nachrichten/wirtschaft/amazon-retouren-neuware-muell-versandhandel-100.html> (22.1.2024)
- RecyClass (o.J.): About Recyclclass. <https://recyclclass.eu/about-recyclclass/> (24.1.2024)
- Rennings, K.; Rammer, C.; Oberndorfer, U.; Jacob, K.; Boie, G.; Brucksch, S.; Eisgruber, J.; Haum, R.; Mußler, P.; Schossig, C.; Vagt, H. (2008): Instrumente zur Förderung von Umweltinnovationen. Bestandsaufnahme, Bewertung und Defizitanalyse. Umweltbundesamt, Umwelt, Innovation, Beschäftigung 2, Dessau-Roßlau
- RESAG (UMK-Sonderarbeitsgruppe Rezyklateinsatz stärken) (2022): Bericht an die Umweltministerkonferenz (UMK). <https://mik.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/RESAG-Bericht%202022-01-28.pdf> (24.1.2024)
- Reuter, M. (2018): Von der Utopie einer Kreislaufwirtschaft. Interview. In: Jorzik, O.; Kandarr, J.; Klinghammer, P. (Hg.): Rohstoffe in der Tiefsee. Metalle aus dem Meer für unsere High-Tech-Gesellschaft. Potsdam, S. 92–97
- Rodríguez-Robles, D.; García-González, J.; Juan-Valdés, A.; Morán-del Pozo, J. M.; Guerra-Romero, M. I. (2015): Overview regarding construction and demolition waste in Spain. In: *Environmental Technology* 36(23), S. 3060–3070
- Roosen, M.; Mys, N.; Kusenbergh, M.; Billen, P.; Dumoulin, A.; Dewulf, J.; Van Geem, K.; Ragaert, K.; Meester, S. (2020): Detailed Analysis of the Composition of Selected Plastic Packaging Waste Products and Its Implications for Mechanical and Thermochemical Recycling. In: *Environmental Science & Technology* 54(20), S. 13282–13293
- Rosen, D. (2021): Re-Use und Recycling von Ziegeln. Status quo und Perspektiven. In: *Mauerwerk* 25(2), S. 74–81
- Roth-Kleyer, S. (2018): Recyclingziegel für Vegetationssubstrate im GaLaBau. In: *Neue Landschaft* 2, S. 31–38
- Rotter, V.; Geiping, J.; Flamme, S.; Ueberschaar, M. (2014): Anlagenbilanzierung als Bewertungsinstrument für ein Qualitätsrecycling von Elektroaltgeräten. In: Thomé-Kozmiensky, E.; Goldmann, D. (Hg.): *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin, S. 191–203
- Rotter, V.; Ueberschaar, M.; Chancerel, P. (2013): Rückgewinnung von Spurenmetallen aus Elektroaltgeräten. In: Thomé-Kozmiensky, K.; Goldmann, D. (Hg.): *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin, S. 481–493
- RVO (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland) (2021): Green Deal Reliable Evidence for Applications of Plastic Recyclate. Pilot projects. <https://www.greendeals.nl/sites/default/files/2022-02/GD%20pilots%20projects%20final%20%28Engelstalig%29.pdf> (24.1.2024)

- Salmenperä, H. (2021): Different pathways to a recycling society – Comparison of the transitions in Austria, Sweden and Finland. In: *Journal of Cleaner Production* 292, Art. 125986
- Saltzmann, H. (2015): Category Plan Workwear Dutch national government. Dutch Ministry of Defence, <https://www.pianoo.nl/sites/default/files/documents/documents/categoryplanworkweardutchnationalgovernment-april2015.pdf> (24.1.2024)
- Sander, K.; Schilling, S. (2010): Optimierung der Steuerung und Kontrolle grenzüberschreitender Stoffströme bei Elektroaltgeräten / Elektroschrott. Umweltbundesamt, TEXTE 11, Dessau-Roßlau
- Sanderson, K. (2022): Heat and bacteria recycle mixed plastics into useful chemicals. In: *Nature*, Art. d41586-022-03271-w
- Schäfer, P. (2021): Recycling – ein Mittel zu welchem Zweck? Modellbasierte Ermittlung der energetischen Aufwände des Metallrecyclings für einen empirischen Vergleich mit der Primärgewinnung. Wiesbaden
- Scheyder, E.; Nellis, S. (2020): Apple pushes recycling of iPhone with »Daisy« robot. <https://www.reuters.com/article/us-usa-minerals-recycling-idUSKBN1Z925S> (24.1.2024)
- Schiller, G.; Lehmann, I.; Gruhler, K.; Hennersdorf, J.; Lützkendorf, T.; Mörmann, K.; Knappe, F.; Muchow, N.; Reinhardt, J. (2022): Kartierung des anthropogenen Lagers IV: Erarbeitung eines Gebäudepass- und Gebäudekatasterkonzepts zur regionalisierten Erfassung des Materialhaushaltes mit dem Ziel der Optimierung des Recyclings. Umweltbundesamt, TEXTE 5, Dessau-Roßlau
- Schiller, G.; Ortlepp, R.; Krauß, N.; Steger, S.; Schütz, H.; Acosta Fernández, J.; Reichenbach, J.; Wagner, J.; Baumann, J. (2015): Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft. Umweltbundesamt, TEXTE 83, Dessau-Roßlau
- Schippers, A.; Hedrich, S. (2018): Stand der Technik und Potential von Biohydrometallurgie für Recycling. In: Thiel, S.; Thomé-Kozmiensky, E.; Goldmann, D. (Hg.): *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin, S. 351–360
- Schischke, K.; Berwald, A.; Dimitrova, G.; Clemm, C.; Rödig, L.; Jepsen, D. (2021): Einsatz von Post-Consumer-Recycling-Kunststoffen in energieverbrauchsrelevanten Geräten. Kurzexpertise im Rahmen des Refoplan-Vorhabens »Wissenschaftliche Begleitung der Umsetzung der Ökodesign-Richtlinie und Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung - Viertes Arbeitsprogramm«. Umweltbundesamt, TEXTE 24, Dessau-Roßlau
- Schluep, M. (2014): Chapter 25 – Waste Electrical and Electronic Equipment Management. In: Worrell, E.; Reuter, A. (Hg.): *Handbook of recycling. state-of-the-art for practitioners, analysts, and scientists*. Amsterdam u. a.O. S. 397–403
- Schneider, T.; Schmidt, V. (2020): Rechtsgutachten umweltfreundliche öffentliche Beschaffung. Aktualisierung 2020. Umweltbundesamt, TEXTE 188, Dessau-Roßlau
- Seelig, J.; Faulstich, M.; Jeschonowski, J.; Hieronymi, K. (2022): Demontage von Elektroaltgeräten und Altfahrzeugen. In: Kurth, P.; Oexle, A.; Faulstich, M. (Hg.): *Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft*. Wiesbaden, S. 697–716
- Seidel, P.; Ebert, D.; Schinke, R.; Möckel, R.; Raatz, S.; Chao, M.; Niederschlag, E.; Kreschel, T.; Gloaguen, R.; Renno, A. D. (2021): Comparison of Elemental Analysis Techniques for the Characterization of Commercial Alloys. In: *Metals* 11(5), Art. 736
- SenUVK (Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz) (2021): VwVBU: Anhang 1: Umweltschutzanforderungen bei der Beschaffung (Leistungsblätter). 26: Neubau und Komplettmodernisierung von öffentlichen Gebäuden CPV 710/440. https://www.berlin.de/nachhaltige-beschaffung/_assets/vwvbu_anhang-1.pdf?ts=1705104100 (24.1.2024)
- Seyring, N.; Kling, M.; Weißenbacher, J.; Hestin, M.; Lecerf, L.; Magalini, F.; Khetriwal D.; Kuehr, R. (2015): Study on WEEE recovery targets, preparation for re-use targets and on the method for calculation of the recovery targets. Europäische Kommission, Luxemburg

- Siebel, T. (2022): Metallrecycling muss effizienter, sauber und wirtschaftlich werden. Springer Professional, <https://www.springerprofessional.de/recycling/metalle/metallrecycling-muss-effizienter--sauber-und-wirtschaftlich-werd/23022146> (24.1.2024)
- Söderholm, P. (2011): Taxing virgin natural resources: Lessons from aggregates taxation in Europe. In: Resources, Conservation and Recycling 55(11), S. 911–922
- Solis, M.; Silveira, S. (2020): Technologies for chemical recycling of household plastics - A technical review and TRL assessment. In: Waste Management 105, S. 128–138
- Solis-Guzmán, J.; Marrero, M.; Montes-Delgado, M. V.; Ramírez-de-Arellano, A. (2009): A Spanish model for quantification and management of construction waste. In: Waste Management 29(9), S. 2542–2548
- SPD; Bündnis 90/Die Grünen; FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Berlin
- Statista (Statista GmbH) (o.J.a): Abfallaufkommen in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2020. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/160576/umfrage/abfallaufkommen-in-deutschland-seit-1999/> (7.6.2023)
- Statista (o.J.b): Anteil von Recycling-Material an der Neuproduktion nach Materialart in Deutschland 2018. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/911258/umfrage/anteil-von-recycling-material-an-der-neuproduktion/> (24.1.2024)
- Statista (o.J.c): Deutsche Elektrotechnik - Import nach Region weltweit 2021. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/152193/umfrage/deutsche-elektrotechnik-importe-nach-regionen-seit-2008/> (7.6.2023)
- Statista (o.J.d): Entsorgungswirtschaft – Beschäftigtenzahl in Deutschland bis 2020. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/257676/umfrage/beschaefigtetenzahl-in-der-entsorgungswirtschaft-in-deutschland/> (7.6.2023)
- Statista (o.J.e): Entsorgungswirtschaft – Umsatz in Deutschland bis 2020. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/257669/umfrage/umsatz-der-entsorgungswirtschaft-in-deutschland/> (7.6.2023)
- Statista (o.J.f): Entsorgungswirtschaft – Unternehmenszahl in Deutschland bis 2020. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/257673/umfrage/unternehmenszahl-in-der-entsorgungswirtschaft-in-deutschland/> (7.6.2023)
- Statista (o.J.g): Metalle der Energiewende. <https://de.statista.com/themen/10597/metalle-der-energiewende/#dossier-chapter2> (7.6.2023)
- Statista (o.J.h): Öffentlicher Bau – Anteil am Umsatz im Bauhauptgewerbe in Deutschland bis 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/253572/umfrage/anteil-des-oeffentlichen-baus-am-umsatz-im-bauhauptgewerbe/> (7.6.2023)
- Statista (o.J.i): Recyclingbranche – Anzahl der Beschäftigten in Deutschland bis 2020. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/259522/umfrage/beschaefigtetenzahl-der-recyclingbranche-in-deutschland/> (7.6.2023)
- Statista (o.J.j): Recyclingbranche – Anzahl der Unternehmen in Deutschland bis 2020. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/259520/umfrage/umsatz-der-recyclingbranche-in-deutschland/> (7.6.2023)
- Statista (o.J.k): Recyclingbranche – Umsatz in Deutschland bis 2020. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/259519/umfrage/umsatz-der-recyclingbranche-in-deutschland/> (7.6.2023)
- Statista (o.J.l): Statistiken zum Thema Recycling. 11.1.2024, <https://de.statista.com/themen/1549/recycling/#topicOverview> (24.1.2024)

- Statista (o.J.m): Umsatz der deutschen Kunststoffindustrie nach Sektoren im Jahr 2021. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/200623/umfrage/umsatz-der-deutschen-kunststoffindustrie-nach-branchensektoren/> (7.6.2023)
- Statista (2021): Waste Management and Recycling in Germany 2021. <https://www.statista.com/study/46580/waste-management-and-recycling-in-germany/> (24.1.2024)
- Statista (2023): Kreislaufwirtschaft weltweit 2023. <https://de.statista.com/statistik/studie/id/68681/dokument/kreislaufwirtschaft-weltweit/> (24.1.2024)
- Steger, S.; Ritthoff, M.; Bulach, W.; Schüler, D.; Kosinska, I.; Degreif, S.; Dehoust, G.; Bergmann, T.; Krause, P.; Oetjen-Dehne, R. (2019): Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität. Umweltbundesamt, TEXTE 34, Dessau-Roßlau
- Stiftung ear (stiftung elektro-altgeräte register) (o.J.): Verzeichnis der Betreiber von Erstbehandlungsanlagen. <https://www.ear-system.de/ear-verzeichnis/eba.jsf;jsessionid=BXhCnzK68ZcE4WnQfMq0KVon.tomcat3#no-back> (24.1.2024)
- Stiftung ear (2021a): TRENDbarometer 1/21. https://www.stiftung-ear.de/fileadmin/Dokumente/trendbarometer/PlanE_Trendbarometer_21-1.pdf (24.1.2024)
- Stiftung ear (2021b): TRENDbarometer 2/21. https://www.stiftung-ear.de/fileadmin/Dokumente/trendbarometer/PlanE_Trendbarometer_21-2.pdf (24.1.2024)
- Syberg, K. (2022): Path to sustainability. In: Nature 611, S. S6
- SYSTEMIQ (2022): ReShaping Plastics. Pathways to a Circular, Climate Neutral Plastics System in Europe. <https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2022/05/ReShapingPlastics-v2.1.pdf> (24.1.2024)
- TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2006): Nachfrageorientierte Innovationspolitik. (Edler, J.) TAB-Arbeitsbericht Nr. 99, Berlin
- TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2020): Hochwertiges Recycling für eine Kunststoffkreislaufwirtschaft. (Jetzke, T.; Richter, S.) TAB-Themenkurzprofil Nr. 35, Berlin
- TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2021): Technologien zur Minimierung von Lebensmittelverlusten (Food Waste Technologies). (Bogenstahl, C.; Richter, S.) TAB-Themenkurzprofil Nr. 47, Berlin
- TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2022): Innovative Technologien, Prozesse und Produkte in der Bauwirtschaft. (Kehl, C.; Achternbosch, M.; Revermann, C.) TAB-Arbeitsbericht Nr. 199, Berlin
- Tanne, C.; Schippers, A. (2020): Angewandte Elektrochemie in der Biohydrometallurgie. In: BIOSpektrum 26(5), S. 553–555
- Thärichen, H. (2022): Grundzüge des Abfallrechts. Berlin
- Treick, A.; Woidasky, J.; Lang-Koetz, C. (2022): Object Identification Technologies as Key Enabler for Circular Business Models. In: Chemie Ingenieur Technik 94(4), S. 479–492
- Tukker, A.; de Groot, H.; Simons, L.; Wiegersma, S. (1999): Chemical Recycling of Plastics Waste (PVC and other resins). TNO Institute of Strategy, Technology and Policy, Delft
- UBA (Umweltbundesamt) (o.J.a): Abfall- und Kreislaufwirtschaft. 27.1.2022, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfall-kreislaufwirtschaft> (26.5.2023)
- UBA (o.J.b): Abfallaufkommen. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#deutschlands-abfall> (7.6.2023)
- UBA (o.J.c): Bauabfälle. 27.7.2023, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bauabfaelle#verwertung-von-bau-und-abbruchabfallen> (24.1.2024)

- UBA (o.J.d): Chemikalien/REACH. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/reach-chemikalien-reach> (24.1.2024)
- UBA (o.J.e): Der Einwegkunststofffonds: Verantwortung übernehmen. Vermüllung unterbinden. <https://www.umweltbundesamt.de/ewkf/#zeitstrahl-bis-zum-start-der-register-und-zum-anschliessendem-betrieb> (24.1.2024)
- UBA (o.J.f): Elektroaltgeräte. 1.1.2022, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-der-abfallwirtschaft/elektroaltgeraete#elektronikaltgerate-in-deutschland> (24.1.2024)
- UBA (o.J.g): Industrieemissionsrichtlinie – Beste verfügbare Techniken. 7.8.2019, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industrieemissionsrichtlinie-beste-verfuegbare> (24.1.2024)
- UBA (o.J.h): Inländische Entnahme von Rohstoffen und Materialimporte. 13.6.2018, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/rohstoffe-als-ressource/inlaendische-entnahme-von-rohstoffen#konkurrenz-um-rohstoffe> (24.1.2024)
- UBA (o.J.i): Inverkehrbringen und Rücknahme von Elektroaltgeräten in Deutschland bis 2020. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1258933/umfrage/elektroaltgeraete-inverkehrbringen-und-ruecknahme/> (7.6.2023)
- UBA (o.J.j): Kunststoffabfälle. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfaelle> (24.1.2024)
- UBA (o.J.k): Strategien und Programme der Bundesregierung. 24.8.2021, <https://www.umweltbundesamt.de/strategien-programme-der-bundesregierung> (24.1.2024)
- UBA (o.J.l): Umweltfreundliche Beschaffung: beschaffung-info.de. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/umweltfreundliche-beschaffung> (24.1.2024)
- UBA (o.J.m): Verpackungen. 17.11.2021, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-der-abfallwirtschaft/verpackungen> (24.1.2024)
- UBA (o.J.n): Welche Menge an Rohstoffen braucht die Bauindustrie und in welchen Mengen werden sie regional abgebaut? <https://www.umweltbundesamt.de/umweltatlas/bauen-wohnen/wirkungen-bauen/rohstoffentnahme-bauen/welche-menge-an-rohstoffen-braucht-die-bauindustrie> (7.6.2023)
- UBA (2010): Rohstoffeffizienz – Wirtschaft entlasten, Umwelt schonen. Dessau-Roßlau
- UBA (2016): Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes. Dessau-Roßlau
- UBA (2019a): Beton. Factsheet, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/factsheet_beton_fi_barrierefrei.pdf (24.1.2024)
- UBA (2019b): Kunststoffe in der Umwelt. Dessau-Roßlau
- UBA (2019c): Porenbeton. Factsheet, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/factsheet_porenbeton_fi_barrierefrei.pdf (24.1.2024)
- UBA (2019d): Ziegel. Factsheet, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/factsheet_ziegel_fi.pdf (24.1.2024)
- UNEP (United Nations Environment Programme) (2013): Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure. (Reuter, M.; Hudson, C.; van Schaik, A.; Heiskanen, K.; Meskers, O.; Hagelüken, O.) Nairobi
- UNEP (2022): Historic day in the campaign to beat plastic pollution: Nations commit to develop a legally binding agreement. <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/historic-day-campaign-beat-plastic-pollution-nations-commit-develop> (24.1.2024)
- VDPM (Verband für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V.); GIPS (Bundesverband der Gipsindustrie e.V.) (2020): Rohstoffversorgung mit Gips muss schon jetzt gesichert werden! https://www.gips.de/fileadmin/user_upload/Gips-Rohstoffsicherung_VDPM__BV_Gips.pdf (24.1.2024)

- VDZ (Verein Deutscher Zementwerke e.V.) (o.J.): R-ZiEMENT: Ziegelhaltige Recyclingbaustoffe als Rohstoff für ressourceneffiziente Zemente in dauerhaften Betonen. <https://www.vdz-online.de/wissensportal/forschungsprojekte/r-ziement-ziegelhaltige-recyclingbaustoffe-als-rohstoff-fuer-ressourceneffiziente-zemente-in-dauerhaften-betonen> (19.1.2024)
- Vogel, J.; Krüger, F.; Fabian, M. (2020): Chemisches Recycling. (Vogel, J.; Krüger, F.; Fabian, M.) Umweltbundesamt, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-17_hgp_chemisches-recycling_online.pdf (24.1.2024)
- Voßwinkel, J.; Reinhardt, J.; Schwind, S.; Jousseau, M. (2020): Kreislauforientierte Kunststoffwirtschaft für Non-Food-Verpackungen. Anforderungen an die Umsetzung des EU-Aktionsplans Kreislaufwirtschaft. Centrum für Europäische Politik, Freiburg
- Washington State Department of Ecology (o.J.): Recycled content minimums. <https://ecology.wa.gov/Waste-Toxics/Reducing-recycling-waste/Waste-reduction-programs/Plastics/2021-plastic-pollution-laws/Recycled-content-minimums> (24.1.2024)
- Watkins, E.; ten Brink, P.; Withana, S.; Russi, D.; Illes, A.; Mutafoğlu, K.; Ettliger, S.; Andersen, M.; Pedersen, A. (2017): Capacity building, programmatic development and communication in the field of environmental taxation and budgetary reform. Europäische Kommission, Brüssel
- WEEE Forum (2020): An enhanced definition of EPR and the role of all actors. https://weee-forum.org/wp-content/uploads/2020/11/EPR-and-the-role-of-all-actors_final.pdf (24.1.2024)
- Wilts, H. (2016): Deutschland auf dem Weg in die Kreislaufwirtschaft? Friedrich-Ebert-Stiftung, WISO Diskurs 6, Bonn
- Wilts, H. (2020): »Pfand auf alles« – eine Lösung für geschlossene Wertstoffkreisläufe in einer Kreislaufwirtschaft? Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Wuppertal
- Wilts, H. (2021): Zirkuläre Wertschöpfung. Aufbruch in die Kreislaufwirtschaft. Friedrich-Ebert-Stiftung, WISO Diskurs 15, Bonn
- Wilts, H.; Berg, H. (2017): Digitale Kreislaufwirtschaft. Die Digitale Transformation als Wegbereiter ressourcenschonender Stoffkreisläufe. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, in brief 4, Wuppertal
- Wilts, H.; Bleischwitz, R.; Sanden, J. (2010): Ein Covenant zur Schließung internationaler Stoffkreisläufe im Bereich Autorecycling. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Ressourceneffizienz Paper 3.5, Wuppertal
- Wilts, H.; von Gries, N. (2017): Der schwere Weg zur Kreislaufwirtschaft. In: GWP – Gesellschaft. Wirtschaft. Politik 66(1), S. 23–28
- Wilts, H.; von Gries, N.; Bahn-Walkowiak, B. (2016): From Waste Management to Resource Efficiency – The Need for Policy Mixes. In: Sustainability 8(7), Art. 622
- Wilts, H.; Lucas, R.; von Gries, N.; Zierngiebl, M. (2014): Recycling in Deutschland – Status quo, Potenziale, Hemmnisse und Lösungsansätze. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Wuppertal
- Wirth, C.; Hansjürgens, B.; Dormann, C.; Mewes, M.; Möckel, S.; Pfaff, C.-T.; Ring, I.; Schröter-Schlaack, C.; Weigelt, A.; Winter, M. (2013): Inwertsetzung von Biodiversität. Wissenschaftliche Grundlagen und politische Perspektiven. Universität Leipzig, Deutsches Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung, Leipzig
- Wurster, S.; Schulze, R.; Simon, R.; Hoyer, S. (2021): A Grounded Theory on Sustainable Circular Public Procurement in Germany: Specific Product Case and Strategies. In: Sustainability 13(24) Art. 13525
- Wurzel, R.; Zito, A.; Jordan, A. (2013): From government towards governance? Exploring the role of soft policy instruments. In: German Policy Studies 9(2), S. 21–48
- Wurzel, R.; Zito, A.; Jordan, A. (2019): Smart (and Not-So-Smart) Mixes of New Environmental Policy Instruments. In: van Erp, J.; Faure, M.; Nollkaemper, A.; Philipsen, N. (Hg.): Smart Mixes for Transboundary Environmental Harm. Cambridge, S. 69–94

- WWF Deutschland (2019): Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie. Hintergrund und Handlungsoptionen. Berlin
- Ylä-Mella, J.; Román, E. (2019): Chapter 18 – Waste electrical and electronic equipment management in Europe: Learning from best practices in Switzerland, Norway, Sweden and Denmark. In: Goodship, V.; Stevels, A.; Huisman, J. (Hg.): Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Handbook. Sawston, S. 483–519
- ZEIT ONLINE (2023): Apple stattet neue iPhones mit USB-C-Anschlüssen aus.
<https://www.zeit.de/digital/2023-09/eu-verordnung-apple-usb-c-anschluss-ladegeraet-iphone-15>
(22.1.2024)
- ZEW (ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH) (2021): Entsorgung und Recycling. Ergebnisse der Deutschen Innovationserhebung 2020. ZEW-Branchenreport Innovationen 25, Mannheim
- ZfK (Zeitung für kommunale Wirtschaft) (2022): Deutschland versinkt im Elektroschrott.
<https://www.zfk.de/entsorgung/deutschland-versinkt-im-elektroschrott> (24.1.2024)
- Ziegel (Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V.) (o.J.): Re-Use und Recycling von Ziegeln.
<https://www.ziegel.de/recycling> (24.1.2024)
- Ziegel (2020): Re-Use und Recycling von Ziegeln. Status quo und Perspektiven. Berlin
- Zühlsdorff, A. (2022): Stoffrecht. In: Kurth, P.; Oexle, A.; Faulstich, M. (Hg.): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Wiesbaden, S. 211–233

7 Anhang

7.1 Abbildungen

| | Seite |
|---|-------|
| Abb. 2.1 Die 5-stufige Abfallhierarchie nach § 6 KrWG am Beispiel der Bau- und Abbruchabfälle | 26 |
| Abb. 2.2 Modell der Kreislaufwirtschaft..... | 31 |
| Abb. 2.3 Die CMU in Deutschland für verschiedene Materialgruppen .. | 32 |
| Abb. 3.1 Entwicklung des Pro-Kopf-Verbrauchs von Kunststoffverpackungen in Deutschland (1991 bis 2020)..... | 38 |
| Abb. 3.2 Zusammensetzung der Abfallfraktion nach Kunststoffsorten | 41 |
| Abb. 3.3 Verarbeitung von Neuware und Rezyklat nach Branchen (2019) | 42 |
| Abb. 3.4 Verarbeitung von Rezyklat nach Branchen (2019)..... | 43 |
| Abb. 3.5 Verarbeitung von Rezyklat in Verpackungen nach Produkt in Deutschland (2019)..... | 44 |
| Abb. 3.6 Neukategorisierung der Sammelgruppen gemäß WEEE-Richtlinie –Neufassung und ElektroG..... | 60 |
| Abb. 3.7 In Verkehr gebrachte Mengen, Sammelmengen und -quoten bei Elektro- und Elektronikgeräten..... | 61 |
| Abb. 3.8 Hauptfraktionen in Elektro- und Elektronikgeräten | 64 |
| Abb. 3.9 EAG-Stoffstromanalyse (gewichtsbasiert; Stand 2020) | 65 |
| Abb. 3.10 Schematische Prozessdarstellung bei der EAG-Erstbehandlung | 66 |
| Abb. 3.11 Das Metallrad | 69 |
| Abb. 3.12 Verfahrensschema des Unternehmens Aurubis zur Multimetallgewinnung aus Kupferschrotten | 70 |
| Abb. 3.13 Aufkommen der Bauabfallfraktionen in Deutschland (2019) | 76 |
| Abb. 3.14 Aufkommen und Entsorgung von Bodenaushub in Deutschland | 79 |
| Abb. 3.15 Aufkommen und Entsorgung von Altbeton in Deutschland | 80 |
| Abb. 3.16 Aufkommen und Entsorgung von Mauer- und Dachziegeln in Deutschland (2019)..... | 81 |
| Abb. 3.17 Aufkommen und Entsorgung von gipshaltigen Abfällen in Deutschland (2019) | 82 |
| Abb. 3.18 Aufkommen und Entsorgung von gemischtem Bauschutt in Deutschland (2019) | 84 |
| Abb. 3.19 Verbleib der Recyclingbaustoffe (2018) | 85 |

7.2 Tabellen

| | Seite |
|--|-------|
| Tab. 3.1 Verwertung von Verpackungsabfällen aus Kunststoffen (2020) | 42 |
| Tab. 3.2 Erstbehandlung und Recyclingrate von Geräte Kategorien (2020) | 62 |

7.3 Kästen

| | |
|---|-----|
| Kasten 2.1 Struktur der Recyclingbranche | 34 |
| Kasten 3.1 Geplante europäische Vorschriften für Verpackungen..... | 40 |
| Kasten 3.2 Anrechenbarkeit des chemischen Recyclings..... | 48 |
| Kasten 3.3 Patentanmeldungen im internationalen Vergleich..... | 49 |
| Kasten 3.4 Kunststoffverpackungssteuer in Großbritannien | 54 |
| Kasten 3.5 Green Deals zur einheitlichen Berechnung des Rezyklatanteils in Produkten (Niederlande)..... | 56 |
| Kasten 3.6 Geräte- und Sammelkategorien gemäß WEEE-Richtlinie..... | 59 |
| Kasten 3.7 Vorgezogene Recyclinggebühr (Schweiz)..... | 74 |
| Kasten 3.8 R-Beton | 86 |
| Kasten 3.9 Ersatzbaustoffverordnung..... | 89 |
| Kasten 3.10 Baustoffsteuer in Großbritannien | 93 |
| Kasten 4.1 USA – Mindestrezyklateinsatzquoten für Verpackungen..... | 100 |
| Kasten 4.2 Verpflichtende Prozessstandards..... | 103 |
| Kasten 4.3 Offener Datenstandard für digitale Produktpässe der Textilindustrie..... | 105 |
| Kasten 4.4 Einwegkunststoffverpackungssteuer in Spanien | 107 |
| Kasten 4.5 Schweden und Dänemark – Abgaben auf Elektro- und Elektronikaltgeräte in Kombination mit weiteren Instrumenten | 109 |
| Kasten 4.6 Spanien – Pfandrückerstattungssystem für Bau- und Abrisschutt | 110 |
| Kasten 4.7 Niederlande – Mindestvorgabe für Rezyklatanteil bei öffentlichen Ausschreibungen | 112 |
| Kasten 4.8 Regelungen zur umweltfreundlichen öffentlichen Beschaffung des Landes Berlin | 113 |
| Kasten 4.9 Lettland – Befreiung von der landesweiten Ressourcensteuer als Anreiz für umweltgerechte Abfallverwertung und Recycling..... | 115 |
