
2.1 Einleitung

Die weitreichenden Auswirkungen des fortschreitenden Klimawandels erfordern eine Weiterentwicklung der etablierten Wirtschaftsweisen. Von hoher Bedeutung ist dabei, wie die Industrienationen ihre Versorgung mit Rohstoffen bei gleichzeitig exponentiell zunehmender Nachfrage gestalten. Für die Gewinnung von Rohstoffen werden traditionell vor allem primäre Quellen genutzt. Wegen des steigenden Verbrauchs werden zunehmend aufwendiger auszubeutende natürliche Lagerstätten abgebaut. Energieverbrauch und Belastungen für die Umwelt pro gewonnener Rohstoffeinheit haben dadurch ein bisher nicht dagewesenes Niveau erreicht. Irreversible Schäden an wertvollen Ökosystemen, unter anderem durch Flächenverbrauch und Biodiversitätsverlust, sind die lokalen Folgen. Globale Auswirkungen haben diese Aktivitäten unter anderem in Form des Klimawandels – verursacht durch die mit zunehmender Energieintensität weiter steigenden Treibhausgasemissionen.

Deutschland ist ein relativ rohstoffarmes Land. Dennoch wird mit etwa 26 Prozent (im Jahr 2015) ein signifikanter Anteil des Bruttoinlandsprodukts durch die produzierende Industrie erwirtschaftet [1]. Die dabei verwendeten Rohstoffe werden zum Großteil importiert. Im Fall der metallischen Rohstoffe ist Deutschland zu nahezu einhundert Prozent auf Importe angewiesen.

Deutschland wird in Zukunft nicht umhin kommen, seine Strategien zur nachhaltigen Rohstoffversorgung grundlegend zu überdenken. Im Inland zurückgewonnene Sekundärrohstoffe sind ein geeignetes Mittel, die deutsche Wirtschaft unabhängiger von der Verfügbarkeit kostengünstiger Rohstoffe am Weltmarkt zu machen. Zusätzlich würde dies eine höhere Planungssicherheit für die rohstoffveredelnde Industrie erzeugen und zum Erreichen des zweifachen Entkopplungsziels, welches der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) benannt hat, beitragen. Danach ist die Grundlage einer nachhaltigen Wirtschaftsweise einerseits die Wohlstandsentwicklung vom Ressourcenverbrauch und

andererseits den Ressourcenverbrauch von den einhergehenden Umweltauswirkungen zu entkoppeln [2].

Im Hinblick auf das Ziel einer weitgehenden Kreislaufführung der nichtenergetischen Rohstoffe konnten einige Fortschritte erzielt werden, aber noch immer wird ein Teil der anfallenden Abfälle nicht für die Rückgewinnung der enthaltenen Rohstoffe genutzt. Hier müssen Industrie, Politik und Gesellschaft mit gebündelten Kräften und entschiedenem Willen handeln, um das Ziel einer Kreislaufwirtschaft in absehbarer Zeit zu erreichen. Die Rolle der Abfallwirtschaft für die Rückgewinnung von Rohstoffen ist dabei nicht neu: Seit 2006 werden regelmäßig immerhin über 60 Prozent der Siedlungsabfälle in Anlagen zur stofflichen Verwertung behandelt [3]. Dies ist nicht nur in Anbetracht steigender Rohstoffpreise am Weltmarkt und der Versorgungssicherheit wichtig. Zunehmend wächst auch die Erkenntnis über die Belastungsgrenzen unseres Planeten.

Ein Ausbau der Kreislaufwirtschaft ist somit sowohl aus ökonomischen Gründen und dem damit zusammenhängenden Wohlstand der Gesellschaft als auch aus ökologischer Sicht unumgänglich. Nachfolgend soll ein Überblick über die Bedeutung einer im Rahmen der thermodynamischen Grenzen größtmöglichen Kreislaufführung von Rohstoffen gegeben werden.

2.2 Globale Herausforderungen der Rohstoffwirtschaft

2.2.1 Rohstoffverfügbarkeit und -nachfrage

Die globale Rohstoffwirtschaft steht vor der Herausforderung, die Rohstoffverfügbarkeit der größer werdenden Nachfrage anzupassen. Entscheidende Größen, um die zukünftige Verfügbarkeit zu beschreiben, sind die vorhandenen Reserven und Ressourcen sowie die damit in Zusammenhang stehenden Reichweiten.

Die Reserven stellen die gegenwärtig sicher nachgewiesenen und mit bekannter Technologie wirtschaftlich gewinnbaren Vorkommen eines Rohstoffes dar. Dagegen umfasst der Begriff Ressourcen jene Lagerstätten, die entweder geologisch erwartet werden oder auch bereits bekannt sind, jedoch aufgrund technischer oder wirtschaftlicher Hindernisse nicht gewonnen werden können [4]. Durch den Einfluss von Preissteigerungen am Weltrohstoffmarkt, Exploration oder technischen Entwicklungen können Ressourcen in Reserven überführt werden. Der ermittelte Umfang einer jeden rohstofflichen Reserve unterliegt dadurch starken Schwankungen. Unter Betrachtung des Umfangs vorhandener Ressourcen kann im Regelfall davon ausgegangen werden, dass die Versorgung der Weltwirtschaft mit mineralischen und energetischen Rohstoffen auch für längere Zeiträume gesichert ist. Kurz- bis mittelfristig sind jedoch heute schon Engpässe absehbar.

Dazu lohnt es sich, einen Blick auf die unterschiedlichen Reichweitenbegriffe zu werfen. Allgemein wird die Reichweite durch Bezug der Reserven beziehungsweise Ressourcen auf den Verbrauch berechnet. Dabei wird allgemein zwischen statischer und dynamischer Reichweite unterschieden. Während die statische Reichweite auf der Annahme eines zukünftig konstant bleibenden Jahresverbrauchs basiert und diesen zu den momentanen

Reserven/Ressourcen in Beziehung setzt, werden zur Ermittlung der dynamischen Reichweite Modelle für die Entwicklung des Jahresverbrauchs und der Reserven herangezogen [5]. Bei zukünftig steigender Nachfrage und gleichbleibender Fördermenge sind die dynamischen Reichweiten demnach weitaus geringer als die zumeist verwendeten statischen Reichweiten der Rohstoffe.

Aufgrund der erwähnten Dynamik sind die ermittelten Reichweiten nicht als feste Größe anzusehen, sondern müssen vielmehr auf Basis der jeweils bestehenden Datengrundlage aktualisiert werden. Als Beispiel kann hier die prognostizierte Reichweite der Erdölreserven herangezogen werden. Obwohl es unbestritten ist, dass die weltweiten Vorräte an fossilen Energieträgern deutlich begrenzt sind und der Peak Oil schon mehrfach als überschritten angesehen wurde, verschiebt sich die errechnete Reichweite der Reserven seit Jahrzehnten in die Zukunft. Dies ist sowohl auf neu entdeckte beziehungsweise erschlossene konventionelle Vorkommen zurückzuführen, als auch auf die zunehmende Nutzung unkonventioneller Vorkommen (zum Beispiel Ölschiefer oder Teersande). Auch hier wird jedoch das Problem des Versiegens des weltweit wichtigsten Energieträgers lediglich in die Zukunft verlagert, eine dauerhafte Lösung ist damit nicht zu erzielen [6].

Bedingt durch das Wachstum der Weltwirtschaft steigt die Nachfrage nach Rohstoffen jeglicher Art rasant an – so auch bei den Metallen. Die Menge des abgebauten Kupfers stieg beispielsweise von knapp 10 Mio. t zu Beginn der 1990er Jahre auf knapp 19 Mio. t im Jahr 2015 [7]. Die weltweite Aluminiumproduktion erhöhte sich im gleichen Zeitraum von unter 20 Mio. t auf rund 58 Mio. t [8]. Unter der Voraussetzung, dass die Entwicklungsländer langfristig zu den OECD-Staaten aufschließen, ist für die Zukunft eine Fortsetzung dieser Entwicklung der globalen Rohstoffnachfrage zu erwarten (Abb. 2.1).

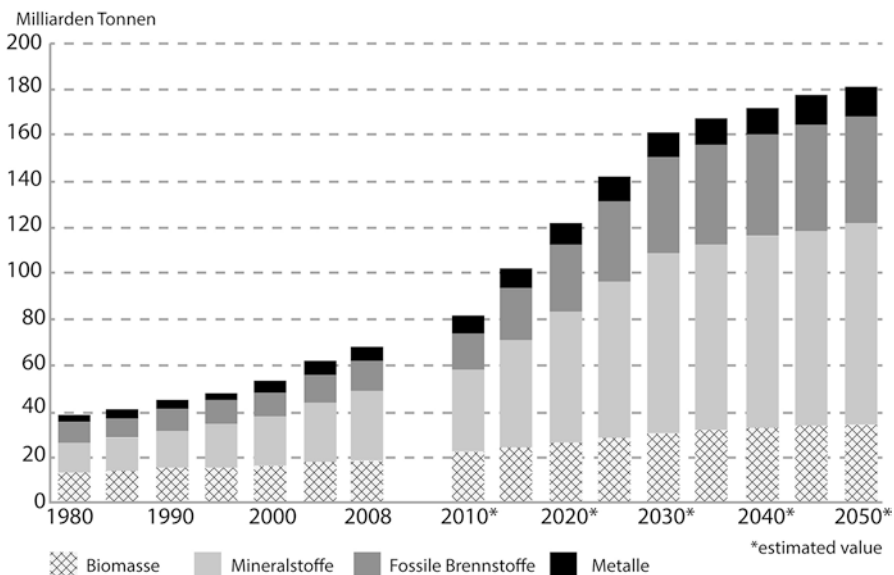


Abb. 2.1 Globaler Ressourcenverbrauch unter der Annahme, dass Entwicklungsländer bis 2030 auf OECD-Level aufschließen. Nach [9]

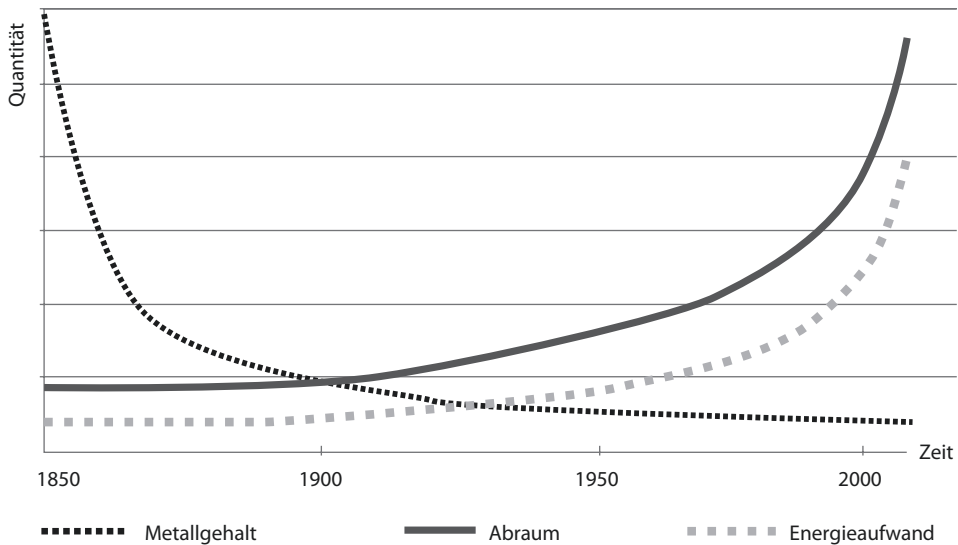


Abb. 2.2 Schematische Darstellung der Entwicklung von Metallgehalt, Abraummenge und Energiebedarf

Neben der Ausweitung der Fördermengen in bereits erschlossenen Abbaugebieten kommt es verstärkt zur Exploration neuer Lagerstätten. Der Aufwand, den die Gewinnung einer Einheit eines Rohstoffes erfordert, bleibt dabei nicht konstant. Vielmehr unterliegt er durch abnehmende Wertstoffgehalte und geographisch wie geologisch unzugänglichere Vorkommen in den Lagerstätten regelmäßig einer zwangsläufigen Steigerung (Abb. 2.2). Mehr Abraum muss bewegt und verarbeitet werden, was wiederum einen höheren Einsatz von Energie und Rohstoffen erfordert. Erhöhte Weltmarktpreise oder der Wunsch nach Unabhängigkeit von anderen Ländern führen – wie am Beispiel des Erdöls beschrieben – zusätzlich zur Nutzung bis dato unlukrativer Vorkommen.

Bei einzelnen Metallen zeichnen sich kurz- und mittelfristig empfindliche Engpässe ab. Dies ist jedoch in erster Linie auf den rasanten Anstieg der Nachfrage zurückzuführen, dem die Fördermengen nicht in gleichem Tempo folgen können. In naher Zukunft sind daher weiterhin deutliche Steigerungen der Fördermengen zu erwarten. Zwar können bei einem Teil der Anwendungen einige der benötigten Metalle durch Nutzung anderer Rohstoffe substituiert werden, wodurch Knappheiten teilweise umgangen werden können, jedoch führt dies zwangsläufig zu einer Problemverschiebung und stellt keine Lösung der grundlegenden Problematik dar.

Die tatsächliche Verfügbarkeit von Rohstoffen hängt zu einem definierten Zeitpunkt nicht allein von vorhandenen Reserven, Ressourcen und der Nachfrage ab, sondern auch von der globalen Verteilung der Vorkommen sowie politischen Gegebenheiten. Ein Beispiel dafür sind die Seltenerdelemente. Die Konzentration der im Abbau befindlichen Lagerstätten auf nur wenige Staaten (siehe Abb. 2.3) beziehungsweise auf politisch instabile

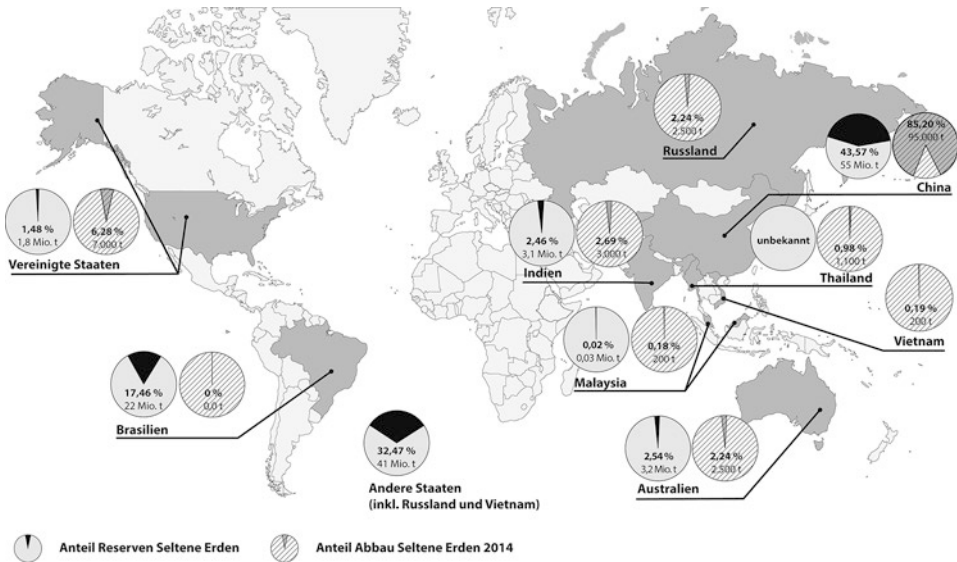


Abb. 2.3 Weltweite Verteilung der Reserven sowie des Abbaus von Seltenerdeelementen (2014). Eigene Darstellung nach Daten aus [10]

Regionen manifestiert sich als ein ernstzunehmendes Problem hinsichtlich der Versorgungssicherheit der Weltwirtschaft mit diesen heute stark nachgefragten Rohstoffen.

Die Seltenerdelemente stehen mit dem Klima- und Ressourcenschutz in besonderem Zusammenhang, da für die Nutzung erneuerbarer Energiequellen ein hoher Bedarf an diesen Elementen besteht. Die in Deutschland angestrebte Energiewende, als wichtige Säule einer effizienten, ressourcenschonenden Wirtschaftsweise, hängt demnach ebenfalls von der Verfügbarkeit spezieller Rohstoffe ab.

Dass die Problematik ebenso bei den sogenannten Massenmetallen auftritt, wird am Beispiel Zinn deutlich. Für Zinn hat die Deutsche Rohstoffagentur (DERA) ab 2018 bereits ein starkes Defizit am Weltmarkt prognostiziert. Dies ist auf den voraussichtlich starken Rückgang des Abbaus in Indonesien zurückzuführen, wo bis heute mehr als ein Drittel der weltweiten Fördermenge des Metalls gewonnen wird. Deutschland nimmt bei der Nachfrage nach Zinn weltweit den vierten Platz ein und nutzt dieses beispielsweise zur Herstellung von Lötzinn, Chemikalien oder Lagermetallen [11].

Viele Staaten sehen bezüglich der Rohstoffversorgung bereits deutlichen Handlungsbedarf, identifizieren die für ihre Wirtschaft besonders kritischen Rohstoffe und entwerfen entsprechende Strategien um den Auswirkungen einer zukünftigen Verknappung entgegenzuwirken [12–14]. Auch auf europäischer Ebene wurden entsprechende Anstrengungen unternommen [15]. Das voraussichtliche jährliche Wachstum der Nachfrage nach für die EU kritischen Rohstoffen bis zum Jahr 2020 verdeutlicht die Dringlichkeit (Abb. 2.4).

Auch die nachwachsenden Rohstoffe sind für die zukünftige Rohstoffsituation von Bedeutung. Die Substitution nichterneuerbarer Rohstoffe durch nachwachsende

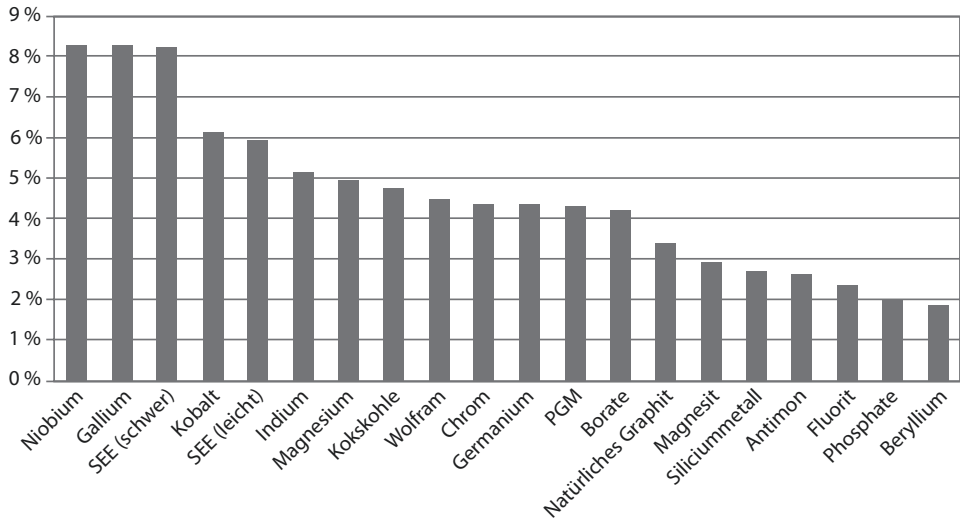


Abb. 2.4 Voraussichtliche durchschnittliche Wachstumsrate (Prozent pro Jahr) der weltweiten Nachfrage nach für die EU als kritisch eingestuften Rohstoffen bis 2020. Nach [15]

Rohstoffe kann in einigen Anwendungsgebieten eine sinnvolle Alternative darstellen. Die nachwachsenden Rohstoffe sind zwar in ihrer Gesamtheit weiterhin als potenzialträchtig zu betrachten, müssen aber im Kontext einer zunehmenden Flächenkonkurrenz mit Nahrungsmitteln gesehen werden. Auf den ersten Blick scheinen noch große Potenziale durch Ertragssteigerungen auf einem Großteil der Flächen vorhanden zu sein. Die Intensivierung des Anbaus führt jedoch zu Bodendegradation, Verlust an Biodiversität und nachhaltiger Beeinträchtigung der Umwelt durch Pestizide und Düngemittel. Auch falsche Bewirtschaftung, Flächenversiegelung und Klimawandel führen zu Anbauflächenverlusten. In Anbetracht der weiterhin exponentiell wachsenden Bevölkerung birgt diese Entwicklung bereits jetzt erhebliches soziales Konfliktpotenzial und führt immer wieder zu humanitären Katastrophen.

Somit ist es nicht verwunderlich, dass auf der Suche nach den letzten großen Rohstoffvorkommen, sei es in Form von fossilen Energieträgern, mineralischen Rohstoffen oder Anbauflächen, ein weltweiter Wettlauf eingesetzt hat – mit teilweise dramatischen Folgen. Tiefseebohrungen, „Fracking“, Abbau von Ölsanden, Abholzung und das sogenannte „Land Grabbing“ sind erste Auswirkungen dieser Entwicklung.

2.2.2 Wirtschaftlicher Aufstieg der Schwellenländer

China, Indien und weitere den Schwellenländern zugeordnete Staaten beteiligen sich mit einem rasanten Wirtschaftswachstum an der Ausbeutung der natürlichen Ressourcen.

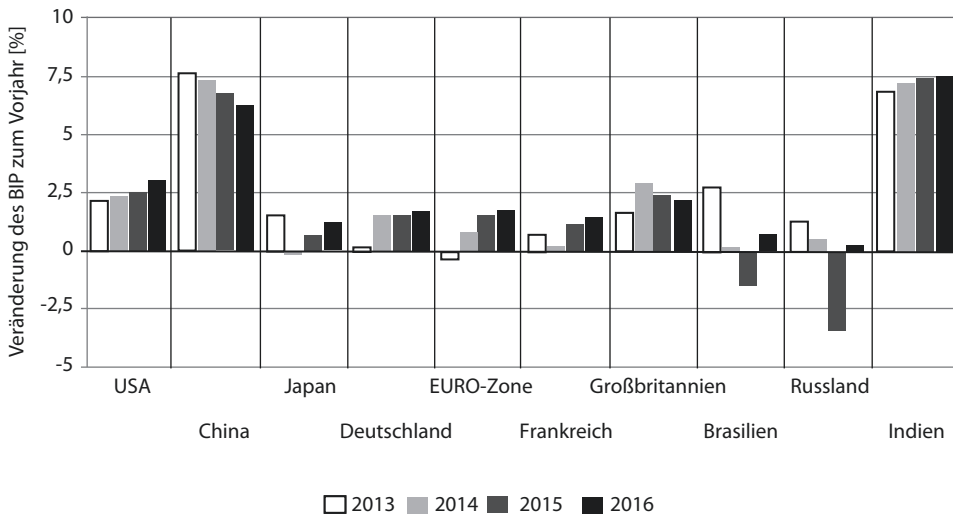


Abb. 2.5 Wachstum (gegenüber dem Vorjahr) des realen Bruttoinlandsprodukts (BIP) in den wichtigsten Industrie- und Schwellenländern in den Jahren 2013 und 2014 und Prognose für 2015 und 2016. Nach [16]

Sie folgen dabei nur dem Vorbild der Industrienationen, die bis vor wenigen Jahrzehnten für den weitaus größten Anteil des Ressourcenverbrauchs verantwortlich waren. Einige Schwellenländer wiesen über die vergangenen Jahre enorme Wachstumsraten des Bruttoinlandsproduktes auf (siehe Abb. 2.5).

Gemessen am Bruttosozialprodukt hat sich die Weltwirtschaftsleistung seit 1960 etwa alle zehn Jahre verdoppelt. Der Anteil der Schwellenländer an dieser Entwicklung wächst zunehmend. Die G7 Staaten werden langfristig aufgrund einer überalterten und schrumpfenden Bevölkerung ihre wirtschaftliche Bedeutung verlieren. Das wachsende Machtbewusstsein der neuen Großakteure der Weltwirtschaft und die steigende Rohstoffnachfrage ihrer Industrien können Länder ohne eigene Lagerstätten in eine zunehmend kritische Versorgungslage bringen.

Da die Qualität der Sozial- und Umweltstandards oftmals nicht in gleichem Maße ansteigt wie die Wirtschaftsleistung, wachsen auch die negativen Umweltauswirkungen in den Förderländern erheblich an.

2.2.3 Umweltauswirkungen der Rohstoffwirtschaft

Der Weg vom Rohstoff über das Endprodukt bis zum Abfall besteht aus vielen Arbeitsschritten mit einer Vielzahl von Umweltauswirkungen (Abb. 2.6).

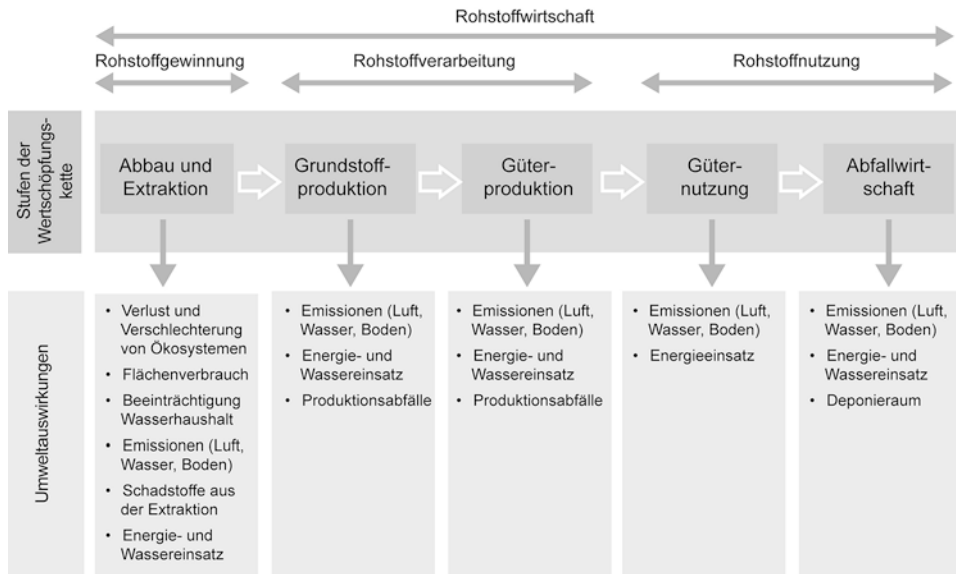


Abb. 2.6 Umweltauswirkungen entlang der Wertschöpfungskette. Nach [2]

Die Umweltauswirkungen lassen sich auf verschiedene Weise kategorisieren:

1. zeitlich: akut oder langfristig,
2. nach Beeinflussbarkeit: reversibel oder irreversibel,
3. örtlich: lokal, regional oder global,
4. nach Wirkobjekt: Wasser, Boden, Luft, Mensch, Natur, Klima, ...
5. nach Wirkungsweise: direkt oder indirekt.

Während zum Beispiel ein abgesenkter Grundwasserspiegel durch ein gezieltes Wassermanagement eventuell innerhalb einiger Jahre zum Normalzustand zurückkehren kann, verbleiben klimaschädliche Gase wie CO_2 und N_2O durchschnittlich über 100 Jahre in der Atmosphäre. Einige Auswirkungen sind reversibel, andere, wie das Aussterben einer Tier- oder Pflanzenart, sind hingegen unumkehrbar. Direkte Auswirkungen der Rohstoffgewinnung sind z. B. der Verlust von Ökosystemen und Lebensraum vor Ort durch die Flächeninanspruchnahme, indirekt können durch Veränderungen des Grundwasserspiegels und verunreinigte Abwässer auch weiter entfernte Gegenden stark beeinträchtigt werden.

Die Gewinnung und Aufbereitung von Seltenerdelementen ist beispielhaft für die vielfältigen Umweltauswirkungen der Primärrohstoffgewinnung. Die Herstellung marktfähiger Konzentrate einzelner Seltenerdelemente ist mit einer aufwendigen Aufbereitung verbunden. Neben dem hohen Energiebedarf sind die anfallenden Aufbereitungsrückstände oftmals mit Arsen, Blei und weiteren Schwermetallen sowie radioaktiven Nukliden kontaminiert. Dadurch werden neben den Arbeitern vor Ort auch die lokale Bevölkerung

und die angrenzenden Ökosysteme gefährdet [2]. Die Auswirkungen sind immens, was nicht zuletzt auf die teils stark vernachlässigten Gesundheits- und Umweltschutzstandards zurückzuführen ist, sofern solche in den Abbaustaaten überhaupt vorhanden sind.

Um die Umweltauswirkungen der Rohstoffnutzung möglichst gering zu halten, ist eine mögliche Strategie, das Beziehen von Rohstoffen aus besonders schädlichen Unternehmungen einzustellen. Zertifizierungssysteme, die dem Rohstoffproduzenten die Einhaltung definierter Anforderungen bescheinigen, unterstützen die Standardsetzung beim weltweiten Rohstoffabbau. Beispiele für erfolgreiche nicht-staatliche Zertifizierungssysteme sind der Forest Stewardship Council (FSC) für Holz aus nachhaltiger Nutzung und der Marine Stewardship Council (MSC) für Fisch aus nachhaltiger Fischerei.

Im Bereich der Metalle und Mineralien existieren bisher nur erste Initiativen, vor allem für Schmuckrohstoffe wie Gold und Diamanten. Die USA beispielsweise haben im Juli 2010 den Dodd-Frank Act verabschiedet, der den an der Wall Street notierten Öl-, Gas- und Bergbauunternehmen vorschreibt, ihre Einkommen und Steuerzahlungen offen zu legen. Zusätzlich müssen sie nachweisen, dass ihre Produkte nicht aus den Konfliktregionen in der und um die Demokratische Republik Kongo stammen. Die „Äquator-Prinzipien“ dagegen sind eine freiwillige Verpflichtung von Kreditinstituten, bei der Finanzierung von Projekten bestimmte Umwelt- und Sozialstandards einzuhalten. Auch Rohstoffpartnerschaften und internationale Rohstoffabkommen bieten die Möglichkeit, auf Umwelt- und Arbeitsschutz ebenso wie auf eine gerechtere Bezahlung hinzuwirken [2].

Auch nach einer Optimierung der Abbaumethoden und der Versorgungspfade werden mit der Verwendung von Primärrohstoffen stets negative Umweltauswirkungen verbunden bleiben. Als langfristige Folge der Nutzung ist bereits heute ein massiver und schnell fortschreitender Verlust an Biodiversität zu verzeichnen. Dieser gehört zu den durch den Menschen verursachten weltweiten Umweltproblemen, welche die Grenzen der globalen Tragfähigkeit bereits überschritten haben [17].

Die Gewinnung und Weiterverarbeitung von Rohstoffen sind sehr energieaufwendige Prozesse. Allein der Bergbau ist für ungefähr 7 Prozent des weltweiten Energieverbrauchs verantwortlich [18]. Für die Bereitstellung dieser Energie werden meist fossile Energieträger genutzt, die Bedeutung für den Klimawandel ist also erheblich.

Das Bewusstsein für die Auswirkungen des Rohstoffabbaus ist aufgrund einer fehlenden zentralen Dokumentation (von Menge, Herkunft, Gewinnungsverfahren usw.) wenig ausgeprägt. Gerade die Umweltauswirkungen in Entwicklungs- und Schwellenländern sind bisher nicht systematisch quantifizierbar.

2.3 Kreislaufwirtschaft

Es existieren verschiedene Ansätze, die eine dauerhafte Rohstoffverfügbarkeit sicherstellen können. Zum einen sollen durch die Steigerung der Materialeffizienz in der Wirtschaft – analog zur Energieeffizienz – die für das Generieren eines bestimmten Nutzens aufzubringenden Rohstoffmengen reduziert werden. Diese Maßnahmen sind grundsätzlich

anzustreben, können die Problematik jedoch nicht abschließend beseitigen – auch bei verringertem Einsatz neigen sich die natürlichen Lagerstätten auf Dauer dem Ende zu. Der Prozess wird durch eine steigende Materialeffizienz zwar verzögert, spürbare Zunahmen der Effizienz sind jedoch nur begrenzt möglich. Zudem werden diese Einsparungen oft durch einen vermehrten Konsum (Rebound-Effekt) mehr als ausgeglichen.

Noch vor dem Prozessschritt der Produktion liegt die Produktplanung – hier liegen erhebliche Potenziale für eine intensivisierte Kreislaufwirtschaft. Die Auswahl von Materialien, der Produktaufbau und die Auswahl der Verbindungen bestimmen maßgeblich die Lebensdauer, die Reparaturfähigkeit und die Verwertbarkeit der Produkte. Deren Entwicklung muss künftig den Kriterien „niedriger Rohstoff- und Energieverbrauch“, „hohe Lebensdauer“ und „Rückführbarkeit“ ebenso genügen wie den bisher den Markterfolg bestimmenden Anforderungen „Zweckerfüllung“, „Optik“ und „Preis“.

Unabdingbar für den Kreislauf ist ein intensiver Wissensaustausch zwischen den verschiedenen Akteuren: Grundstoffhersteller benötigen Mindestqualitäten der Sekundärrohstoffe. Reparaturbetriebe kennen die Schwachstellen von Produkten und den Bedarf an Austauschkomponenten. Abfallaufbereiter verfügen über das Wissen, welche Komponenten gut demontierbar sein sollten, welche Stoffe sich im Aufbereitungsprozess behindern, was zerstörungsfrei entnehmbar angeordnet sein muss. Das eigentliche Ziel dieser Anstrengungen ist es, dem Nutzer zu ermöglichen, eine bewusste Kaufentscheidung auch anhand solcher kreislaurelevanter Informationen treffen zu können. Der Anteil an Sekundärrohstoffen und Mehrwegkomponenten, Soll-Lebensdauer, Recyclingfähigkeit und ähnliches müssen dafür transparent am Produkt erkennbar sein.

Auf diesem Weg können Materialien den Zyklus aus Produktion, Nutzung und Aufbereitung mehrfach durchlaufen, bevor es durch dissipative Verluste oder thermodynamische Einschränkungen bei der Wiedergewinnung zu einem Ausscheiden aus dem Verwendungszyklus kommt.

Je nach Material können mit zunehmender Anzahl von Verwendungszyklen funktionelle Verluste auftreten, infolge dessen die recycelten Materialien ein eingeschränktes Anwendungsspektrum aufweisen. Um diese Materialien dennoch möglichst lange im Verwendungskreislauf zu halten, ist die sogenannte Kaskadennutzung anzustreben. Dabei werden primär gewonnene Rohstoffe zunächst derjenigen Nutzung zugeführt, welche die höchsten Ansprüche an deren Reinheit stellt. Mit abnehmender Qualität werden diese der nächsten Stufe innerhalb der Nutzungshierarchie zugeführt. Ein solches System ist jedoch nur durch getrennte Recyclingwege aufrecht zu erhalten, bei denen die Materialreinheit berücksichtigt wird.

Die im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) formulierte Abfallhierarchie sieht analog zu der Idee einer Kaskadennutzung eine Optimierung des Rohstoffeinsatzes durch möglichst hochwertige Verwertung vor. Demnach hat die Abfallvermeidung zunächst die höchste Priorität, gefolgt von der Vorbereitung zur Wiederverwendung. Bei letzterer werden Erzeugnisse beziehungsweise deren Bestandteile so aufbereitet, dass sie für den gleichen Zweck erneut eingesetzt werden können. Sollte dies nicht möglich sein, ist das stoffliche Recycling zu priorisieren, gefolgt von der energetischen Verwertung. Ganz unten in der Abfallhierarchie steht die Beseitigung durch Deponierung.

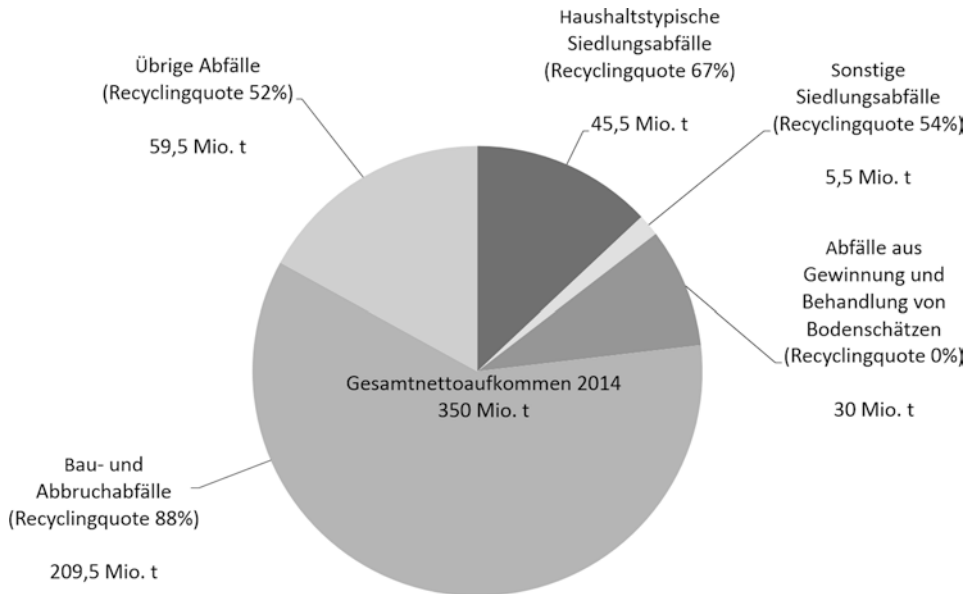


Abb. 2.7 Abfallaufkommen in Deutschland 2014 und Verwertungsquoten. Nach Daten aus [3]

Die Kreislaufwirtschaft ist das gegenteilige Modell zu der heute immer noch global vorherrschenden Linearwirtschaft, in der hochwertige Materialien nach einmaliger Nutzung in Abfallströme gelangen und thermisch behandelt beziehungsweise deponiert werden.

2.3.1 Recycling in Deutschland

Auf dem Gebiet des Recyclings (stoffliche Verwertung) sind in Deutschland bereits große Erfolge zu verzeichnen. Deutschland erreicht für Siedlungsabfälle europaweit eine der höchsten Quoten an „dem stofflichen Recycling zugeführtem Abfall“ (Abb. 2.7). Zu bedenken ist dabei allerdings, dass dies den Anlageninput, nicht jedoch die tatsächlich in den Kreislauf zurückgeführten Mengen beschreibt. Bei der Aufbereitung müssen Fehlwürfe, Verunreinigungen und nicht verwertbare Anteile ausgeschleust werden.

Während in der Vergangenheit der Fokus der Abfallwirtschaft im Bereich der Siedlungsabfälle hauptsächlich auf der Entsorgungssicherheit sowie der Reduzierung des Restmüllaufkommens durch energetische Verwertung lag, sind heute Schritte der Transformation – weg von der Linearwirtschaft, hin zu einer Kreislaufwirtschaft – zu verzeichnen [19]. Insbesondere das endgültige Verbot der Deponierung von Abfällen ohne Vorbehandlung, das seit 2005 vollständig umgesetzt wird, hat die Abfallströme deutlich in Richtung der energetischen und stofflichen Verwertung verschoben (Abb. 2.8).

Zu den Siedlungsabfällen zählen Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Sperrmüll, biogene Abfälle und getrennt gesammelte Abfallarten (Glas, Papier, gemischte Verpackungen und Elektrogeräte) sowie sonstige Siedlungsabfälle.

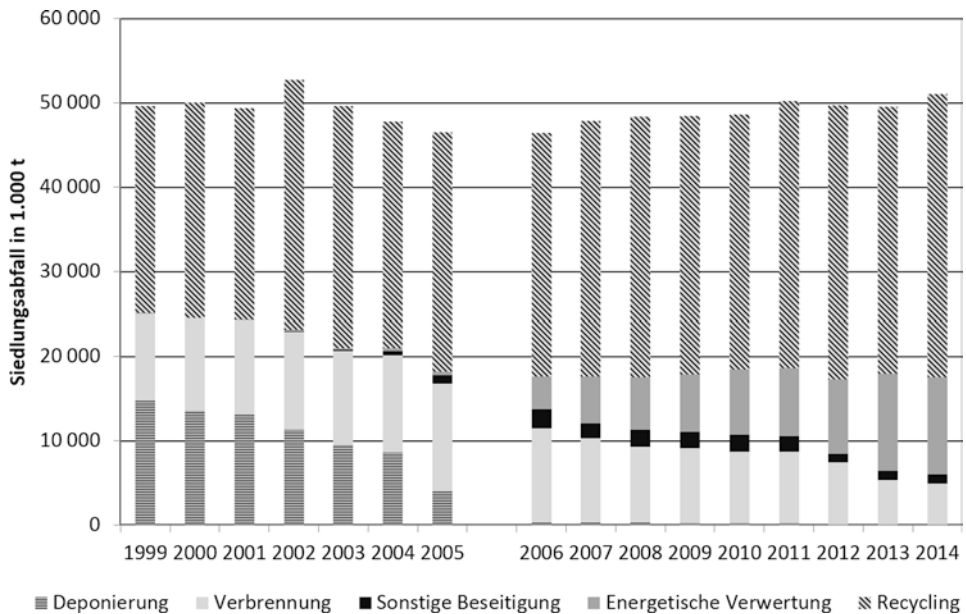


Abb. 2.8 Entsorgungswege des Siedlungsabfalls in Deutschland 1999–2014 (Nettoaufkommen).
Nach Daten aus [3]

Sehr hohe Recyclingquoten werden für Glas und Altpapier erreicht. Im Jahr 2011 wurden beispielsweise vier Millionen Tonnen Behälterglas in Deutschland produziert. Sekundärglas wurde dabei zu einem Anteil von 63 Prozent eingesetzt. Je nach Farbe des hergestellten Glases kann dieser Anteil sogar bis zu 90 Prozent betragen [20]. Der Einsatz von Altglas ist nicht nur aufgrund der eingesparten Primärmaterialien (unter anderem Soda, Quarzsand, Kalk) sehr vorteilhaft. Auch im Hinblick auf den notwendigen Energieeinsatz in der Glasschmelze ergeben sich große Vorteile. So werden pro zehn Prozentpunkten eingesetzten Altglases etwa drei Prozent weniger Energie benötigt [21].

Beim Altpapier ist der durchschnittlich verwendete Anteil an Sekundärrohstoff sogar noch höher als im Falle des Altglases. Hier werden etwa 71 Prozent Sekundärmaterial bei der Produktion von Papiererzeugnissen eingesetzt [20]. Dies liegt in der vergleichsweise einfachen Aufbereitung dieser Abfallfraktion begründet. Gegenüber der Primärproduktion erzeugt die sekundäre Bereitstellung aus Altpapier weniger als die Hälfte der CO_2 -Emissionen und schont nebenbei außerdem CO_2 -bindende Waldflächen [22]. Die für die Papierherstellung benötigten Faserstoffe erfahren jedoch im Zuge der Verwendung und Aufbereitung stets eine Verkürzung. Aus diesem Grund ist die Anzahl der Verwendungszyklen begrenzt. Im Durchschnitt kann eine Faser nur etwa sieben Mal recycelt werden, bevor sie aus der Verwendung ausscheidet. Beim Altglas ist diese Einschränkung nicht gegeben, es kann – bis auf einige Spezialanwendungen – stets erneut recycelt werden.

Die Mischfraktion der Verpackungsabfälle (für die Materialgruppen Glas, Kunststoff, Papier, Aluminium, Weißblech, Verbunde, sonstiger Stahl, Holz und sonstige Packstoffe) wurde 2014 zu 71 Prozent stofflich verwertet [23].

Metalle sind prinzipiell endlos recyclingfähig und können somit theoretisch dauerhaft im Verwendungskreislauf verweilen. Da die Bereitstellung von Metallen aus primären Quellen einen enormen Energieaufwand erfordert, ist deren Recycling zudem aus ökologischer und ökonomischer Sicht besonders sinnvoll [2]. Gerade die Massenmetalle werden bereits zu relativ hohen Anteilen recycelt. Dies liegt auch in der großen Verfügbarkeit entsprechender Abfälle begründet sowie im Vorhandensein geeigneter Aufbereitungsanlagen. Einige Edelmetalle werden ebenfalls aufgrund ihres hohen Wertes – trotz niedriger Massenanteile in End-of-Life-Produkten – zu hohen Anteilen zurückgewonnen. Bei vielen Technologiemetallen liegen die Recyclingquoten hingegen bei nahezu Null (Abb. 2.9), da diese oftmals in sehr niedrigen Konzentrationen verbaut sind und deren Rohstoffpreise keine lukrative Rückgewinnung zulassen. Dies ist besonders kritisch, da die Primärgewinnung dieser Technologiemetalle meist einen sehr hohen Energieaufwand erfordert [24].

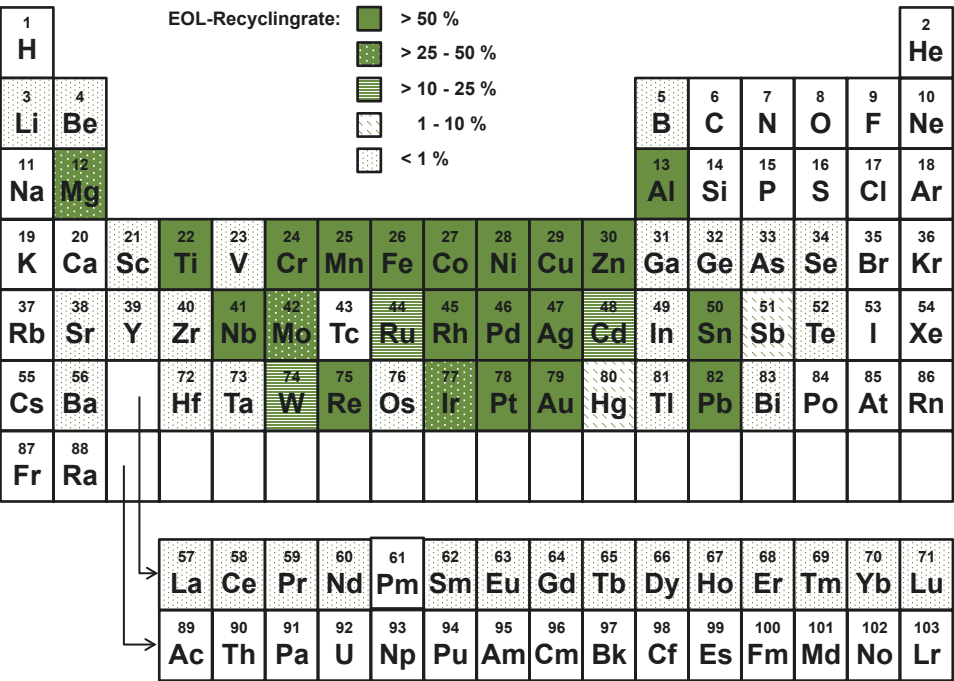


Abb. 2.9 End-of-Life-Recyclingraten von Metallen aus dem Post-Consumer-Bereich. Die Recyclingraten beziehen sich auf das funktionelle Recycling, bei dem jene physikalischen oder chemischen Eigenschaften der Metalle wiederhergestellt werden, die diese auch aus primären Quellen aufweisen. Nach [25]

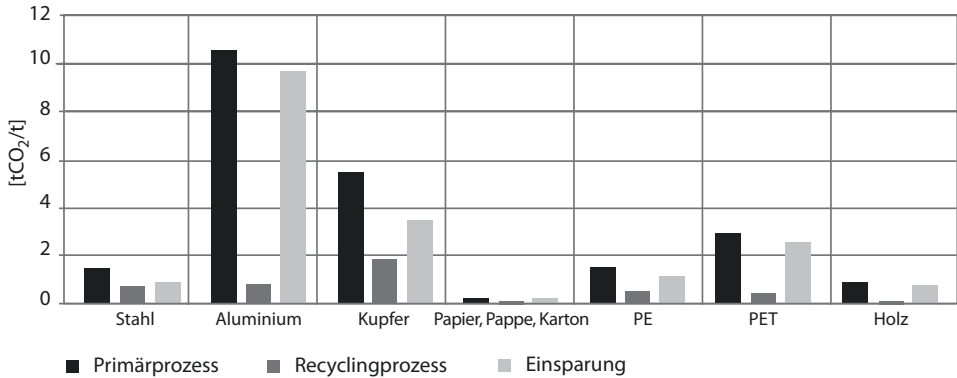


Abb. 2.10 CO₂-Emissionen von Primär- und Sekundärmaterialien im Vergleich. Angegeben ist die emittierte CO₂-Menge in Tonnen pro Tonne hergestellten Materials. Nach [22]

Je höher der Energiebedarf eines Metalls in der Primärproduktion ist, desto mehr kann entsprechend durch dessen Recycling eingespart werden. Beim Recycling von Aluminium sind im Vergleich sehr hohe Energieeinsparungen zu erzielen, da die Elektrolyse den energieintensivsten Teil in der Bereitstellungskette darstellt und dieser Schritt beim Recycling umgangen wird. Die Energiebereitstellung erfolgt zum größten Teil aus fossilen Energiequellen, was sich dementsprechend auch in den durch Recycling eingesparten Kohlendioxidemissionen widerspiegelt (Abb. 2.10). Die weitaus größten Einsparpotenziale sind jedoch bei den Edelmetallen zu verzeichnen. Pro geförderter Tonne Gold aus primären Lagerstätten werden beispielsweise etwa 17.000 Tonnen CO₂ freigesetzt. Dies liegt in den extrem geringen Goldgehalten der Erzlagerstätten von etwa fünf Gramm pro Tonne begründet.

Unter Klimaschutzaspekten von hoher Bedeutung sind die biogenen Abfälle: Hausmüll enthält Küchen- und Gartenabfälle, die von Mikroorganismen biologisch abgebaut werden. Dabei entsteht jedoch unter bestimmten Bedingungen Methan, das eine sehr hohe Klimawirkung hat. Ausgedrückt in CO₂-Äquivalenten wurden von der Abfallwirtschaft 1990 noch knapp 40 Mio. t CO₂-Äqu. (von insgesamt 1250 Mio. t) verursacht. Durch das Ablagerungsverbot für unvorbehandelte Abfälle konnte dieser Wert bis 2015 auf 10 Mio. t/a (von insgesamt 908 Mio. t) gesenkt werden. Bei getrennter Erfassung und Behandlung von biogenen Abfällen kann Methan gezielt erfasst und energetisch genutzt werden. In älteren Deponien klingt die Bildung von Deponiegas langsam ab, bis dahin müssen Deponiebetreiber dieses Gas möglichst effektiv auffangen und energetisch nutzen.

Entscheidend für eine Kreislaufwirtschaft ist jedoch nicht nur, wie viele Materialien in einen Aufbereitungsprozess eingespeist werden, sondern einerseits, welcher Anteil anschließend für den erneuten Einsatz zur Verfügung steht, und andererseits, welche Menge an Primärmaterial dadurch substituiert werden kann. Das Verhältnis von jährlich in Deutschland verbrauchten Rohstoffen und in den Kreislauf zurückgeführten Mengen ergibt eine stoffliche Substitutionsrate von etwa 4 Prozent [26]. Dies ist auch dadurch

bedingt, dass ein großer Anteil der Rohstoffe bis auf weiteres im Bauwerken und anderen langlebigen Gütern festgelegt wird [27], allerdings ohne dass diese Mengen für eine spätere Nutzung dokumentiert werden.

2.3.2 Herausforderungen und Optionen für die Abfallwirtschaft

Die Bereitstellung von Rohstoffen durch Recycling erfordert in der Regel einen geringeren Energie- und Rohstoffaufwand als die entsprechende Bereitstellung aus primären Quellen und verursacht daher geringere Umweltauswirkungen [28]. Den aus Abfallströmen verfügbaren Rohstoffpotenzialen sind jedoch auch Grenzen gesetzt. Bei jedem Durchlaufen des Verwendungszyklus treten (teils unvermeidbare) Verluste an den verwendeten Materialien auf, welche häufig auf dissipative Mechanismen zurückzuführen sind [29]. Zudem hängt die Gesamtmenge der verfügbaren Sekundärmaterialien direkt von der Menge anfallender End-of-Life-Produkte ab. Solange Bevölkerungszahlen und Konsumniveau ansteigen, könnte daher selbst bei theoretisch einhundert Prozent Materialrückgewinnung durch Recycling nicht die gesamte Rohstoffnachfrage durch die Abfallwirtschaft gedeckt werden. Recycling kann dennoch in bedeutendem Maße zu einer Verlängerung der Reichweiten der Primärrohstoffe beitragen. Aus diesem Grund, wie auch vor dem Hintergrund des hohen Vermeidungspotenzials an Treibhausgasen und weiterer Umweltbeeinträchtigungen, ist zukünftig ein größtmöglicher Anteil stofflichen Recyclings an der Abfallentsorgung anzustreben.

Um mehr der im Abfall enthaltenen Rohstoffe in den Kreislauf zurückzuführen, müssen unterschiedliche Hürden genommen werden. Eine Weiterentwicklung der Vorkonditionierungsmethoden kann Verluste in der Separation verschiedener Materialien aus einem gemischten Stoffstrom verringern. Der wirtschaftliche Aufwand für die Aufbereitung, die Qualität der Sekundärrohstoffe, die Preise für Primärmaterial und die Nachfrage stehen in einem ständigen Wechselspiel. Der Aufbereitungsaufwand lässt sich durch eine getrennte Erfassung an der Anfallstelle deutlich verringern. Auf diese Weise ist es möglich, hohe Wertstoffkonzentrationen zu erzeugen, die in Folge die weitere Verarbeitung erleichtern. Bei Betrachtung des Rohstoffs Gold wird dies besonders deutlich. Während in den natürlichen Lagerstätten der Goldgehalt bei etwa fünf Gramm pro Tonne liegt, sind in separierten Fraktionen aus Handys oder Leiterplatten Goldgehalte von 200–350 g/t zu erzielen [30]. In diesem Fall, wie auch bei anderen Edelmetallen, begünstigen zudem die hohen Marktpreise die Rückgewinnung.

Die getrennte Sammlung führt prinzipiell zu einer leichteren Aufbereitung und zu höherwertigen Sekundärrohstoffen. Den größten Einfluss hat dabei das menschliche Nutzungsverhalten dieser Systeme. Werden Produkte in die falschen Sammelsysteme überführt, bedeutet dies einen Verlust an Material, wie etwa bei der Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten über die Hausmülltonne. Fehlwürfe führen auch zu einer Verschlechterung der Recyclatqualität. Große Mengen werthaltiger Abfälle werden dem hochwertigen Recycling ebenfalls durch (oftmals illegale) Exporte entzogen. Prominente Beispiele sind Elektro- und Elektronikaltgeräte sowie Alt-Kfz. Neben dem Verlust der Materialien kommt es durch die unsachgemäße Behandlung in vielen Entwicklungsländern,

bei der meist keinerlei Auflagen eingehalten werden, zu starken Gesundheits- und Umweltbeeinträchtigungen.

Die Nutzung von Pfandsystemen ist ein wirksames Mittel zur Stoffstromlenkung, welches sowohl die Rückgewinnungsquoten von EoL-Produkten als auch die Reinheit der Stoffströme erhöhen kann. Pfandsysteme existieren bereits in vielen Ländern und für eine Vielzahl von Produkten. Am prominentesten sind Pfandsysteme für Getränkeverpackungen. Denkbar sind derartige Systeme aber auch für besonders wert- oder schadstoffhaltige Produkte, die – wie z. B. Handys und andere Elektrokleingeräte – oft in die falschen Entsorgungswege geraten.

Um aber das Prinzip einer Kreislaufwirtschaft deutlich zu stärken, sind neben den technischen und organisatorischen Optimierungen in der Abfallwirtschaft Vernetzungen mit den anderen Akteuren des Kreislaufs zwingend. So wie der natürliche Kreislauf in der Natur ein enges Zusammenspiel zwischen Produzenten, Konsumenten und Destruenten aufgebaut hat, kann zwischen Herstellung (insbesondere in der Produktplanung), Nutzung (Kaufentscheidung auf Basis aussagekräftiger Informationen) und Abfallwirtschaft (Qualität und Quantität auf Herstellung ausrichten) ein ständiger Lernprozess stattfinden.

Nur die Annahme aller erwähnten Herausforderungen führt im Zusammenspiel zu einer maximal ressourceneffizienten Wirtschaftsweise, bei der das menschliche Handeln geringstmögliche Auswirkungen auf die lokale und globale Umwelt aufweist.

Fragen zu Kap. 2

1. Welcher Mehrwert würde sich aus einer verstärkten Versorgung mit Sekundärrohstoffen ergeben?
2. Wie ist der Unterschied zwischen den Reserven und den Ressourcen eines Rohstoffes definiert?
3. Was sind die grundlegenden Treiber der weltweit wachsenden Rohstoffnachfrage?
4. Welche Probleme ergeben sich durch einen verstärkten Rohstoffabbau?
5. Aufgrund welcher Kriterien kann beurteilt werden, ob eine Substitution nicht regenerativer Rohstoffe durch nachwachsende Rohstoffe sinnvoll ist?
6. Ist bei einer Verdoppelung der Weltwirtschaftsleistung ebenfalls von einer Verdoppelung der Umweltauswirkungen auszugehen? Welche Faktoren beeinflussen diese?
7. Was ist unter direkten und indirekten Umweltauswirkungen zu verstehen?
8. Kann die Rohstoffnachfrage eines Landes vollständig durch recycelte Rohstoffe gedeckt werden? Begründen Sie.
9. Wo liegen die Unterschiede im Recycling von Massenmetallen und Technologiemetallen?

Literaturverzeichnis

- [1] Statistisches Bundesamt (DESTATIS) (2016) Bruttoinlandsprodukt 2015 für Deutschland. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 51 S

- [2] Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (2012) Umweltgutachten 2012 – Verantwortung in einer begrenzten Welt. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 422 S
- [3] Statistisches Bundesamt (DESTATIS) (2016) Umwelt – Abfallbilanz 2014. Statistisches Bundesamt (DESTATIS), Wiesbaden, 63 S
- [4] Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V. (WEG) (2008) Reserven und Ressourcen – Potenziale für die zukünftige Erdgas- und Erdölversorgung. Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e. V. (WEG), Hannover, 6 S
- [5] Behrendt S, Scharp M, Kahlenborn W, Feil M, Dereje C, et al. (2007) Seltene Metalle – Maßnahmen und Konzepte zur Lösung des Problems konfliktsscharfender Rohstoffausbeutung am Beispiel Coltan. Umweltbundesamt, Dessau, 68 S
- [6] Andrulleit H, Bahr A, Babies H G, Franke D, Meßner J, et al. (2013) Energiestudie 2013 – Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, 112 S
- [7] 2016 U.S. Geological Survey (2016) Copper. In: Mineral Commodity Summaries 2016. U.S. Geological Survey, 202 S, URL: <http://dx.doi.org/10.3133/70140094>. Zugriffen: 15. Januar 2017
- [8] 2016 U.S. Geological Survey (2016) Aluminum. In: Mineral Commodity Summaries 2016. U.S. Geological Survey, 202 S, URL: <http://dx.doi.org/10.3133/70140094>. Zugriffen: 15. Januar 2017
- [9] Ax C, Marschütz B, Hinterberger F (2014) Die Aussichten von hier aus. Fact. – Mag. für Nachhalt. Wirtschaften (02), S 24–28
- [10] U.S. Geological Survey (USGS) (2015) Mineral commodity summaries 2015. Reston, VA, 196 S
- [11] Elsner H, Schmidt M, Schütte P, Näher U (2014) DERA Rohstoffinformationen: Zinn – Angebot und Nachfrage bis 2020. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin
- [12] Erdmann L, Behrendt S, Feil M (2011) Kritische Rohstoffe für Deutschland – Identifikation aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgungslage sich mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte, Abschlussbericht. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT), adelphi, Berlin, 134 S
- [13] U.S. Department of Energy (2011) Critical Materials Strategy. U.S. Department of Energy, Washington D.C., 191 S
- [14] Kozlik M, Raith J G, Janisch A, Moser P, Treimer R, et al. (2012) Kritische Rohstoffe für die Hochtechnologieanwendung in Österreich. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit), Wien, 350 S
- [15] European Commission (2014) Report on Critical Raw Materials for the EU – Report of the Ad hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials. European Commission, Brüssel, 41 S
- [16] International Monetary Fund (IMF) (2015) World Economic Outlook Update, An Update of the Key WEO Projections. Washington D.C., 4 S
- [17] Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson A, Chapin F S, et al. (2009) Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. Ecol. Soc. 14 ((2):32), http://pdxscholar.library.pdx.edu/iss_pub/64/ Zugriffen: 16. November 2015
- [18] MacLean H L, Duchin F, Hagelüken C, Halada K, Kesler S E, et al. (2009) Stocks, Flows, and Prospects of Mineral Resources. In: Linkages of Sustainability. Graedel T E, van der Voet E (Hrsg.), The MIT Press, Cambridge, MA, S 199–218
- [19] Wilts H, Lucas R, von Gries N, Zirngiebl M (2014) Recycling in Deutschland – Status quo, Potenziale, Hemmnisse und Lösungsansätze. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Wuppertal, 97 S
- [20] Die Dualen Systeme (2014) Duale Systeme – Recyclingquoten und positive Effekte. <http://www.recycling-fuer-deutschland.de/web/recycling/dl=effekte> Zugriffen: 4. November 2015

- [21] Bundesverband Glasindustrie e.V. (2015) Umwelt & Energie – Aus Alt wird Neu. <http://www.byglas.de/umwelt-energie/glasrecycling/> Zugegriffen: 4. November 2015
- [22] Fraunhofer UMSICHT, INTERSEROH (2008) Recycling für den Klimaschutz – Ergebnisse der Studie von Fraunhofer UMSICHT und INTERSEROH zur CO₂-Einsparung durch den Einsatz von recycelten Rohstoffen. Interseroh SE, Köln, 16 S
- [23] Schüler K, GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH (Mainz) (2016) Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2014. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 165 S
- [24] Hagelüken C (2009) Urban Mining ist wichtiger Beitrag zum Klimaschutz. Dow Jones Trade-News Emissions. (5). S 14–16
- [25] Reuter M A, Hudson C, Schaik A V, Heiskanen K, Hagelüken C (2013) Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. UNEP Division of Technology, Industry and Economics, Paris, 316 S
- [26] Statistisches Bundesamt (DESTATIS) (2010) Rohstoffeffizienz: Wirtschaft entlasten, Umwelt schonen – Ergebnisse der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen 2010, Begleitmaterial zur Pressekonferenz am 17. November 2010 in Berlin. Statistisches Bundesamt (DESTATIS), Wiesbaden, 21 S
- [27] Schiller G, Ortlepp R, Krauß N, Steger S, Schütz H, et al. (2015) Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, 261 S
- [28] Grimes S, Donaldson J, Cebrian Gomez G (2008) Report on the Environmental Benefits of Recycling. Bureau of International Recycling (BIR), Brüssel, 49 S
- [29] Seelig J H, Stein T, Zeller T, Faulstich M (2015) Möglichkeiten und Grenzen des Recycling. In: Recycling und Rohstoffe Band 8. Thomé-Kozmiensky K J, Goldmann D (Hrsg), TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, S 55–70
- [30] Hagelüken C (2012) Recycling von Handys & Computern – Kreislaufwirtschaft der Edel- & Sondermetalle. 12. Münchner Wissenschaftstage, S 34

<http://www.springer.com/978-3-8348-1837-9>

Einführung in die Kreislaufwirtschaft

Planung -- Recht -- Verfahren

Kranert, M. (Hrsg.)

2017, XXII, 832 S. 354 Abb., 24 Abb. in Farbe.,

Hardcover

ISBN: 978-3-8348-1837-9