



**POSITION DER RESSOURCENKOMMISSION
AM UMWELTBUNDESAMT (KRU) // JUNI 2023 //**

Chancen und Grenzen des Recyclings im Kontext der Circular Economy

Rahmenbedingungen, Anforderungen und Handlungsempfehlungen

Impressum

Herausgeber:

Ressourcenkommission am Umweltbundesamt

Die Ressourcenkommission ist ein Gremium unabhängiger Expertinnen und Experten. Sie berät das Umweltbundesamt mit konkreten Vorschlägen zu einer nachhaltigen Ressourcenpolitik.

Co-Vorsitzenden:

Prof. Dr. Martin Faulstich (Technische Universität Dortmund) und Prof. Dr. Christa Liedtke (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie)

Autorinnen und Autoren:

Dr.-Ing. Christian Hagelüken (Umicore AG & Co. KG), Prof. Dr. Mario Schmidt (Hochschule Pforzheim), Prof. Dr. Liselotte Schebek (Technische Universität Darmstadt), Prof. Dr. Christa Liedtke (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie)

weitere Autorinnen und Autoren:

Dr. Benjamin Bongardt (Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin), Klaus Dosch (Faktor X Agentur), Prof. Dr. Martin Faulstich (Technische Universität Dortmund), Prof. Dr.-Ing. Sabine Flamme (FH Münster), Prof. Mareike Gast (Burg Giebichenstein Kunsthochschule Halle), Dipl.-Ing. Sascha Hermann (VDI Technologiezentrum GmbH), Prof. Dr. Melanie Jaeger-Erben (Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg), Prof. Dr. Bruno Oberle (International Union for Conservation of Nature, IUCN), Prof. Dr. Armin Reller (Emeritus, Universität Augsburg), Prof. Barbara Schmidt (Weißensee Kunsthochschule Berlin), Johanna Sydow (Heinrich-Böll Stiftung), Dr. Julia R. Tschesche (Effizienz-Agentur NRW), Dr. Hildegard Wilken (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR), Herwart Wilms (REMONDIS SE & Co. KG)

Dies ist ein Positionspapier der UBA-Ressourcenkommission. Die darin enthaltenen Positionen stimmen nicht zwangsläufig mit denen des Umweltbundesamtes überein.

Redaktion:

Dr. Philip Nuss

Geschäftsstelle:

Umweltbundesamt
Fachgebiet I 1.1
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Ressourcenkommission@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

 /umweltbundesamt

 /umweltbundesamt

Satz und Layout:

Atelier Hauer+Dörfler GmbH

Publikationen als pdf:

www.umweltbundesamt.de/publikationen

Bildquellen:

shutterstock.com

S. 23: Parilov/shutterstock.com

Stand: Mai 2023

Umwelt 
Bundesamt

**POSITION DER RESSOURCENKOMMISSION
AM UMWELTBUNDESAMT (KRU) // JUNI 2023 //**

Chancen und Grenzen des Recyclings im Kontext der Circular Economy

**Rahmenbedingungen, Anforderungen
und Handlungsempfehlungen**

Abbildungen

Abbildung 1

**Konzept einer Zielhierarchie in der Circular Economy (CE) mit Leitzielen
sowie einer Auswahl von Handlungsfeldern und Indikatoren. 12**

Abbildung 2

Vereinfachtes Schema eines Produktsystems mit Recycling 17

Abbildung 3

Prinzipielle Recyclingkette von (komplexen) Produkten inkl. Beispiel für Gold aus WEEE..... 20

Abbildung 4

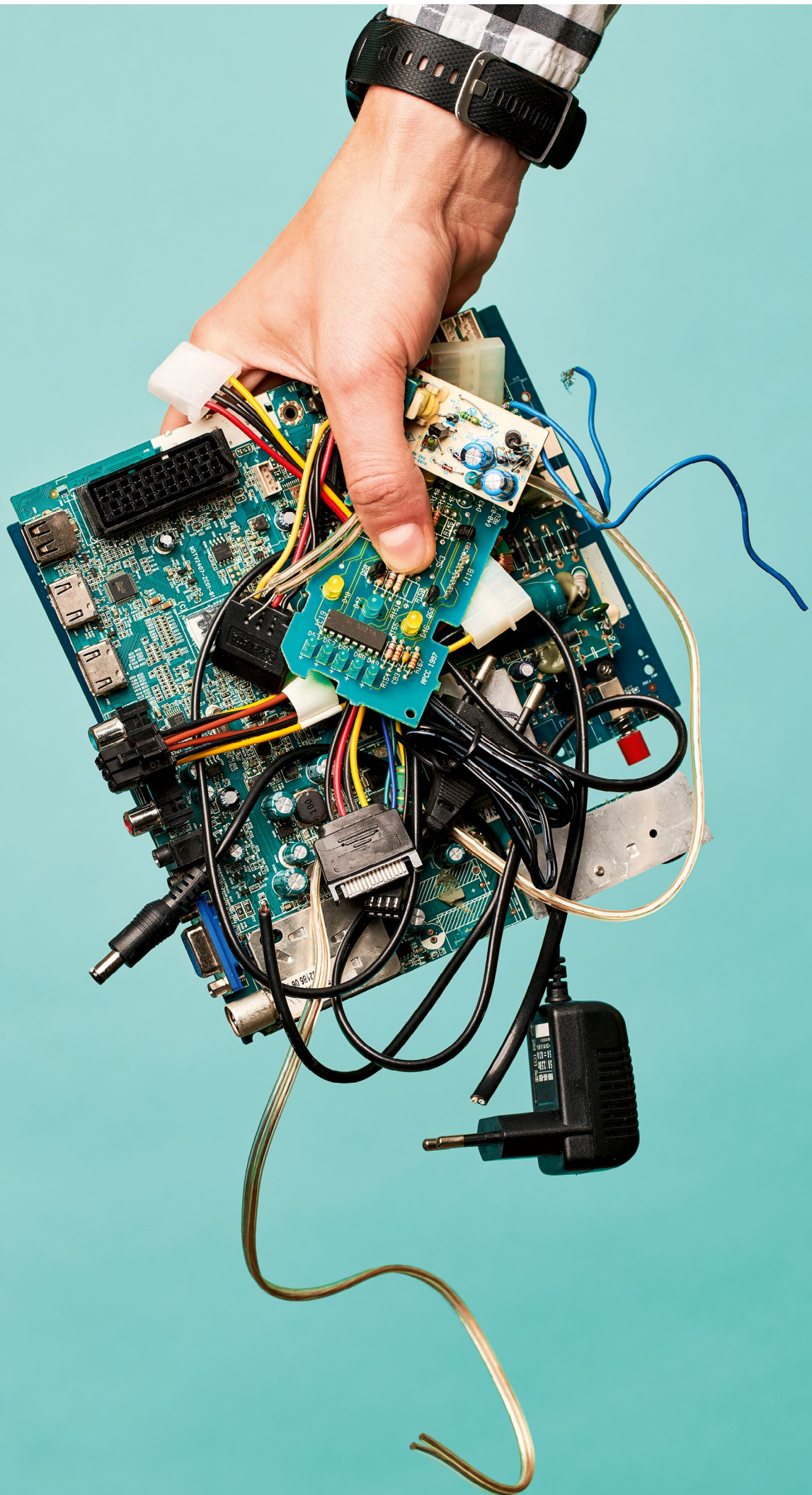
**Systemgrenzen für die Ermittlung von prozessorientierten Rückgewinnungsraten
am Beispiel des Batterierecyclings..... 22**

Abbildung 5

**Systemische Betrachtung der Stoffströme der Platingruppenmetalle
für den Wirtschaftsraum Deutschland..... 25**

Inhalt

Zusammenfassung	7
1 Einführung	8
2 Ziel und Betrachtungsrahmen dieses Papiers	10
3 Zielhierarchie in der Circular Economy	11
4 Recycling in der Circular Economy	13
5 Grenzen des Recyclings – über vermeidbare und unvermeidbare Verluste	15
6 Festlegung von Indikatoren für das Recycling	17
7 Spezifische Aspekte von Recyclingraten des Metallrecyclings	20
8 Vorschläge für die Weiterentwicklung von Indikatoren des Recyclings komplexer Produkte am Beispiel des Batterierecyclings	22
9 Indikatoren aus Produktperspektive und aus volkswirtschaftlicher Perspektive	25
10 Empfehlungen der Ressourcenkommission	27
I. Der Rahmen der CE Circular Economy (CE)	27
II. Indikatoren(systeme) für das Recycling	27
III. Verbesserung des Recyclings innerhalb der Circular Economy (CE)	28
IV. Voraussetzungen schaffen	28
V. Umsetzung ermöglichen	28
Literatur	29



Zusammenfassung

Circular Economy (CE) hat über ökologische und klimapolitische Dimensionen und Ziele hinaus eine wichtige industriepolitische, wirtschaftsstrategische und gesellschaftspolitische Bedeutung zur Stärkung von Versorgungssicherheit und Nachhaltigkeit. Recycling, d. h. die Rückführung von Materialien in die Wirtschaft zur erneuten stofflichen Nutzung, ist dabei eine der Stellschrauben neben den anderen Strategien der CE wie Langlebigkeit, Nutzungsintensität und Sharing Economy. Zur Bewertung des Beitrags von Recycling für Ressourcenschonung und Klimawende ist die klare Benennung des Betrachtungsrahmens und der Systemgrenzen nötig sowie die Ableitung zielkonformer Definitionen, Berechnungsansätze und Indikatoren zur Verifizierung des realen bzw. möglichen Beitrags des Recyclings. Erforderlich ist auch ein Verständnis für die Chancen und Grenzen des Recyclings und der CE zur Erreichung von umwelt- und wirtschaftspolitischen sowie sozio-ökonomischen Zielen wie den UN Nachhaltigkeitszielen (engl. Sustainable Development Goals (SDG)) und des europäischen Green Deal.

Dieses Papier fokussiert insbesondere auf das **Recycling von Metallen**, welche eine Schlüsselfunktion für die Energie- und Klimawende innehaben. Recycling als Teil eines übergreifenden CE-Konzepts ist entscheidend für die physische Schließung von Stoffkreisläufen und damit für die Verringerung des Primärrohstoffeinsatzes sowie einer verbesserten Versorgungssicherheit. CE und Recycling sind dabei kein Selbstzweck, sondern ein Ansatz, um Umwelt- und Klimaschutz, Rohstoffverfügbarkeit, soziale Standards, Produkt-Servicenutzen und Ressourcenschonung zu erreichen – denn ein schonender und effizienter Umgang mit Ressourcen ist Voraussetzung für Wohlstand und Wirtschaftlichkeit Europas und Deutschlands. Zur Messung des Grades der Zielerreichung ist die Auswahl geeigneter Indikatoren erforderlich. Den einzelnen Leitzielen können Handlungsfelder zugeordnet werden, für die wiederum spezielle operative Indikatoren gewählt werden können, um die Effizienz einzelner Maßnahmen abzubilden.



Im Gegensatz zur klassischen Kreislauf- oder Abfallwirtschaft, zielt die CE auf mehr als nur die Minimierung des Abfallaufkommens ab. Damit durch Recycling ein realer Beitrag zur Rohstoffversorgung und damit unserem Wohlergehen erreicht wird, müssen Materialien nach dem Ende der Produktnutzung auch tatsächlich in stofflich hochwertiger Qualität ihren Weg in neue Produkte finden, d. h. Recycling muss die Stoffkreisläufe physisch schließen. Um dies zu erfassen, zeigen wir im vorliegenden Papier mögliche Indikatoren für das Recycling auf, diskutieren deren Vor- und Nachteile und skizzieren erforderliche Anforderungen an Systemgrenzen, Definitionen und Berechnungsmethoden.



1 Einführung

Der schonende und effiziente Umgang mit natürlichen Ressourcen¹ ist wichtiger denn je. Einerseits sind mit der Gewinnung, Verarbeitung und Nutzung von Rohstoffen Auswirkungen auf die Umwelt und das Klima sowie vereinzelt auch negative soziale Folgen in den Lieferländern verbunden. Andererseits treten verstärkt Knappheiten in der Wirtschaft durch eine erhöhte Nachfrage, etwa durch neue Technologien und Anwendungen, aber auch durch Lieferengpässe und geopolitische Konflikte auf. Die sogenannte Circular Economy (CE) kann hier teilweise Abhilfe schaffen. Dieser Ansatz, wie ihn auch die EU vertritt, geht weit über die bisherige „deutsche Kreislaufwirtschaft“ hinaus. Auf der politischen Ebene wird das Ziel der CE damit benannt, den *„Wert von Produkten, Materialien und Rohstoffen so lange wie möglich zu erhalten und die Erzeugung von Abfällen zu minimieren, um damit einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung einer nachhaltigen, CO₂-armen, ressourceneffizienten und wettbewerbsfähigen Wirtschaft in der EU zu leisten“* (EC, 2015). Stand bei der herkömmlichen Kreislaufwirtschaft die Verringerung und die schadlose Entsorgung von Abfällen im Vordergrund, geht es bei der CE nun um den Werterhalt der eingesetzten Rohstoffe und Materialien. Diese sollen zur Nutzenstiftung in Produkten und Dienstleistungen immer wieder in möglichst hoher, wenn nicht gleichwertiger funktionaler Form bereitgestellt werden. Die sogenannte „Entsorgungswirtschaft wird so Teil der „versorgenden Rohstoffwirtschaft, indem möglichst viele Rohstoffe für Produkte und Dienstleistungen bereitgestellt werden und somit der Bedarf an Primärrohstoffen reduziert werden kann. Dadurch können Energie und damit verbundene Treibhausgase sowie andere ökologische und soziale Auswirkungen, die durch Förderung und Verarbeitung von Rohstoffen entstehen, eingespart werden.

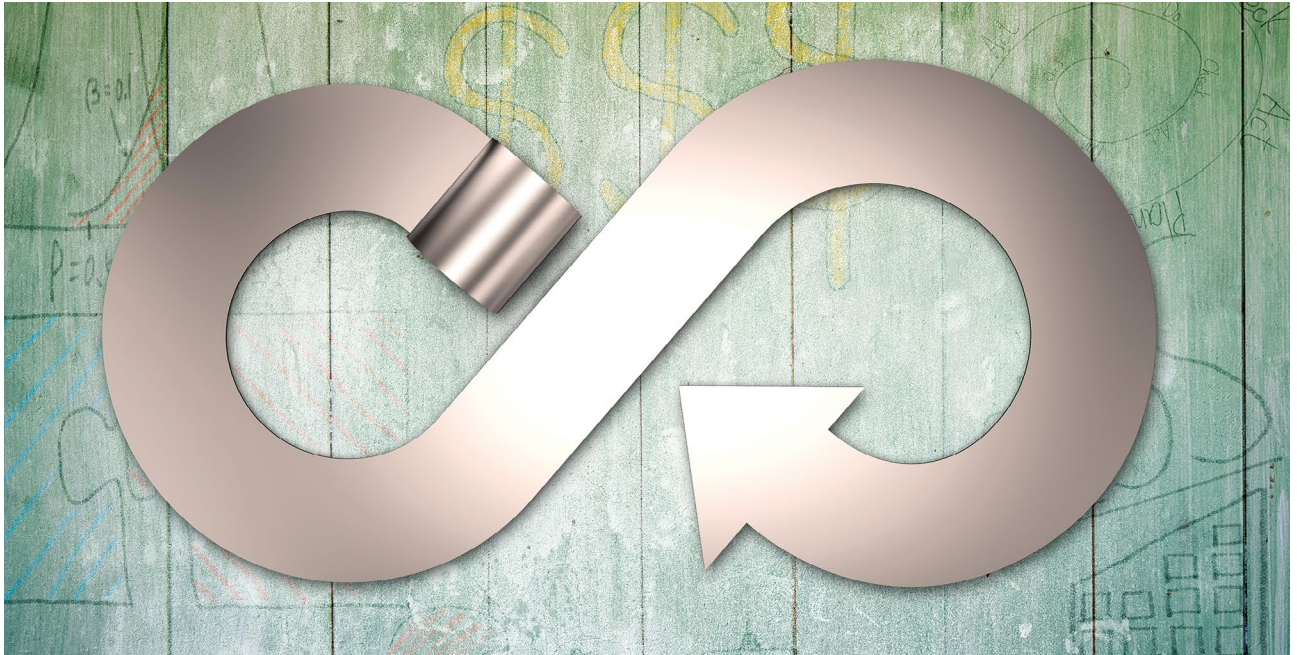
CE bedeutet dabei wesentlich mehr als Recycling. Es handelt sich um einen übergreifenden konzeptionellen Ansatz, wie Produkte entwickelt, entworfen, vertrieben, verwendet, repariert, wiederverwendet und schließlich verwertet und die Stoffe in den Rohstoffkreislauf zurückgeführt werden können, um natürliche Ressourcen zu schonen, die Umweltbelastung zu minimieren und Knappheiten zu vermeiden. In diesem Sinne lassen sich zwei Sichten auf die CE unterscheiden:

1. Der oben genannte übergreifende Ansatz bezieht das gesamte Wirtschaftssystem ein und kann als CE im weiteren Sinne bezeichnet werden.
2. Das Recycling, also das Schließen von Materialkreisläufen in der Wirtschaft, kann als CE im engeren Sinn bezeichnet werden und stellt entsprechend einen wichtigen und unverzichtbaren Teilbereich des weiten Ansatzes der CE dar.

Die Optimierung der Rohstoffgewinnung und der gesamten Produktionskette bis hin zum Produkt und darüber hinaus über die Nutzung bis zum sogenannten End-of-Life (EoL) der Produkte sind Bestandteil des übergreifenden CE Ansatzes. Deshalb ist bei der Bewertung auch oft von Lebenszyklus- oder Life-Cycle-Ansätzen die Rede. Soziale, ökologische, industrielle und geopolitische Aspekte müssen systemisch über den ganzen Lebensweg hinweg bewertet werden, um Vor- oder Nachteile zu erfassen und vergleichen zu können und die besten Handlungsoptionen auszuwählen. Insgesamt bestehen sowohl in den Rohstoff- und Lieferketten als auch in der Nutzungsphase Optimierungspotenziale für mehr Ressourceneffizienz.

Gerade im aktuellen geopolitischen Umfeld mit den teils drastischen Auswirkungen auf Lieferketten und Rohstoffversorgung, zunächst durch die Covid Pandemie und dann durch den Ukraine Krieg, wird die Bedeutung einer sicheren Rohstoffversorgung auch der breiteren Öffentlichkeit bewusst. Diese Importabhängigkeiten bestehen nicht nur bei Öl und Gas, sondern auch bei vielen metallischen Rohstoffen. Maßnahmen, um die verwendeten Materialien effizienter zu

¹ „Ressource, die Bestandteil der Natur ist. Hierzu zählen erneuerbare und nicht erneuerbare Primärrohstoffe, physischer Raum (Fläche), Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft), strömende Ressourcen (z. B. Erdwärme, Wind-, Gezeiten- und Sonnenenergie) sowie die Biodiversität. Es ist hierbei unwesentlich, ob die Ressourcen als Quellen für die Herstellung von Produkten oder als Senken zur Aufnahme von Emissionen (Wasser, Boden, Luft) dienen“ (Quelle: (UBA, 2012).



nutzen und besser als bisher im Kreislauf zu halten, d. h. dabei auch EoL-Produkte konsequent als „heimische Rohstoffquelle“² zu nutzen, unterstreichen, dass es bei der CE über die ökologische Bedeutung hinaus auch klar um die industriepolitische/wirtschaftsstrategische Dimension zur Stärkung der Versorgungssicherheit geht (Kullik, 2022).

Weltweit steigt der Bedarf an biotischen und abiotischen Rohstoffen. Er hat sich seit 1990 mehr als verdoppelt und liegt heute bei rund 96 Mrd. Tonnen pro Jahr (letzte verfügbare Daten für 2019), darunter etwa 10 Mrd. Tonnen Metalle (UNEP, 2019). Derzeit werden in der Welt weniger als 10 Prozent der eingesetzten Ressourcen wieder recycelt (Circle Economy, 2022). Neben der ressourcenschonenden Produktion und Nutzung von Produkten kommt deshalb dem effektiven Recycling von Produkten eine zentrale Rolle zu. Dadurch soll der Einsatz primärer Rohstoffe verringert und durch sekundäre (Recyclingrohstoffe) ersetzt werden. Da die Gewinnung primärer Rohstoffe meistens energie- und ressourcenaufwendiger als das Recycling ist, wäre damit auch eine Entlastung von Klima und Umwelt verbunden.

Metalle haben eine besondere Bedeutung innerhalb der Rohstoffe. Etwa 80 Prozent der chemischen Elemente sind Metalle. Sie spielen in modernen Technologien und High-Tech-Produkten eine zentrale Rolle und sind aus Energieversorgung, Mobilität, Elektronik oder Medizin nicht mehr wegzudenken. Gerade für die Transformation hin zu einer klimafreundlicheren Energieversorgung und Mobilität spielen sie eine entscheidende Rolle. Als chemische Elemente verschwinden Metalle nach der Nutzung nicht³ und lassen sich grundsätzlich wiedergewinnen. Allerdings können sie in Produkten oder im Abfall so stark verdünnt sein („Dissipation“) oder in komplexen Verbindungen vorliegen, dass ein Recycling erschwert, ineffizient oder sogar technisch und praktisch unmöglich wird. Deshalb ist der recyclinggerechte Umgang mit Metallen entlang der gesamten Wertschöpfungskette von großer Bedeutung.

² Aber auch bei Rohstoffen, die inländisch gefördert werden, sind spezifische Aspekte der Rohstoffversorgung zu beachten: so vor allem Flächenbedarf inkl. der Auswirkungen auf den Naturschutz bei der Förderung mineralischer Rohstoffe oder aktuell auch die Auswirkungen des Kohleausstiegs auf den Rohstoff Gips.

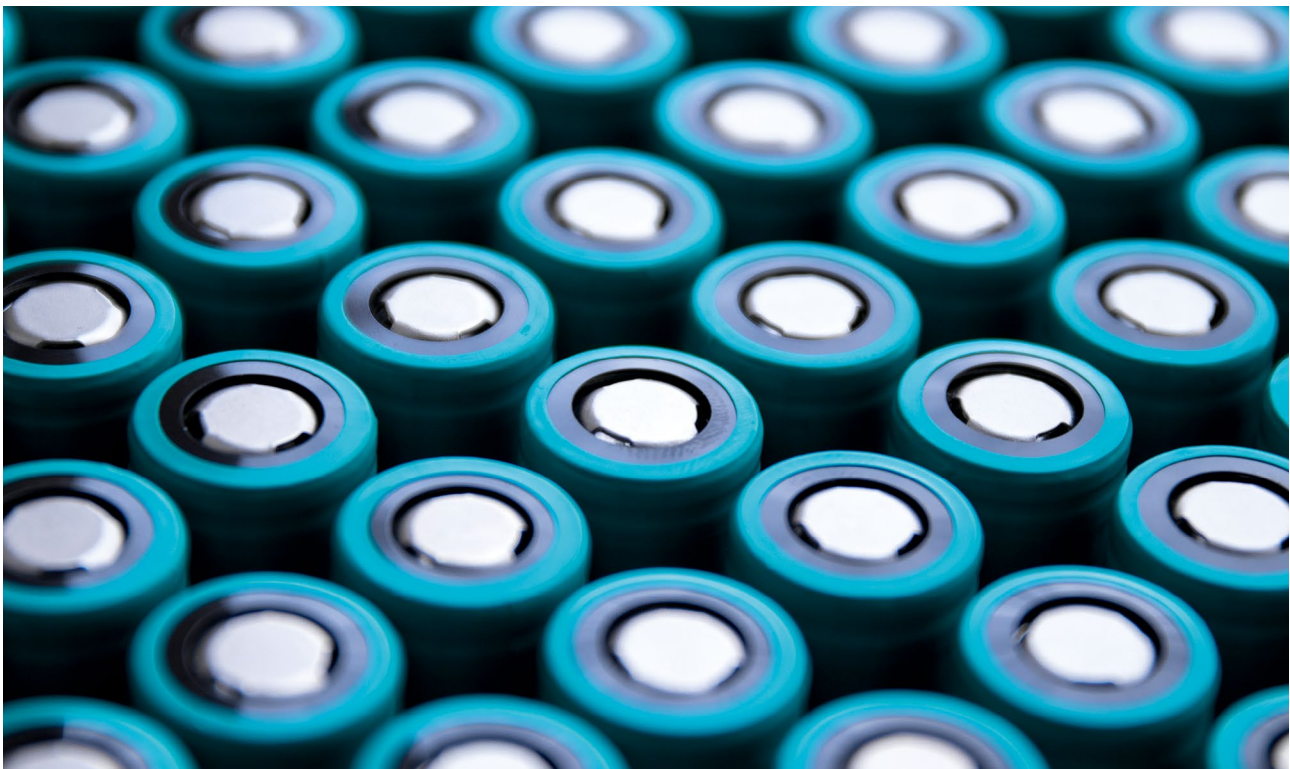
³ Dies gilt nicht für z. B. Uran als Kernbrennstoff.

2 Ziel und Betrachtungsrahmen dieses Papiers

Während CE und Recycling gesellschaftlich und politisch an Popularität gewinnen, fehlt es vielerorts an begrifflicher Klarheit und einem übergreifenden Verständnis der notwendigen Rahmensetzungen. Wichtig sind eine klare Benennung des Betrachtungsrahmens und der Systemgrenzen sowie zielkonforme Definitionen, Berechnungsansätze und Indikatoren zur Verifizierung des realen Beitrags des Recyclings zu den Zielen der CE. Auch ist die Setzung von strategischen Prioritäten im Umgang mit Rohstoffen notwendig. Dazu müssen konkrete Materialsysteme betrachtet werden und in Bezug auf ihre zeitliche Entwicklung vor dem Hintergrund verschiedener Einflussgrößen untersucht werden. So ist beispielsweise die Transformation des Energiesystems auch eine Materialwende. Durch den Ausbau erneuerbarer Energien (Sonne und Wind) sowie Speichersystemen (z. B. Lithium-Ionen-Batterien) und anderer Elemente des Energiesystems steigt der Bedarf an speziellen Rohstoffen rasant an. Diese Rohstoffe werden durch die langen Nutzungsdauern der Infrastruktur des Energiesystems zunächst im „anthropogenen Lager“ gebunden, bevor sie bei Rückbau oder Upgrading wieder zurück in das Recycling fließen. Das Beispiel des Energiesystems, aber auch anderer Bereiche

wie Digitalisierung zeigt klar, dass gesellschaftliche und politische Zielsetzungen sowie die damit einhergehenden Investitionen in Forschung und Entwicklung eine erhebliche Steuerungswirkung auf die Materialflüsse der Wirtschaft haben. Dieser Kontext ist auch wichtig für ein Verständnis für die Chancen und Grenzen des Recyclings, um daraus die richtigen Maßnahmen ableiten zu können.

Dieses Papier konzentriert sich auf die Rolle des Recyclings in der CE mit einem Fokus auf dem Recycling von **Metallen**. Weitere Aspekte der Ressourceneffizienz und -schonung, wie z. B. die Herstellung langlebiger und wiederverwendbarer Produkte, die Entwicklung ressourcenleichter Geschäftsmodelle und Dienstleistungen (z. B. Sharing Economy) oder ressourcensparsame Konsummuster, sind für die benannten Ziele von hoher Bedeutung, werden hier aber nur angerissen (vgl. hierzu auch die Studien von (IRP, 2020)).



3 Zielhierarchie in der Circular Economy

Wie in der Einführung erläutert, werden in den politischen Zielsetzungen der CE der Werterhalt der Produkte sowie die Abfallminimierung an erster Stelle genannt und daraus u. a. auf Nachhaltigkeit, Klimaschutz und Wettbewerbsfähigkeit geschlossen. Diese Argumentationsrichtung funktioniert jedoch nicht immer: Die lange und intensive Nutzung eines Oldtimer-Pkws (Diesel-betrieben und möglicherweise ohne Katalysator und Feinstaubfilter), eines alten Kühlschranks (Energieeffizienzklasse E, mit FCKW) oder eines alten schlecht isolierten Hauses (aus den 1950er Jahren) erhalten zwar den (Nutz-)Wert und vermeiden auch Abfall, sind aber aufgrund eines hohen Ressourcenverbrauchs der Nutzung in einer Gesamtbetrachtung nicht notwendigerweise immer die „nachhaltigste“, klimaschonendste oder gar wettbewerbsfähigste Alternative. Deshalb sind die korrekte Benennung der eigentlichen Ziele und die Erfassung des Beitrags einer Maßnahme zu diesen Zielen essentiell.

Hier ist konkret zu unterscheiden, was der Zweck bzw. das Ziel und was die Mittel sind. In der oben genannten politischen Prioritätensetzung lassen sich als Ziele vorrangig der globale Klima- und Umweltschutz, die nationale Sicherung der Rohstoffversorgung und die Einhaltung sozialer Standards in der Lieferkette benennen. Hierzu zählt auch die Schonung weiterer natürlicher Ressourcen wie etwa von Wasser und Fläche bzw. Biodiversität. Diese Aufzählung zeigt, dass CE und Ressourcenschonungspolitik⁴ eine Vielzahl von Einzelzielen umfassen können. Diese Vielzahl erschwert eine Entscheidungsfindung und erfordert daher eine weitere Strukturierung und Priorisierung. Während die Zielsetzung des Klimaschutzes in der aktuellen Politik mit höchster Priorität gesetzt ist, kann man schon bei der Schonung mineralischer Ressourcen kontrovers diskutieren, ob dies ein eigenständiges Ziel oder eher ein Mittel ist, etwa um Umweltbelastungen oder soziale Folgen beim Abbau zu vermeiden⁵. Wenn man auch die Ressourcenschonung als Zweck ansieht, so wäre die CE ein Mittel, um die vier oben genannten Ziele Klima- und Umweltschutz, Rohstoffverfügbarkeit sowie soziale Standards und Ressourcenschonung zu erreichen.

Um eine Zielerreichung zu messen, müssen dann für diese Ziele die entsprechenden Indikatoren gewählt und in den Mittelpunkt der Bewertung gestellt werden. Zu beachten ist, dass für eine klare Interpretation der Aussage eines Indikators immer auch die Vorgehensweise/Methode zu seiner Ermittlung definiert werden muss. Diese Zielindikatoren basieren zum größten Teil auf physischen Größen, auf Mengenangaben und entsprechend abgeleiteten Kennzahlen (Abbildung 1):

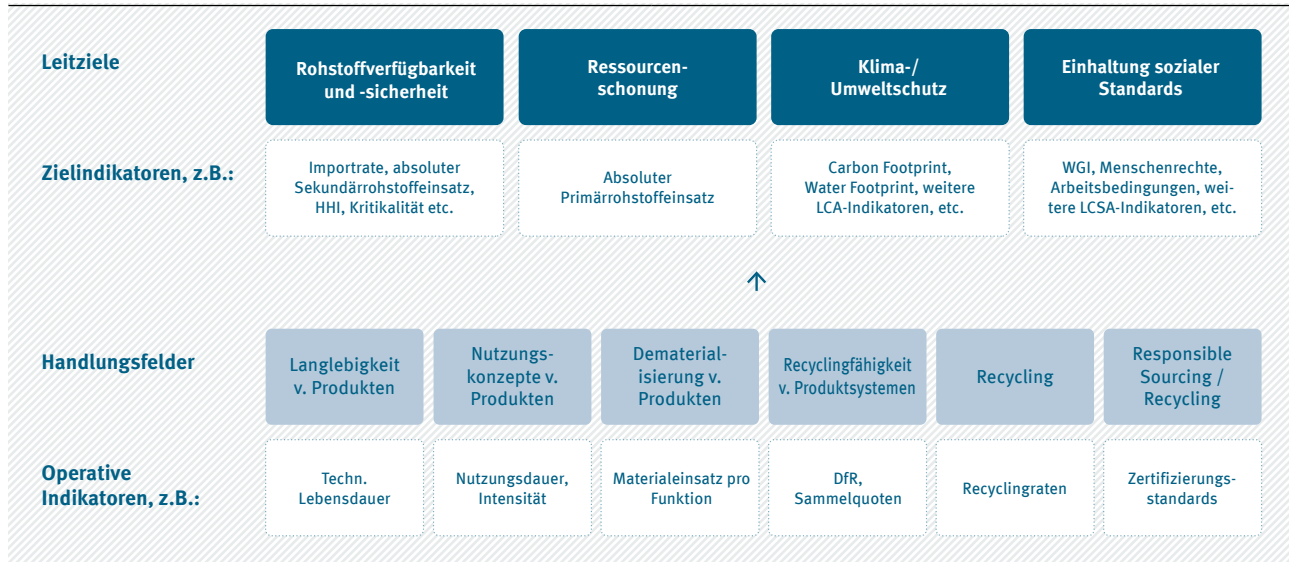
- ▶ Bei der *Versorgungssicherheit* stellt sich z. B. für einzelne Materialien die Frage, wie groß der Anteil der Selbstversorgung durch primäre und sekundäre Rohstoffe in Deutschland oder der EU ist bzw. wie divers die globale Lieferantenstruktur ist und welche spezifischen Abhängigkeiten bestehen;
- ▶ Bei der *Ressourcenschonung* geht es um die absolute Senkung des primären Rohstoffeinsatzes zum Erhalt von Rohstoffen für zukünftige Generationen;
- ▶ Beim *Klimaschutz* ist das Ziel die globale Senkung der Treibhausgasemissionen;
- ▶ Die *Einhaltung sozialer Standards* bei Produktion und Entsorgung kann gemessen werden; usw.

In Abbildung 1 werden die Leitziele einer CE, deren Zielindikatoren sowie die Ziele in verschiedenen Handlungsfeldern und deren operative Indikatoren in Beziehung zueinander gesetzt. Die Handlungsfelder einer CE, wie z. B. die Herstellung langlebiger Produkte, die Verbesserung der Recyclingfähigkeit von Produktsystemen, das Entwerfen alternativer Nutzungskonzepte (z. B. Sharing Economy) oder die Dematerialisierung von Produkten und Dienstleistungen bis hin zum Recycling sollen letztlich zum Erreichen der Leitziele beitragen, was sich nur anhand der übergeordneten Leitindikatoren einheitlich bewerten lässt. Erst daraus ergibt sich, welche Handlungen in welchem Umfang sinnvoll oder weniger sinnvoll sind. Damit können Maßnahmen dann auch handlungsübergreifend priorisiert werden. Ebenso lassen sich damit Trade-offs zwischen verschiedenen

⁴ Ressourcenschonung bezieht sich hier auf die „sparsame Nutzung natürlicher Ressourcen (Rohstoffe, Wasser, Boden, Luft, strömende Ressourcen und Biodiversität) mit dem Ziel der Erhaltung ihrer Menge und Funktion“ (UBA, 2012).

⁵ Zur geologischen Knappheit mineralischer Ressourcen siehe z. B. (Schmidt, 2021) oder (Meinert et al., 2016), zu sozialen Folgen des Abbaus siehe z. B. (Mancini and Sala, 2018)

Abbildung 1

Konzept einer Zielhierarchie in der Circular Economy (CE) mit Leitzielen sowie einer Auswahl von Handlungsfeldern und Indikatoren.


HHI: Herfindahl-Hirschman-Index; LC(S)A: Life Cycle (Sustainability) Assessment; WF: Water Footprint; WGI: World Governance Indicator; DfR: Design for Recycling.

Quelle: eigene Abbildung der UBA-Ressourcenkommission

Handlungsfeldern bzw. Strategien beschreiben, z. B. zwischen Dematerialisierung in Produktnutzung und Recycling.

Operative Indikatoren wie z. B. die Produktlebensdauer oder die Recyclingraten für verschiedene Handlungsfelder und für unterschiedliche Handlungsebenen (Systemgrenzen) lassen sich als Hilfsgrößen – „Proxys“ – interpretieren, mit denen der operative Erfolg in den jeweiligen Bereichen gemessen werden kann. Solche operativen Indikatoren sind wichtig, in der Zielhierarchie sind sie jedoch untergeordnet. Sie haben immer einen begrenzten Anwendungskontext, der beachtet werden muss und sie sind nicht immer aussagekräftig bzgl. der Erreichung der eigentlichen Leitziele. Erst eine Lebenszyklusperspektive ergibt eine Bewertung der Sinnhaftigkeit einzelner Strategien in ihrer Konzertierung und zeigt mögliche Trade-offs auf der Zielebene auf.

Weiterhin muss bei der Wahl von Zielen und den entsprechenden Indikatoren berücksichtigt werden, in welchen Systemgrenzen sie betrachtet werden sollen. Viele übergeordnete Ziele wie z. B. der Klimaschutz oder die Ressourcenschonung sind auf einer globalen Ebene zu bewerten. Maßnahmen, die z. B. nur zu

einer räumlichen Verschiebung (zwischen Ländern oder Weltregionen) von Treibhausgasemissionen führen, zahlen nicht in den globalen Klimaschutz ein. Wenn es aber um die Erfüllung von zwischenstaatlichen Vereinbarungen geht, so können Indikatoren auf einer nationalen oder regionalen Ebene sinnvoll sein. Die Rohstoffverfügbarkeit wird sich dagegen an nationalen oder wirtschaftlichen Systemgrenzen festmachen. Bei vielen Handlungsfeldern ist hingegen das System relevant, das von den Akteuren beeinflusst werden kann, also beispielsweise das Produktsystem oder das Unternehmen. Viele Maßnahmen der Circular Economy wie Recycling, Repair oder Reuse werden meistens auf der Produktebene betrachtet, da hier die Produktentwicklung oder die entsprechenden Geschäftsmodelle eine entscheidende Rolle spielen. Allerdings müssen diese Maßnahmen in der Summe auch auf nationaler Ebene zum Recycling bzw. auf globaler Ebene zum Klimaschutz beitragen. Die angemessene Berücksichtigung dieser verschiedenen Systemebenen bei der Indikatorenwahl ist entscheidend dafür, dass es zu keinen Fehlentscheidungen auf der Maßnahmenebene kommt und dass Zielkonflikte berücksichtigt oder sogar aufgelöst werden.

4 Recycling in der Circular Economy

In der klassischen Kreislaufwirtschaft war ein wesentliches Ziel die Minimierung des Abfallaufkommens, um die in die Beseitigung fließenden Mengen an Abfällen zu verringern, denn Deponieraum war knapp und die Abfallverbrennung umstritten. Recyclingraten setzen deshalb z. B. in der Altautoverordnung an der gesamten Masse des Autos an. Was nicht in die Beseitigung von Abfällen ging, wurde positiv bewertet. In einer CE, in der es um den physischen Erhalt der Materialien bzw. ihrer Eigenschaften, Funktionen und Qualität geht, um sie als Rohstoff wieder einzusetzen, müssen andere Indikatoren als nur die Abfallmenge zum Einsatz kommen. Da sich der Anwendungskontext der Recyclingraten geändert hat, müssen Recyclingraten nun auf einzelne Stoffe oder marktfähige Metalllegierungen (vgl. (Reuter et al., 2019)) bezogen sein und sie müssen berücksichtigen, ob diese Elemente oder Materialien tatsächlich im Kreislauf geführt werden.

Dies bedeutet, dass Materialien nach dem Ende der (nach Möglichkeit langen) Produktlebensdauer und erhöhter Nutzungsintensität (vgl. (IRP, 2020)) auch tatsächlich stofflich ihren Weg in neue Produkte finden müssen, als Kunststoff, Metall, Legierung, Mineral(gemisch) oder als ganzes Bauteil. Altprodukte (EoL-Products) müssen also nicht nur mit hohen Sammelquoten erfasst, sondern anschließend auch in eine effiziente und qualitativ hochwertige Recycling-Prozesskette überführt werden. Im Sinne einer physischen Kreislaufführung sollte dabei nur der finale Output der Recyclingprozessketten für den CE-Erfolg gezählt werden und zwar auch nur dann, wenn die Output-Materialien in einer marktfähigen Qualität vorliegen, die zu ihrem Wiedereinsatz für die Herstellung von möglichst gleichwertigen Neuprodukten führt. Erst dann erfolgt tatsächliche Ressourcenschonung durch Substitution, also ein Minderverbrauch an Primärrohstoffen, und die damit einhergehende Entlastung der Umwelt.

Recyclingraten dürfen deshalb nicht allein auf Outputgrößen oder Zwischenprodukte in der Recyclingkette bezogen werden, sondern müssen erfassen, welcher Anteil davon wieder als hochwertiger Rohstoff eingesetzt wird. Wird z. B. das wichtige Technologiemetall Neodym wirklich wieder als Neodym eingesetzt, oder verbleibt es als Verunreinigung oder Schlacke in minderwertigen Produkten? Dies erfordert einerseits eine Differenzierung nach den verschiedenen Stoffen bzw. Elementen (z. B. Neodym, Kobalt, Lithium etc.) und andererseits eine Systembetrachtung, die alle Sammel- und Verarbeitungsschritte einschließt (z. B. mittels einzelner Stoffstromanalysen für Prozessketten, Länder und Regionen). Nur so können die quantitativen Stoffverluste in der gesamten Recyclingkette berücksichtigt und auch beurteilt werden, welche Qualität der Recyclingrohstoff schließlich hat. Denn zwischen der Quantität und der Qualität des Outputs besteht ein Zusammenhang. Eine rein quantitative Betrachtung ohne ausreichende Berücksichtigung der Qualität kann einen Recyclingerfolg postulieren, der nicht zu einer tatsächlichen Substitution von primären Rohstoffen führt. Dies wird am Begriff des Downcyclings deutlich, der das Entstehen von minderwertigen Produkten beschreibt (z. B. Blumentöpfe aus recycelten Kunststoffgemischen). Eine Kreislaufwirtschaft in diesem Sinne erfordert die Entwicklung von Geschäftsmodellen mit einer Material- und Metallogistik, aus der Produkte erwachsen





und wieder eingehen können, d. h. Geschäftsmodelle, die so gestaltet werden, dass funktionsspendende Material- und Stoffströme im Mittelpunkt stehen.

In der Vergangenheit lag das Augenmerk auf verhältnismäßig einfachen Produkten (z. B. Glasflaschen oder Aluminiumdosen), bei welchen Kreisläufe leichter zu schließen sind als bei komplexen, multimaterialien Produkten wie elektronischen Geräten oder modernen Fahrzeugen. Gerade die E-Mobilität und die Digitalisierung ganzer Sektoren erfordert den Einsatz einer Vielzahl an strategisch wichtigen Rohstoffen bzw. funktionellen Materialien auf Basis spezifischer Elemente, die in ihrer Qualität für weitere Anwendungen möglichst erhalten werden sollten. Die derzeitige Abfallgesetzgebung mit den vorgegebenen pauschalen Recyclingquoten (z. B. End-of-Life Vehicle (ELV), Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)) bildet diese physische Dimension bei komplexen Produkten nicht ausreichend ab. Für einzelne Materialien/Metalle/Legierungen gab es bislang keine spezifischen Recyclingquoten.

Ein wichtiger Schritt in die richtige Richtung ist der Entwurf der EU Batterieverordnung (engl. EU Battery Regulation) vom Dez. 2020 (EC, 2020a), die zum ersten Mal spezifische Recyclingraten für einige Schlüsselmetalle (Co, Ni, Cu, Li) in der

Abfallgesetzgebung vorgibt. Die genauen Definitionen von Systemgrenzen und die Berechnungsgrundlage zur Ermittlung der Quoten sind jedoch noch offen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die auf Abfallarten bezogenen Recyclingraten in der derzeitigen Abfallgesetzgebung nicht ausreichend für die Erfüllung der weitreichenden Ziele einer Circular Economy sind. Dazu müssten Recyclingraten auch auf individuelle Materialien und Metalle bezogen sowie weitere Indikatoren hinzugezogen werden. Außerdem müssten Systemgrenzen, Indikatoren einschließlich verschiedener Definitionen für Recyclingraten und Berechnungsverfahren umfassend festgelegt werden. Versuche in diese Richtung, etwa im Rahmen der international laufenden Arbeiten an einer ISO-Norm in der 59000er Reihe zu Circular Economy, gestalten sich schwierig.



5 Grenzen des Recyclings – über vermeidbare und unvermeidbare Verluste

Besondere Herausforderungen bestehen bei komplexen, multi-metallhaltigen und massenrelevanten Konsumgütern wie z. B. Fahrzeugen oder Elektronikgeräten. Selbst bei optimalem Produktdesign und Rahmenbedingungen können aus solchen Produkten nicht alle enthaltenen Materialien gleichzeitig und auch kein einzelnes Material zu 100 % recycelt werden.

In gewissem Umfang entstehen Materialverluste durch:

- ▶ **Unvollständige Erfassung** und den **Einsatz qualitativ minderwertiger Recyclingprozesse** (vgl. Abbildung 3 in Kapitel 7)
- ▶ **Grenzüberschreitende Verluste:** Durch den Export von EoL-Produkten oder EoL-Fractionen entgehen einem Wirtschaftsraum ggf. wichtige Sekundärrohstoffe, die für ein Recycling im gleichen Wirtschaftsraum nicht mehr zur Verfügung stehen oder gegebenenfalls in einem anderen Wirtschaftsraum unter wesentlich schlechteren ökologischen und sozialen Bedingungen verarbeitet oder nur begrenzt zurückgewonnen werden.
- ▶ **Dissipative Prozesse:** Bei vielen Produktanwendungen sind Materialverluste unvermeidlich, z. B. durch Rost oder Abrieb. Der Einsatz von Materialien in geringen Mengen oder Konzentrationen (z. B. in LED⁶-Lampen, Farbpigmenten, RFID⁷-Chips usw.) erschwert nicht nur die Sammlung, sondern auch die technische Rückgewinnung. Die erforderliche Aufkonzentration der Materialien und Stoffe als Gegenspieler zur Dissipation ist immer mit einem hohem Energieeinsatz verbunden, der seinerseits zu Klima- und Umweltbelastungen führt. Hier gibt es thermodynamische Grenzen, jenseits derer Recycling auch unter Umweltgesichtspunkten nicht sinnvoll ist.

- ▶ **Technische Grenzen:** Komplexe, eng verbundene Mehrstoffgemische – z. B. aus chemisch edlen (Edelmetalle, Cu, Ni, Pb, ...) und unedlen (Ge, Ga, Seltene Erdelemente (SEE), Ta, ...) Metallen – bei denen letztere nur in Spuren (Beschichtungen) oder Mikrobauteilen (z. B. gedruckte Schaltungen) enthalten sind, lassen sich nicht mehr mit vertretbarem Aufwand in alle Einzelteile trennen, sondern es verbleibt immer ein Rest in einer Schlacke o.ä.

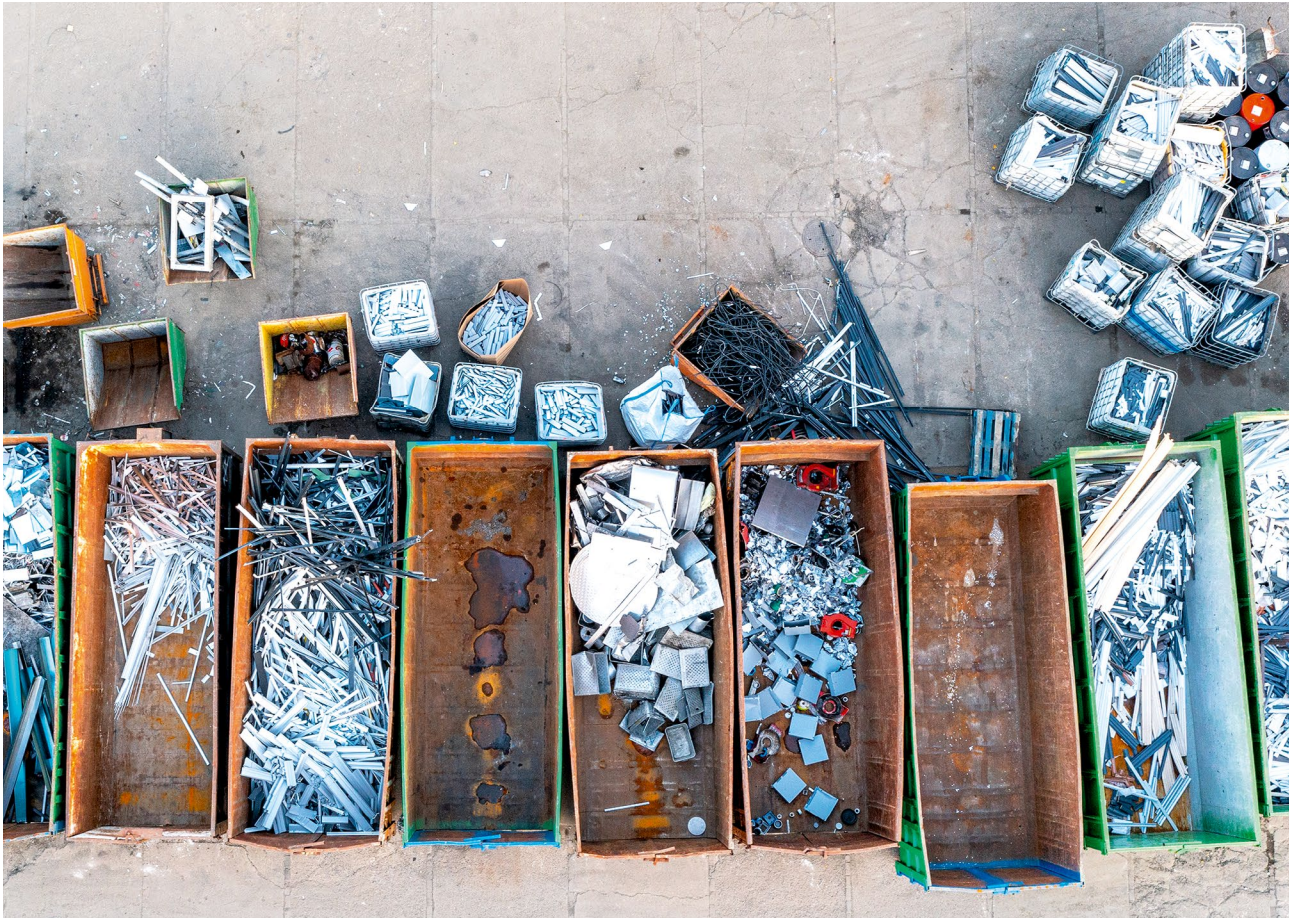
Letzteres kann anschaulich damit erklärt werden, dass es zwar einfach ist, Milch in einen Kaffee zu verteilen, aber praktisch unmöglich ist, aus dem Kaffee die Milch wieder zu separieren und zu gleichwertiger Milch zu machen. Hier sind der Circular Economy Grenzen gesetzt.

Zu unterscheiden ist in der Diskussion auch zwischen vermeidbaren und unvermeidbaren Materialverlusten. Während durch entsprechende Maßnahmen Sammelerfolg und Recyclingqualität erhöht sowie grenzüberschreitende Verluste eingedämmt werden können, gibt es bei der Dissipation und den technischen Grenzen des Recyclings sehr viel weniger Spielraum, da es sich häufig um unvermeidbare



⁶ Light-emitting diode (LED)

⁷ Radio-frequency identification (RFID)



Verluste handelt. Aber auch diese können in einem systemischen Ansatz zumindest verringert werden, z. B. durch Berücksichtigung des Recyclings bereits bei Materialauswahl und Design der Produkte, durch Substitution von kritischen Rohstoffen in massenrelevanten dissipativen Anwendungen und durch die strikte Nutzung qualitativ hochwertiger Recyclingprozesse entlang der Verwertungskette (UNEP, 2013; Schoch et al., 2021; Reuter et al., 2019)

Schließlich muss beachtet werden, dass auch das Recycling einschließlich der Sammellogistik technische Prozesse beinhaltet, die stets einen gewissen Energie- und Materialeinsatz erfordern und somit zwangsläufig auch Umweltbelastungen bedingen. Meistens sind diese Umweltbelastungen bezogen auf die zurückgewonnenen Rohstoffe deutlich geringer als die vergleichbare Extraktion aus der Natur, also z. B. aus Bergwerken. Dies ist aber nicht immer so und es gibt Fälle, in denen die Primärgewinnung sogar besser sein kann als das Recycling. Dies trifft besonders dann zu, wenn die Mengen und Konzentrationen der zurückzugewinnenden Materialien und Stoffe immer kleiner werden (Dissipation) und schließlich sogar unter den Konzentrationen liegen, wie sie in natürlichen Rohstoffvorkommen auftreten. Dann ist unter ökologischen Gesichtspunkten eine primäre Rohstoffgewinnung dem Recycling vorzuziehen.

6 Festlegung von Indikatoren für das Recycling

Das UNEP International Resource Panel (IRP) hat bereits 2011 Vorschläge zur sinnvollen Klassifizierung von Zielvorgaben für das Recycling aufgestellt (UNEP, 2011). Zudem schrieb das IRP 2013: „Die Definition der Systemgrenzen, für die Ziele festgelegt werden, ist von entscheidender Bedeutung. Außerdem behindern gewichtsbezogene Zielvorgaben das Recycling der vielen kritischen Elemente in komplexen Produkten, die in der Regel in sehr geringen Konzentrationen vorliegen, eher, als dass sie es fördern. Darüber hinaus müssen Prioritäten zwischen verschiedenen Metallen gesetzt werden, wie z. B. unedlen Metallen, Sondermetallen, Metallen für kritische Technologien usw. Dies verdeutlicht das Dilemma bei der Festlegung von Recyclingzielen für Metalle, die in geringen Mengen in Produkten enthalten sind.“ (UNEP, 2013). Im Vordergrund dieser Betrachtung steht die produktspezifische (engl. „product centric“) Perspektive, d. h. in welchem Maße über bestimmte Produkte in den Verkehr gebrachten Rohstoffe an deren Lebensende zurückgewonnen werden können (unabhängig vom Ort und Zeitpunkt der Einbringung).

Gefordert wird eine systemische Betrachtung und die Wahl eines geeigneten Indikators oder eines Indikatorensets, die tatsächlich und richtungssicher den Einfluss auf die entsprechenden Ziele anzeigen. Wenn das Abfallaufkommen reduziert werden soll, dann sollte der gewählte Indikator – z. B. eine Recyclingrate – das auch stellvertretend anzeigen. Wenn die Entnahme von Primärrohstoffen aus der Umwelt minimiert werden soll, dann sollte die Recyclingrate dies ebenfalls anzeigen. Allerdings kann die Wahl von Systemgrenzen und Indikatoren in der Praxis

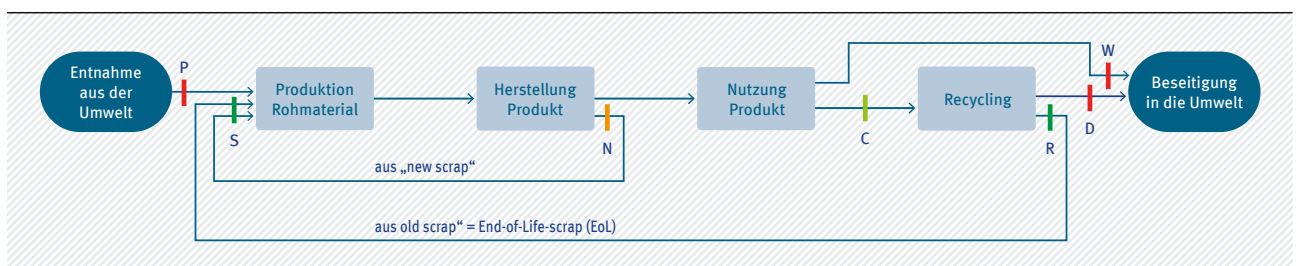
sehr unterschiedlich ausfallen und nicht immer kompatibel zu den übergreifenden Zielen sein oder den eigentlichen Erfolg oder Misserfolg verschleiern.

Im Folgenden wird anhand einer vereinfachten Darstellung (Abbildung 2) aufgezeigt, wie das Recycling durch operative Indikatoren beschrieben werden kann und welche unterschiedlichen Sichtweisen darin zum Ausdruck kommen.

Abbildung 2 zeigt das System einer einfachen Produktionskette über den gesamten Lebenszyklus („cradle-to-grave“) von der Entnahme des Primärrohstoffs (P) bis zur Beseitigung der Produktabfälle (W). Es wird davon ausgegangen, dass das Recycling einen Sekundärrohstoff (S) gleicher Qualität bereitstellen kann, ansonsten würde die Darstellung komplexer ausfallen. Aber selbst in diesem einfachen Fall gleicher Qualität gibt es viele Missverständnisse zu Begrifflichkeiten. Das fängt damit an, dass auf der **Outputseite** (s. Abbildung 2 rechts) die Verluste beim Recycling beschrieben durch die Rate D (Beseitigung) oft vernachlässigt werden. Diese Stoffmengen können aber durch Ineffizienzen des Recyclingsystems beträchtlich sein. So ist die Sammelrate (C) am Ende der Produktnutzung immer größer, als die Recyclingrate (R), welche den stofflich nutzbaren Anteil beschreibt. **Eine Recyclingrate, wie auch bei (UNEP, 2013) definiert als $C/(W+C)$ auf der Outputseite, vermittelt deshalb ein geschöntes Bild, da sie sich nur auf die gesammelte Menge und nicht auf das Endprodukt des Recyclingprozesses, R, bezieht.** Solch eine Größe sollte daher korrekter als Sammel- oder Erfassungsrate bezeichnet werden.

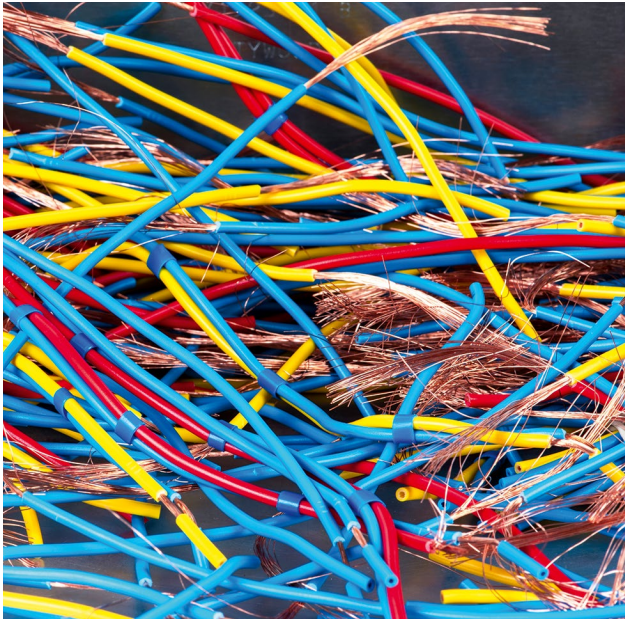
Abbildung 2

Vereinfachtes Schema eines Produktsystems mit Recycling



Erläuterung der Abkürzungen im Text.
Bezugspunkte P, S, N etc. beziehen sich auf die Balken.

Quelle: eigene Abbildung der UBA-Ressourcenkommission in Anlehnung an (UNEP, 2013).



Für die Messung des „Erfolgs“ des Recycling wäre richtiger die Definition $R/(W+C)=R/(W+R+D)$. Diese Größe zeigt an, was tatsächlich nach dem Recycling von EoL-Produkten wieder mittels stofflichen Recyclings in den Kreislauf zurückgeführt werden kann und somit Primärrohstoffe (P) ersetzt bzw. Abfälle (W+D) minimiert. Wäre die **EoL-Recyclingrate** $R/(W+C) = 1$, so entstünden keine Abfälle und das Material würde komplett in den Kreislauf zurückgeführt werden. Dieser Wert „1“ ist allerdings hypothetisch und kann aus naturgesetzlichen und praktischen Gründen kaum erreicht werden. Die EoL Recyclingrate, ist ein guter Indikator für den Grad der Zirkularität eines bestimmten Rohstoffes (in einer bestimmten Anwendung), sie zeigt, welcher Anteil des im Abfall enthaltenen Rohstoffes am EoL des Produktes in den Kreislauf zurückgeführt wird.

Auf der **Inputseite** (s. Abbildung 2 links) wird der als Recycled Content bezeichnete Inhalt von recyceltem Material im Rohmaterial P oft mit dem Verhältnis $S/(P+S)$ angegeben (mit $S = R+N$). Dieser Wert würde dann allerdings auch die Verarbeitungsverluste N („new scrap“) aus der Industrie, wie z. B. Verschnitt, Stanzreste oder Späne, enthalten. Das sind Materialineffizienzen

innerhalb des produzierenden Systems. Natürlich ist es sinnvoll diese Reststoffe einer hochwertigen stofflichen Verwertung zuzuführen, aber noch wichtiger wäre es, diese Ineffizienzen zu vermeiden oder zu minimieren⁸. Denn sie führen auf jeden Fall zu einem erhöhten ökologischen und ökonomischen Aufwand im Produktionssystem (z. B. durch erforderlichen Energieeinsatz). Der **Recycled Content** in einer CE, die das Produktrecycling im Auge hat, sollte sich deshalb auf Sekundärrohstoffe am Lebenszyklusende R (engl. end-of-life) eines Produktes fokussieren, d. h. auf die Größe $R/(P+R)$. Wäre der Recycled Content $R/(P+R)=1$, so hätte man erreicht, dass keine Entnahme von Primärrohstoffen aus der Umwelt erforderlich wäre, was jedoch aus den bisher genannten Gründen hypothetisch ist.

Auf gesamtwirtschaftlicher Ebene und für die vier Rohstoffkategorien Biomasse, Metallerze, nicht-metallische Mineralien und fossile Energieträger berichtet Eurostat im Überwachungsrahmen für eine Kreislaufwirtschaft zur „Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe“ (engl. **Circular Material Use Rate (CMUR)**)⁹. Die **CMUR** stellt den Anteil des recycelten und wieder in die Volkswirtschaft eingespeisten Materials im gesamten Materialeinsatz dar. Für Einzelrohstoffe gibt Eurostat den „Beitrag der recycelten Materialien zur Rohstoffnachfrage, **Recycling-Rate am Ende des Lebens (EOL-RIR)**“¹⁰ basierend auf EU Materialsystemanalysen an.

Eine grundsätzliche Schwierigkeit ist die zeitliche Entwicklung des Bedarfs an Rohmaterial für Produktion und Produktnutzung. In den meisten Fällen steigt dieser, teils durch Zunahme von Konsum, teils durch gesellschaftlich explizit gewollte Entwicklungen, wie das weiter vorne genannte Beispiel der Energiewende zeigt. Umgekehrt kann aber in Einzelfällen der Bedarf an einem Rohstoff oder Material auch zurückgehen, wenn z. B. eine Dematerialisierung von Produkten forciert wird, wenn ein Technologiewechsel eintritt oder wenn Materialien aus Umweltgründen verboten werden. Wenn die Bedarfsmenge steigt, so wird der Recycled Content $R/(P+R)$ immer

⁸ Da gerade beim Aufbau neuer Technologien und Produktionsverfahren (z. B. Produktion von Batteriezellen) zunächst oft signifikante Mengen solcher Produktionsausschüsse anfallen, stellen auch diese eine wichtige Sekundärrohstoffquelle da, die innerhalb der EU einem hochwertigen Recycling zugeführt werden müssen. Entsprechend muss besonders in der kritischen Hochlaufphase neu investierter Recyclinganlagen ein Abfluss dieser Mengen aus der EU unbedingt vermieden werden. Daher sollten beide Ströme erfasst und kommuniziert werden.

⁹ https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/products-datasets/product?code=cei_srm030

¹⁰ https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/products-datasets/product?code=cei_srm010

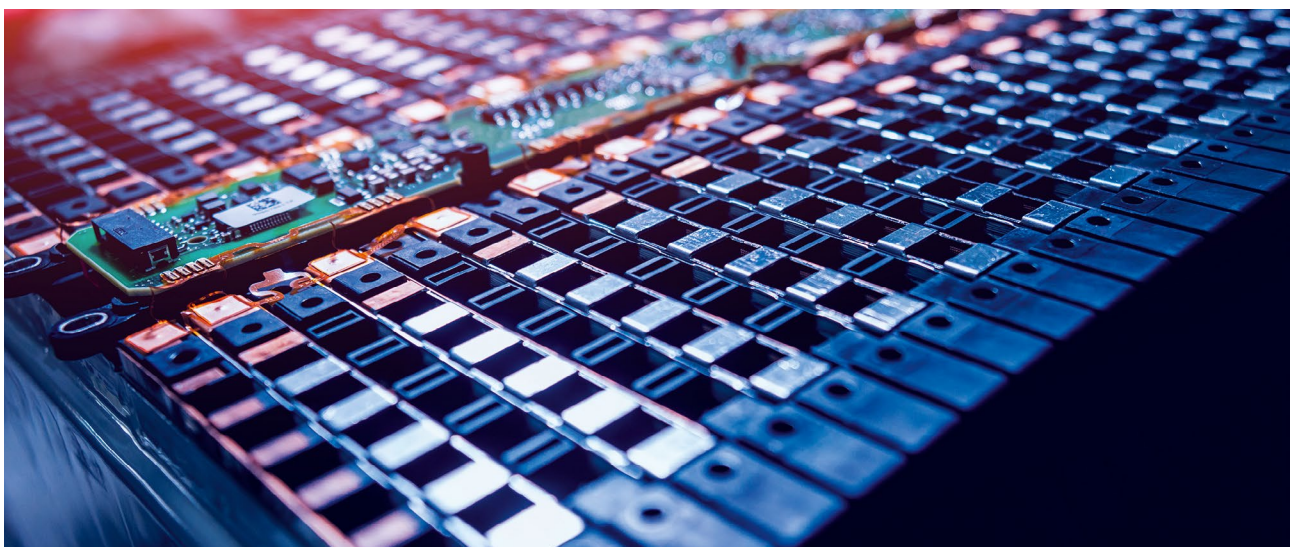
deutlich kleiner sein als die EoL-Recyclingrate $R/(W+C)$. Das heißt, das in einem Wachstumsmarkt der Recycled Content nie sehr groß sein kann, weil im Wirtschaftssystem das Material überhaupt erst verfügbar gemacht werden muss, bevor es dann (später) recycelt werden kann. Das trifft auf viele Technologiemetalle gerade im Energiebereich zu, die erst seit verhältnismäßig kurzer Zeit im Einsatz sind und starke Wachstumsraten in Produkten mit einer mehrjährigen Lebensdauer haben (z. B. aktuell Co, Ni, Li für Lithium-Ionen-Batterien). Der Recycled Content ist deshalb nur bedingt als CE Indikator für einzelne Rohstoffe geeignet. Dies gilt es bei Vorgaben und Bewertungen zu berücksichtigen – auch können schnelle Umläufe spezifischer Legierungen geringerer Konzentration notwendig sein, um bei Knappheiten wirtschaftliche Funktionen zu erhalten und Innovationszyklen mitzugehen.

Im vorliegenden Fall wurde der Materialkreislauf anhand eines Produktsystems aufgezeigt. Es findet also eine Art „**Closed Loop**“ statt: Das Material wird wieder für das gleiche Produkt eingesetzt. Wenn die Qualität des Sekundärrohstoffs dem des Primärrohstoffs („inhärent“ gleiche Materialeigenschaften) entspricht, dann kann damit natürlich auch der entsprechende Bedarf für andere Produktsysteme ersetzt werden.

Unter diesem Aspekt hat das Metallrecycling grundsätzliche Vorteile z. B. gegenüber dem Recycling von Kunststoffen, Textilien oder Papier. Denn Metalle, die in modernen metallurgischen Anlagen recycelt werden, sind i.d.R. qualitativ gleichwertig mit Primärmetallen, sie weisen identische Reinheiten, chemische und physikalische Eigenschaften auf und werden auch zu den gleichen Preisen international gehandelt.¹¹

Für den Fall, dass der Sekundärrohstoff eine mindere Qualität als der Primärrohstoff hat und beispielsweise ein **Downcycling** erfolgt, also der Sekundärrohstoff nur für andere oder minderwertigere Produkte eingesetzt werden kann, ist ein Closed Loop nicht möglich. Es erfolgt dann eine **Kaskadierung** in andere Produktsysteme hinein. Was Downcycling bedeutet (Helbig et al., 2022) und welche Auswirkung das auf die Entnahme an Primärrohstoffen bzw. auf die Erzeugung von Abfällen hat, muss viel detaillierter für den spezifischen Anwendungsfall betrachtet werden.

Produkte oder Produktkomponenten können auch direkt wiederverwendet oder weiterverwendet werden. Letztlich führt dies zu einer verlängerten Lebensdauer und erhöhter Nutzungsintensität, die erforderliche Kreislaufschließung durch Recycling wird damit aber lediglich zeitlich verschoben.



¹¹ Viele Hüttenstandorte verarbeiten sowohl primäre als auch sekundäre Rohstoffe im selben Flowsheet und die Feinmetalle im Prozessoutput können nur massenbilanziell differenziert werden. Aus diesem Grund braucht es auch keine Incentivierung, um recycelte (statt primäre) Metalle in Produkten einzusetzen; wenn sie als Feinmetalle vorliegen, dann ist die Marktfähigkeit automatisch gegeben. Allerdings können Anreize wichtig sein, um eine umfassende Sammlung von Altprodukten zu gewährleisten und diese in hochwertige Recyclingprozesse einzusteuern.

7 Spezifische Aspekte von Recyclingraten des Metallrecyclings

Die im vorigen Abschnitt beschriebene Komplexität von Indikatoren für die Recyclingkette kann sehr gut am Beispiel von Metallen aufgezeigt werden (Abbildung 3). Das Recycling selbst besteht aus mehreren Schritten und beginnt mit der Erfassung von EoL-Produkten, gefolgt von einer manuellen und/oder automatisierten Demontage und/oder einer mechanischen Vorbehandlung (Aufbereitung) dieser Produkte zur Erzeugung geeigneter Fraktionen für die weitere (End-)Verwertung. Im Falle des Metallrecyclings ist der letzte Schritt die chemisch-metallurgische Endverarbeitung dieser einzelnen Fraktionen, um daraus Feinmetalle oder Metallsalze zu erzeugen.

Je niedriger die Qualität eines einzelnen Prozesses in der Kette ist, desto höher sind die (Metall-)Verluste insgesamt. Deshalb ist es wichtig, eine hohe Effizienz über alle Stufen der Prozesskette hinweg zu erzielen. Diese Gesamteffizienz der Kette wird maßgeblich durch das schwächste Glied der Kette (meistens die Sammlung) bestimmt und ergibt sich aus der Multiplikation der Effizienzen der einzelnen Schritte. Dies lässt sich am konkreten Beispiel des Recyclings von Gold (Au) aus Elektronikgeräten veranschaulichen (Abbildung 3). Bei einer Erfassungsrate von 50 % und einer Aufbereitungsausbeute für Gold von 70 % läge die Gesamtausbeute für Gold selbst bei einer metallurgischen Ausbeute von über 95 % nur bei insgesamt 33 %. Das kommt der heutigen Recyclingrealität

für die Goldgewinnung aus Elektroaltgeräten in Europa recht nahe. Dabei steht Gold nur exemplarisch für verschiedene Rohstoffe, die in komplexen Produkten wie Elektro(nik)geräten enthalten sind und daraus nach Möglichkeit auch zurückgewonnen werden sollten.

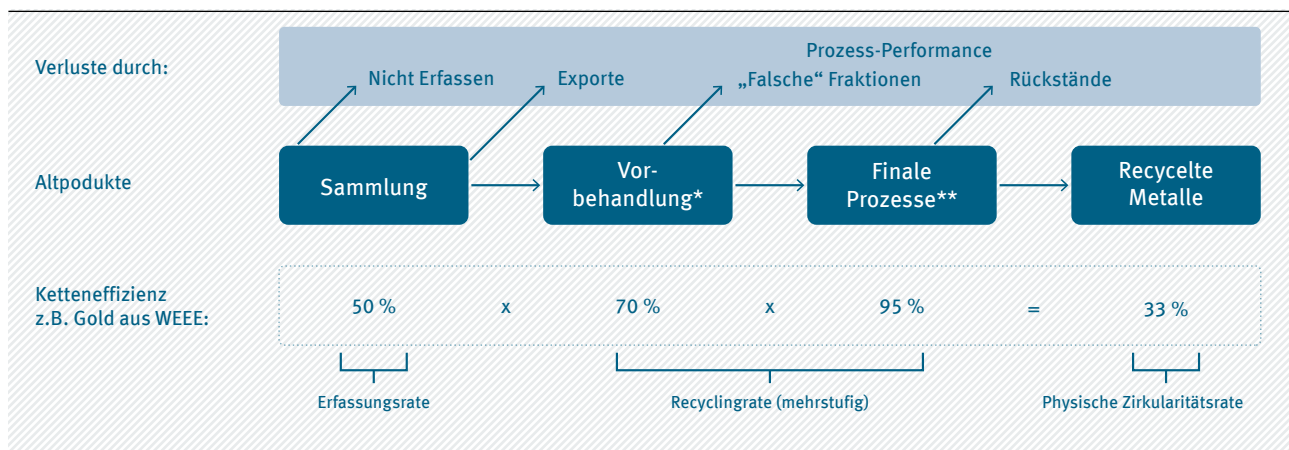
Ein qualitativ hochwertiges Recycling erfordert entsprechend die ökonomisch-tragfähige Rückgewinnung vieler relevanter Inhaltsstoffe mit hohen Ausbeuten, in marktfähiger Qualität und unter Einhaltung hoher Umwelt- und Sozialstandards, unter Berücksichtigung von Energieeffizienz und CO₂-Bilanz.

Entlang der Recyclingkette kann es zu zahlreichen und unterschiedlichen Metallverlusten kommen, weil:

1. EoL-Produkte nicht gesammelt werden oder – nach der Sammlung – das System (z. B. Europa) als (oft dubiose oder illegale) Exporte verlassen,
2. Metalle während der Demontage und Aufbereitung in Fraktionen gelangen, aus denen sie nicht zurückgewonnen werden können oder auf Deponien verloren gehen,
3. auch in der metallurgischen Endverarbeitung Metallverluste in Schlacken und anderen Rückständen entstehen.

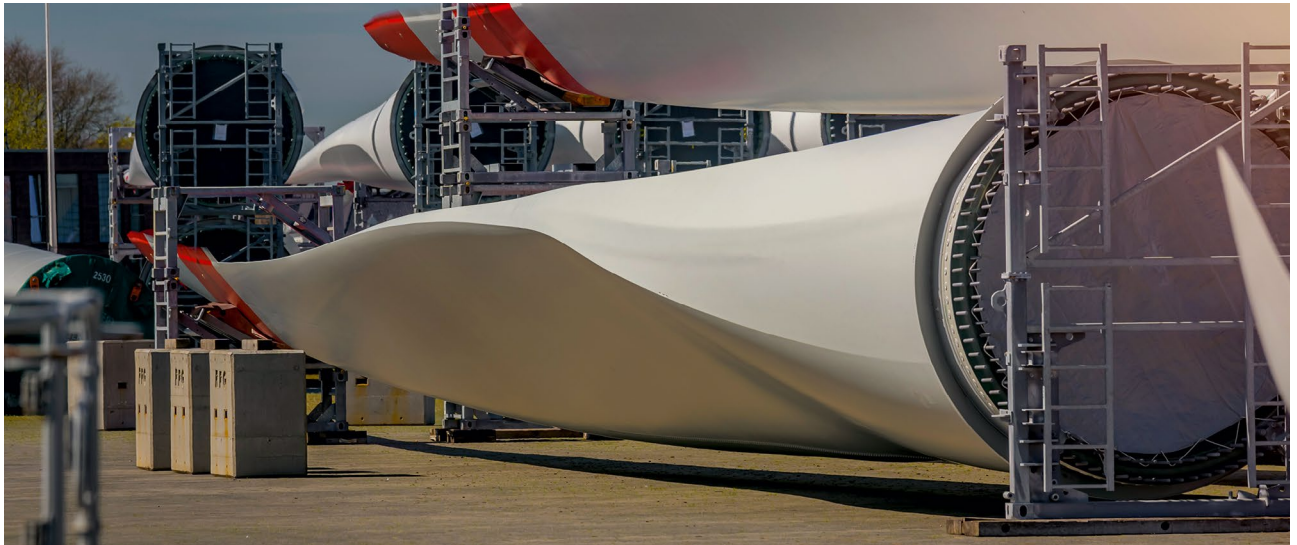
Abbildung 3

Prinzipielle Recyclingkette von (komplexen) Produkten inkl. Beispiel für Gold aus WEEE



* manuell-mechanisch
 ** chemisch-metallurgisch

Quelle: eigene Abbildung der UBA-Ressourcenkommission basierend auf Abbildung 4 in (Hagelüken und Goldmann, 2022)



Bei den meisten Konsumgütern wie Elektronik, Fahrzeugen oder Batterien erfordert die Verbesserung der Gesamtausbeute des Recyclings daher vor allem geeignete Maßnahmen, um die **effektive Sammlung dieser Produkte am Ende ihres Lebenszyklus zu fördern**. Es muss sichergestellt werden, dass sie nach der Sammlung auch tatsächlich qualitativ hochwertigen Recyclingpfaden zugeführt werden. Dort ist dann der Einsatz geeigneter Aufbereitungsanlagen erforderlich, wo aus komplexen Produkten Fraktionen generiert werden, die für die weitere Endverarbeitung bzw. metallurgische Verarbeitung geeignet sind. Entscheidende Faktoren sind hier das **Produktdesign** (z. B. Zugänglichkeit von Produktkomponenten wie Batterien oder Leiterplatten, Design for Circularity (Schoch et al., 2021), die Vorsortierung nach Hauptproduktgruppen und die operative Exzellenz der Aufbereitungsanlage für die Minimierung von Metallverlusten (z. B. in falsche Fraktionen, aus denen sie nicht zurückgewonnen werden können, z. B. ist Kupfer ein relevanter Störstoff in der Stahlfraction).

Für viele Materialarten bestehen bereits leistungsfähige metallurgische Prozesse, aber sie können nur das zurückgewinnen, was tatsächlich auch in diese Anlagen gelangt. Für komplexe Materialien (z. B. Leiterplatten, Katalysatoren) wird in der Regel eine Kombination aus Pyrometallurgie („Schmelzen“) und Hydrometallurgie („chemisches Lösen und Trennung/

Raffination“) angewandt. Auch hier sind Vorbereitung und Mischung des Einsatzmaterials für die metallurgische Verarbeitung, die operative Performance und das Management von Schlacken, Abwässern und anderen Rückständen von großer Bedeutung. Außerdem gibt es **thermodynamische Grenzen**, denn aus einem komplexen Multimetallgemisch können nicht alle Metalle (mit hohen Ausbeuten) zurückgewonnen werden. Je nach Zusammensetzung des Einsatzmaterials und den Betriebsparametern der angewandten Prozesse gehen bestimmte Elemente in Schlacken, Flugstäuben oder Abwässern verloren, aus denen sie nicht mit vertretbarem energetischen und wirtschaftlichem Aufwand zurückgewinnbar sind (zur Vertiefung s. (UNEP, 2013)).

Deswegen wird auch bei einer „optimalen“ CE nicht vollständig auf den Einsatz von Primärrohstoffen verzichtet werden können, da unausweichliche Verluste (Dissipation, thermodynamische Grenzen), und Neubedarf durch Marktwachstum und neue Technologien (Beispiel Batteriemetalle) ausgeglichen werden müssen. **Recycling und Bergbau bleiben damit komplementäre Systeme**, wobei der Anteil an Recyclingrohstoffen kontinuierlich wachsen und die Primärrohstoffe zunehmend klima-, umwelt- und sozialverträglicher produziert werden müssen.¹²

¹² Von entscheidender Bedeutung für die CE in Europa ist die Erhaltung bzw. der Ausbau einer leistungsfähigen metallurgischen Infrastruktur. In vielen Fällen werden in modernen EU Hüttenstandorte primäre und sekundäre Rohstoffe gemeinsam verarbeitet. Gerade für die Extraktion von Edel- und Sondermetallen aus Altprodukten sind Basismetalle wie Kupfer, Nickel und auch Blei als sogenannte „Sammlermetalle“ wichtig. Ein Wegfall der metallurgischen Verarbeitungskapazitäten für diese Basismetalle würde die Gewinnungsmöglichkeiten der weiteren vergesellschafteten Metalle deutlich einschränken.

8 Vorschläge für die Weiterentwicklung von Indikatoren des Recyclings komplexer Produkte am Beispiel des Batterierecyclings

Nach der vorangegangenen allgemeinen Vorstellung und Einordnung der Begrifflichkeiten zu den Recyclingraten wird in diesem Abschnitt ein detaillierterer Vorschlag am Beispiel des Recyclings von Batteriematerialien beschrieben.

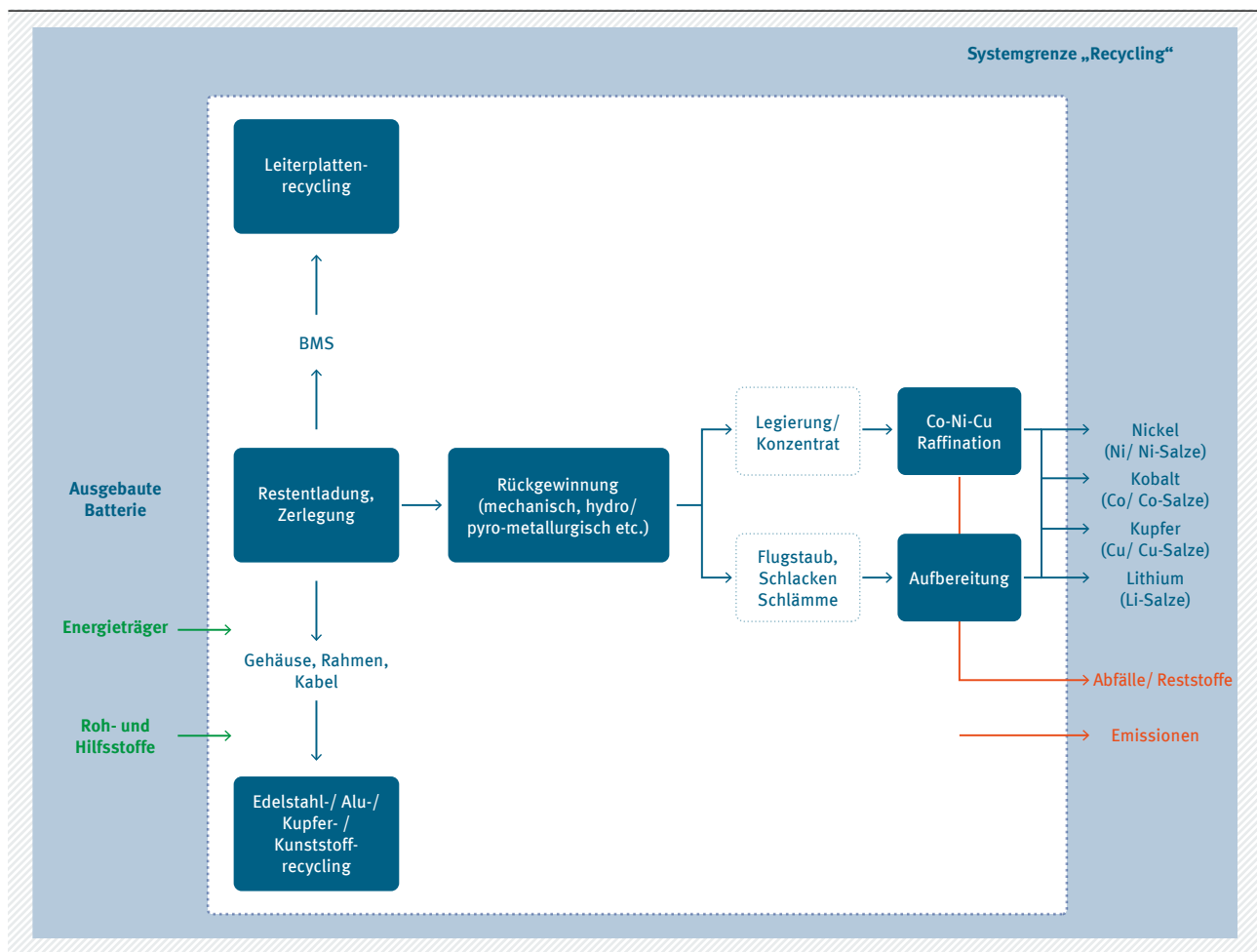
In der Arbeitsgruppe Traktionsbatterien hat sich die Circular Economy Initiative Deutschland (CEID) intensiv mit zielkonformen Systemgrenzen und Definitionen für das Batterierecycling. Im Hinblick auf die CE befasst und folgende Vorschläge erarbeitet (Abbildung 4).

Sowohl der in Abbildung 4 dargestellte Systemrahmen als auch die gewählten Definitionen lassen sich exemplarisch auf andere komplexe Produktgruppen übertragen:

Recycling(system): der gesamte Prozess ab der Einsteuerung von EoL-Produkten in die Recyclingkette bis zur abgeschlossenen Gewinnung von verkaufsfertigen Materialien (Rezyklaten) in vergleichbarer Qualität zum Material aus Primärrohstoffen für die Herstellung neuer Produkte.

Abbildung 4

Systemgrenzen für die Ermittlung von prozessorientierten Rückgewinnungsraten am Beispiel des Batterierecyclings



Quelle: CEID, 2020

Erfassungsrate: Anteil der EoL-Produkte im Vergleich zu den in einem bestimmten Jahr/Zeitraum in Verkehr gebrachten Produkten dieser Kategorie, die nachweislich und ordnungsgemäß für die Vorbereitung zur Wiederverwendung oder ein ordnungsgemäßes Recycling erfasst wurden. Wichtig ist dabei die Berücksichtigung der Systemgrenze. Die Einsammlung von Gebrauchsgüterprodukten für Reparatur und Weiter- bzw. Wiedernutzung (innerer Kreislauf) sollte separat erhoben werden, da dies außerhalb des Abfallregimes liegt. In der Praxis ist die Ermittlung dieser Erfassungsrate anspruchsvoll und kann in vielen Fällen nur einen Näherungswert darstellen. Denn neben der Abgrenzung des Wirtschaftsraumes müssen auch Exporte und Importe sowie der zeitliche Verzug zwischen Inverkehrbringung und Lebensende der Produkte angemessen berücksichtigt werden. Hierzu ist der Aufbau einer Datenbasis und Modellierung der einzelnen Stoffströme schrittweise notwendig – rohstoffstrategische Elemente und Legierungen sollten hierzu priorisiert angegangen werden.

Rezyklat: durch Recycling aus Sekundärrohstoff wiedergewonnenes Rohmaterial in vergleichbarer Qualität zu primären Rohstoffen. Es kann als Input für die Herstellung neuer Produkte verwendet werden und dadurch Primärrohstoffe ersetzen. Die Hochwertigkeit der Rezyklate ist dabei zu betonen: So sind Rezyklate bei fehlender Qualität ohne großen Wert (Downcycling) – fehlende Anforderungen an Rezyklatqualitäten erlauben (und belohnen damit gegebenenfalls ökonomisch) niederwertiges Recycling, was aus Sicht einer Circular Economy nicht erstrebenswert ist.

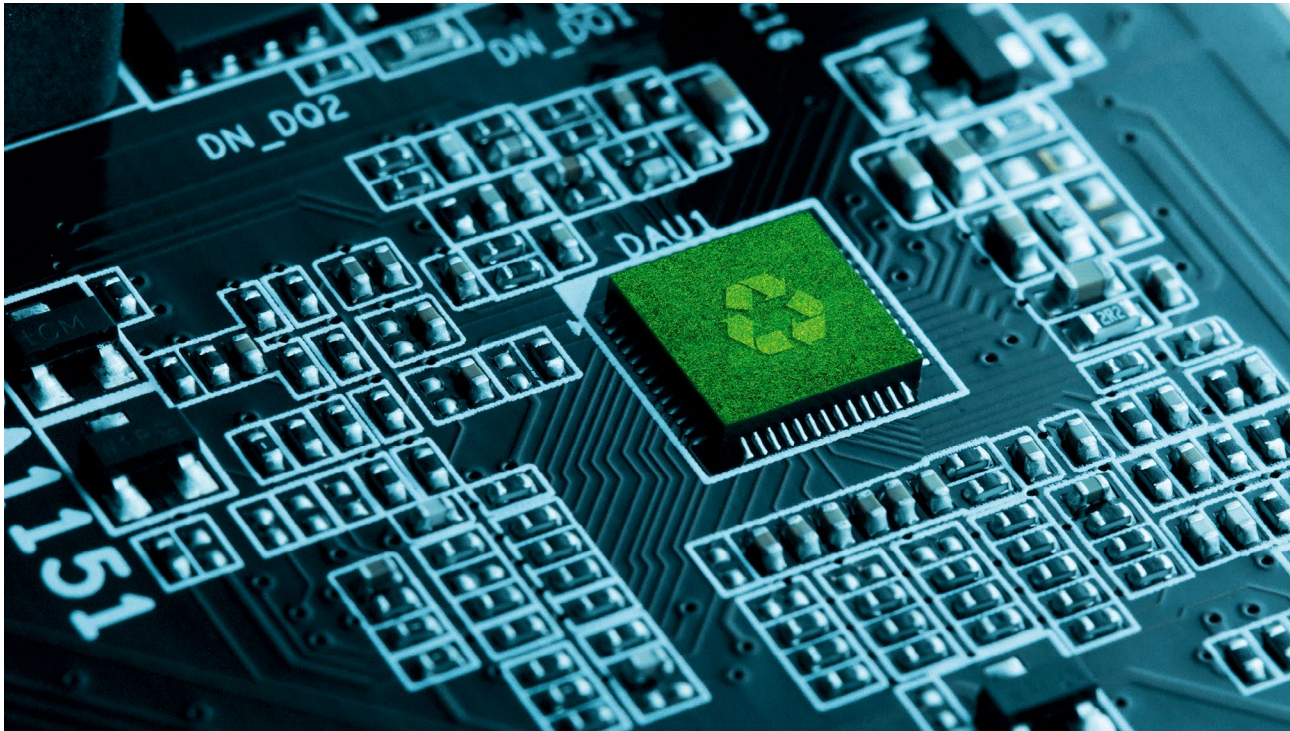
Rückgewinnungsrate (RR): auf den Gesamtprozess des Recyclings bezogene Ausbeute für einzelne Stoffe (Metalle). Sie beschreibt den Quotienten aus der Masse der physisch wieder einsetzbaren *Rezyklate* und der Inputmasse in Bezug auf den Recyclinggesamtprozess eines Produktes, in der Regel stoffbezogen. Da es in allen Einzelschritten der Recyclingprozesskette (Demontage, mechanische Vorbehandlung, chemisch-metallurgisches Recycling) zu Stoffverlusten kommen kann, ergibt sich die Rückgewinnungsrate (Gesamterfolg) aus der Multiplikation der Ausbeuten



aller eingesetzten Prozessstufen (vgl. Abbildung 3). Die *Erfassungsrate* der entsprechenden Materialien in den zu entsorgenden EoL-Produkten ist nicht Bestandteil der Berechnung der RR.

Die RR ist zu erheben als das Mittel über ein Geschäftsjahr für eine operative Einheit (Recyclingstandort, Geschäftseinheit oder Recyclingprozess) und muss durch angemessene Audits oder Zertifizierung nach Menge, Qualität und Energie – beziehungsweise ökologischem (inkl. CO₂-)Fußabdruck – verifizierbar sein.

Zirkularitätsrate oder EoL-Recyclingrate (EoL-RR): berücksichtigt sowohl die Rückgewinnungsrate (RR) als auch die Erfassungsrate der entsprechenden Materialien in den zu verwertenden EoL-Produkten und ist entscheidend für den Erfolg der Kreislaufwirtschaft. Als Erfolgsfaktor für den Grad der Zirkularität einer bestimmten Produktgruppe oder eines Materials/Stoffes kann nur die physische Zirkularitätsrate (bzw. EoL RR) unter Berücksichtigung von Sammelrate und RR des Gesamtprozesses herangezogen werden.



Zu unterscheiden ist zwischen den auf das Produkt bezogenen Recyclingraten (dabei werden die Massen aller finalen Outputströme betrachtet) und differenzierten, materialspezifischen RR/Raten für individuelle Materialien und Stoffe in diesen Produkten. Materialspezifische Raten sind wichtig, wenn Produkte relevante Mengen an „kritischen“ (gemäß EU-Definition (EC, 2020b)) sowie an wirtschaftlich besonders wichtigen und/oder besonders CO₂-oder umweltintensiven Metallen und Stoffen enthalten (Beispiel draft EU Battery Regulation (EC, 2020a)).

Recycled Content RC: Der Rezyklatanteil in Neuprodukten kann eine wichtige Kenngröße sein, die im Idealfall den Erfolg einer CE in einem Wirtschaftsraum anzeigt (z. B. wenn dadurch der absolute Primärrohstoffeinsatz gesenkt wird oder Treibhausgasemissionen reduziert werden (s. Abbildung 1)). Dabei muss berücksichtigt werden, dass es nicht zu Verlagerungseffekten zwischen verschiedenen Produktgruppen zulasten des RC anderer Produkte kommt, oder

dass nur Downcycling angezeigt wird, also der Einsatz als minderwertiger Sekundärrohstoff, der schließlich zu einer Beseitigung im zweiten oder späteren Produktleben führt. Außerdem ist der RC deutlich kleiner als 100 % bei wachsenden Märkten. Er könnte aber ein wichtiger summarischer Indikator für größere Wirtschaftssysteme bzw. Materialsysteme sein, z. B. wenn angegeben werden kann, ob für ein bestimmtes Metall in Deutschland insgesamt xx % Recyclingrohstoffe eingesetzt werden. Das entspräche dann auch der von der UBA-Ressourcenkommission vorgeschlagenen Substitutionsquote (UBA-Ressourcenkommission, 2019). Diese wäre vor allem ein geeigneter Indikator für die Versorgungssicherheit.

9 Indikatoren aus Produktperspektive und aus volkswirtschaftlicher Perspektive

Bei den vorausgehenden Betrachtungen standen die Produkt- und Prozessperspektive im Vordergrund, d. h. was ist mit einem Produkt und den darin enthaltenen Rohstoffen entlang seines Lebenszyklus passiert? Der zeitliche (wann wurde recycelt?) und räumliche Effekt des Recyclings bzw. der Kreislaufschließung (wo fand das statt?) ist bei dieser Betrachtung weniger relevant.

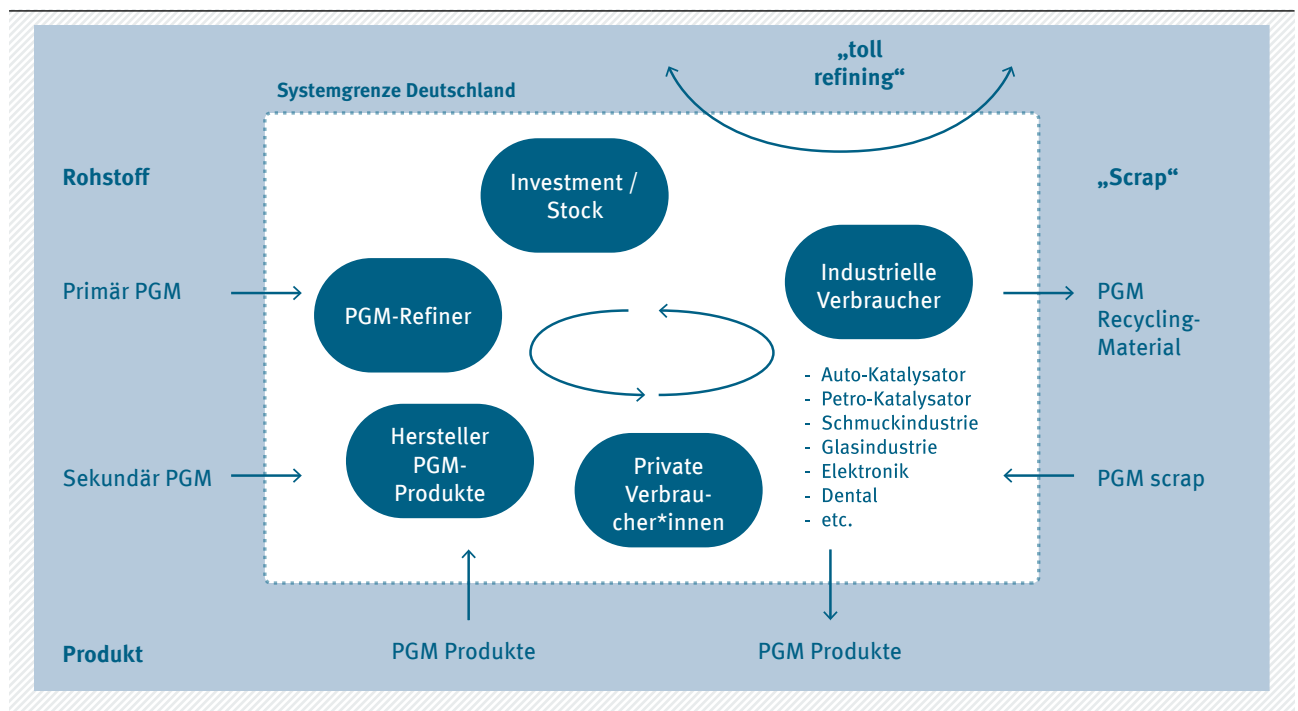
Diese Aspekte müssen allerdings aus volkswirtschaftlicher Sicht noch mitberücksichtigt werden. Die Systemgrenze ist dann nicht wie in Abbildung 4 produktzentrisch, sondern betrifft einen Wirtschaftsraum, wie z. B. Deutschland oder die EU, für den dann die Stoffflüsse für einzelne Rohstoffe betrachtet werden. Exemplarisch ist dies in Abbildung 5 für die Platingruppenmetalle (PGM) dargestellt.

Beide Perspektiven (Produktperspektive und volkswirtschaftliche Perspektive) sind wichtig und ihre Ergebnisse müssen für eine Maßnahmenableitung in Beziehung gesetzt werden. Die **Produkt- und Prozessperspektive** gibt z. B. Auskunft darüber, wie

recyclinggerecht die Produkte gestaltet sind, wie effektiv und leistungsfähig die eingesetzten Recyclingverfahren sind und wie viele der eingesetzten Rohstoffe am Produktlebensende zurückgewonnen werden – wo und wann immer dieses stattfindet. Dies kann sich auf einen definierten Wirtschaftsraum (z. B. Deutschland, Europa) beziehen, kann aber auch über diesen hinausgehen. Denn in der Praxis kommt es beim Recycling komplexer Produkte häufig und auch sinnvollerweise zu länderübergreifenden Stoffströmen. Das gilt vor allem für die Hüttenstandorte, die für einen technisch und wirtschaftlich optimierten Betrieb große Kapazitäten und vielfältige Inputströme benötigen. So recycelt z. B. Umicore am Standort Hoboken bei Antwerpen Leiterplatten, Katalysatoren und weitere metallhaltige Fraktionen aus weltweiten Bezugsquellen und gewinnt daraus als Lohnverhüttung 17 verschiedene Metalle zurück (Hagelüken, 2006; UNEP, 2013). Da die zurückgewonnenen Feinmetalle auch weltweit gehandelt und eingesetzt werden können, verringert sich dadurch entsprechend die globale Nachfrage nach Primärmetallen.

Abbildung 5

Systemische Betrachtung der Stoffströme der Platingruppenmetalle für den Wirtschaftsraum Deutschland



PGM: Platingruppenmetalle

Quelle: Hagelüken et al., 2005

In der **volkswirtschaftlichen Perspektive** stehen Versorgungssicherheit und Beiträge der Kreislaufwirtschaft zu Ressourceneffizienz und Klimaschutz für den eigenen Wirtschaftsraum im Vordergrund. Wichtig sind hier also, über die zuvor genannten Aspekte hinaus, der Umfang des anthropogenen Materiallagers¹³ in der Nutzung und der absolute Beitrag des Recyclings zur Rohstoffversorgung im Wirtschaftsraum bzw. die Zugriffsmöglichkeiten auf die recycelten Rohstoffe¹⁴. Wichtige Faktoren aus dieser Perspektive sind die Exporte von EoL-Produkten bzw. relevanten Abfallfraktionen und die Importe von solchen für das Recycling innerhalb des Wirtschaftsraumes.

13 Masse der innerhalb eines Wirtschaftsraumes gebundenen Rohstoffe in Infrastruktur und Produkten; dies kann als volkswirtschaftliches Vermögen angesehen werden mit dem Potenzial des Recyclings am Lebensende.

14 Das Metallrecycling wird vielfach als sogenannte Lohnverhüttung („toll refining“) in Serviceleistung betrieben, die recycelten Metalle können dabei auch grenzüberschreitend dem Lieferanten von Recyclingmaterialien zur Verfügung gestellt werden.

10 Empfehlungen der Ressourcenkommission

I. Der Rahmen der Circular Economy (CE)

1. Die nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie muss sich im Sinne des Konzepts der CE einer **absoluten Senkung des Ressourcenverbrauchs** verpflichten, d. h. sie muss zu einer absoluten Senkung von Rohstoffinanspruchnahme und Umweltbelastung und gleichzeitig zur Wohlstandssicherung auf nationaler wie internationaler Ebene beitragen. Dies umfasst über die Kreislaufwirtschaft im engeren Sinne hinaus vor allem eine grundlegende Diskussion bisheriger Produkt- und Servicemodelle der Wirtschaft insgesamt.
2. Für die Zielorientierung der CE sind alle Maßnahmen mit **geeigneten Indikatoren auf der Leitzielebene zu bewerten**. Operative Indikatoren für die Praxis müssen auf ihre Relevanz für diese Zielindikatoren überprüft werden. Dafür sind geeignete Systemgrenzen, Definitionen und Berechnungsmethoden für die zu verwendenden Indikatoren erforderlich.
3. Speziell das Recycling muss die **physische Kreislaufführung** von Rohstoffen, Materialien und Bauteilen ins Zentrum stellen, um dadurch primäre Rohstoffe zu ersetzen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Nutzen zu erhalten, Nachhaltigkeit zu gewährleisten und Importabhängigkeiten zu verringern.



II. Indikatoren(systeme) für das Recycling

4. Als operative Indikatoren für das Recycling werden in der derzeitige Abfallgesetzgebung die Recyclingraten bestimmter Abfälle auf Ebene von Produktkategorien genutzt (z. B. Elektroaltgeräte, Altfahrzeuge, Batterien). Diese Indikatoren sind unzulänglich, da sie nur auf die Masse bezogen sind und nur die abfallwirtschaftliche Erfassung und die erste Aufbereitung abbilden. Stattdessen sollten zusätzlich **operative Indikatoren für prioritäre einzelne Stoffe** festgelegt werden und als Systemrahmen die gesamte Prozesskette bis hin zum Wiedereinsatz als Sekundärrohstoff umfassen. Mit so definierten Indikatoren für Materialkreisläufe kann überprüft werden, dass marktfähige Outputmaterialien in einer Qualität vorliegen, die zu einem Wiedereinsatz für die Herstellung von gleichwertigen Neuprodukten führt. Der Entwurf der *EU Battery Regulation* kann als positives Beispiel für geeignete Systemgrenzen, Indikatoren sowie Definitionen und Berechnungsverfahren für Recyclingraten herangezogen werden.
5. Die produktspezifische **EoL-Recyclingrate** ist ein guter Indikator für den Grad der Zirkularität eines bestimmten Rohstoffs in einer bestimmten Anwendung. Ebenso ist der Indikator **Recycled Content** (Inhalt von recyceltem Material im Rohmaterial) ein wichtiger Indikator für größere Wirtschaftssysteme, z. B. für die Angabe, welcher Anteil an Recyclingrohstoffen in einem bestimmten Wirtschaftsraum oder einer Produktgruppe eingesetzt wird. Bei Verwendung dieses Indikators ist aber zu berücksichtigen, dass er für wachsende Märkte (wie aktuell z. B. Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität) nur bedingt als CE-Indikator für einzelne Rohstoffe geeignet ist, da hier zunächst EoL-Produkte entstehen müssen, bevor diese recycelt werden können. Deswegen ist in solchen stark wachsenden Märkten der Recycled Content i.d.R. deutlich kleiner als die EoL-Recyclingrate. Das Beispiel der wachsenden Märkte zeigt auch, dass operative Indikatoren für das Recycling in eine langfristige strategische Sicht des Ressourcenverbrauchs in unterschiedlichen Sektoren der Wirtschaft eingebettet sein müssen, unter Berücksichtigung gesellschaftlich gewünschter Transformationen wie aktuell im Falle des Energiesystems.

III. Verbesserung des Recyclings innerhalb der Circular Economy (CE)

Die nachfolgenden Empfehlungen wurden nicht explizit in diesem Papier erarbeitet, ergeben sich aber implizit aus den zuvor beschriebenen Zielsetzungen und Ansätzen. Sie werden hier deswegen nur stichpunktartig genannt.

6. Wichtig sind geeignete Maßnahmen zur **umfassenden Erfassung besonders ressourcenrelevanter EoL-Produkte** (Elektronikprodukte, Fahrzeuge, Batterien). Nach Durchlaufen der R-Strategien bis zum EoL muss sichergestellt werden, dass diese Produkte nach der Sammlung auch tatsächlich qualitativ hochwertigen Recyclingpfaden zugeführt werden.
7. In diesem Kontext ist die Einführung **verpflichtender Standards** für das hochwertige Recycling solcher komplexer, ressourcenrelevanter Produktgruppen erforderlich. Durch die Kanalisierung der Abfallströme zu nach diesen Standards zertifizierten Anlagen kann ein fairer Wettbewerb gegenüber Prozessen mit nicht konformen (und deswegen oft kostengünstigeren) Umwelt- und Arbeitsstandards sowie schlechteren realisierten Recyclingraten gewährleistet werden.
8. Notwendig sind Maßnahmen zur **Erhöhung der Transparenz** über die realen Stoffströme am EoL, z. B. über Produktpässe, leistungsfähige Tracking- und Tracing- Systeme, oder auch über eine verbesserte Verknüpfung verschiedener Statistiken¹⁵. Sie ermöglichen eine besseren Kontrolle der Abfallströme und – im Zusammenspiel mit einer Stärkung der Vollzugsorgane – auch die Beschränkung von illegalen und dubiosen Exporten solcher EoL-Produkte aus dem EU Raum heraus zu „Recyclinganlagen“, die nicht den definierten Standards entsprechen.

IV. Voraussetzungen schaffen

9. Wichtig sind **Normierungen und Designvorgaben** für Zirkularität, die unter anderem eine verbesserte Zugänglichkeit rohstoffrelevanter Komponenten (z. B. Batterien) gewährleisten und dadurch sowohl Reparaturen zur Nutzungsverlängerung als auch ein verbessertes Material- und Metallrecycling ermöglichen.
10. Verbesserte **Rahmenbedingungen für zirkuläre Geschäftsmodelle** (z. B. Leasing- und Sharing-Modelle) und Anpassung der Produzentenverantwortung (EPR) im EU Kontext.

V. Umsetzung ermöglichen

11. Verstärkte Aufnahme von CE und Recycling in die **universitäre Ausbildung**, auch als Bestandteil etablierter Studiengänge wie Chemie, Materialwissenschaft, Ingenieurwissenschaften oder Wirtschaftswissenschaften.
12. **Förderprogramme** für systemische CE Ansätze, mehr Kombination/Integration von technischen, ökologischen und wirtschaftswissenschaftlichen Ansätzen (inkl. Entwicklung von Rahmenbedingungen für zirkuläre Geschäftsmodelle).

¹⁵ Z. B. bei Fahrzeugen zwischen den Lösungsdaten des Kraftfahrzeugbundesamtes und den Angaben zur Altkaroverwertung und zu Altkarautoexporten

Literatur

- CEID, 2020, *Ressourcenschonende Batteriekreisläufe – mit Circular Economy die Elektromobilität antreiben*, acatech/Circular Economy Initiative Deutschland (CEID)/SYSTEMIQ (<https://www.circular-economy-initiative.de/ressourcenschonende-batteriekreisluefe-mit-circular-economy-die-elektromobilita-antreiben>) accessed 25 November 2022.
- Circle Economy, 2022, *Circularity Gap Report 2022*, Platform for Accelerating the Circular Economy (PACE). (<https://www.circularity-gap.world/2022>) accessed 25 November 2022.
- EC, 2015, *Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy*, Communication from the Commission COM No 614.
- EC, 2020a, *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020*, No COM(2020) 798 final, European Commission (EC) (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020PC0798>).
- EC, 2020b, *Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020): Critical Raw Materials Factsheets (Final)*, European Commission (EC), Brussels (<https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42883/attachments/2/translations/en/renditions/native>) accessed 10 September 2020.
- Hagelüken, C., et al., 2005, *Stoffströme der Platingruppenmetalle*, Endbericht (FKZ 02WU0239), GDMB Medienverlag, Clausthal-Zellerfeld.
- Hagelüken, C., 2006, 'Recycling of electronic scrap at Umicore's integrated metals smelter and refinery', *World of Metallurgy* 59(3), pp. 152-161.
- Hagelüken, C. and Goldmann, D., 2022, 'Recycling and circular economy—towards a closed loop for metals in emerging clean technologies', *Mineral Economics* 35(3), pp. 539-562 (DOI: 10.1007/s13563-022-00319-1).
- Helbig, C., et al., 2022, 'A terminology for downcycling', *Journal of Industrial Ecology* 26(4), pp. 1164-1174 (DOI: 10.1111/jiec.13289).
- IRP, 2020, *Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future*, A report of the International Resource Panel. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya (<https://www.unenvironment.org/resources/report/resource-efficiency-and-climate-change-material-efficiency-strategies-low-carbon>) accessed 1 June 2020.
- Kullik, J., 2022, *Zeitenwende heißt auch Rohstoffwende: Warum Rohstoffsicherheit ein Teil der neuen Nationalen Sicherheitsstrategie Deutschlands werden sollte*, BAKS Arbeitspapiere 5/22, Bundesakademie für Sicherheitspolitik (BAKS) (<https://www.baks.bund.de/de/arbeitspapiere/2022/zeitenwende-heisst-auch-rohstoffwende-warum-rohstoffsicherheit-ein-teil-der>) accessed 25 November 2022.
- Mancini, L. and Sala, S., 2018, 'Social impact assessment in the mining sector: Review and comparison of indicators frameworks', *Resources Policy* 57, pp. 98-111 (DOI: 10.1016/j.resourpol.2018.02.002).
- Meinert, L. D., et al., 2016, 'Mineral resources: Reserves, peak production and the future', *Resources* 5(1), p. 14 (DOI: <https://doi.org/10.3390/resources5010014>).
- Reuter, M. A., et al., 2019, 'Challenges of the circular economy: a material, metallurgical, and product design perspective', *Annual Review of Materials Research* 49, pp. 253-274.
- Schmidt, M., 2021, 'The Resource-Energy Nexus as a Key Factor for Circular Economy', *Chemie Ingenieur Technik* 93(11), pp. 1707-1716 (DOI: 10.1002/cite.202100111).
- Schoch, K., et al., 2021, 'Designing on the Basis of Recycling-Metallurgy Possibilities: Material-Specific Rules and Standards for "Anti-Dissipative" Products', *Resources* 10(1), p. 5 (DOI: 10.3390/resources10010005).
- UBA, 2012, *Glossar zum Ressourcenschutz*, Umweltbundesamt (UBA) (<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/glossar-ressourcenschutz>) accessed 21 December 2022.
- UBA-Ressourcenkommission, 2019, *Substitutionsquote: Ein realistischer Erfolgsmaßstab für die Kreislaufwirtschaft*, Ressourcenkommission am Umweltbundesamt (<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/substitutionsquote-ein-realistischer>).
- UNEP, 2011, *Recycling Rates of Metals – A Status Report*, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel, United Nations Environment Programme (UNEP), Paris (http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals_Recycling_Rates_110412-1.pdf) accessed 23 July 2014.
- UNEP, 2013, 'Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Reuter, M. A.; Hudson, C.; van Schaik, A.; Heiskanen, K.; Meskers, C.; Hagelüken, C.'
- UNEP, 2019, 'UN Environment International Resource Panel Global Material Flows Database'.



► **Unsere Broschüren als Download**
Kurzlink: bit.ly/2dowYYI

 www.facebook.com/umweltbundesamt.de
 www.twitter.com/umweltbundesamt
 www.youtube.com/user/umweltbundesamt
 www.instagram.com/umweltbundesamt/