

Datenanforderungen für die erfolgreiche Kreislaufwirtschaft

Metallkreisläufe und Datenlücken zum Recycling – Eine Analyse zur aktuellen Datenlage

Autor*innen UBA alphabetisch: Andreas Kahrl, Regina Kohlmeyer, Christian Lehmann, Felix Müller, Philip Nuss, Kristine Sperlich

Autor*innen DERA/BGR alphabetisch: Britta Bookhagen, Carolin Kresse, Michael Liesegang, Paul Mählitz, Martin Schmitz

Zitiervorschlag: Müller, F., Bookhagen, B., Lehmann, C., Mählitz, P., Kahrl, A., Schmitz, M., Kohlmeyer, R., Liesegang, M., Sperlich, K., Kresse, C., Nuss, P.: Datenanforderungen für die erfolgreiche Kreislaufwirtschaft - Metallkreisläufe und Datenlücken zum Recycling – eine Analyse zur aktuellen Datenlage. Umweltbundesamt & DERA. Dessau-Roßlau, Berlin. 2025.

DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-8187>

Abstract

Die Kreislaufwirtschaft (engl. Circular Economy) ist ein wichtiger Bestandteil des European Green Deals und des neuen Clean Industrial Deals der Europäischen Union. Ziel ist eine nachhaltigere Wirtschaftsweise, die durch Wachstum, Ressourceneffizienz, Klimaneutralität, Wettbewerbsvorteile und die Reduzierung von Rohstoffabhängigkeiten und für die Wirtschaft sowie nachhaltigere Produkte geprägt ist. Die Bundesregierung hat 2024 eine Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) verabschiedet, die alle Ziele und Maßnahmen der Bundesregierung zum zirkulären Wirtschaften über alle Funktionsbereiche des Wertschöpfungskreislaufs bündeln soll. Festgeschrieben in europäische und nationale Strategien und Gesetze werden Ziele formuliert, welche mit Maßnahmen und Indikatoren unterlegt werden. Insbesondere auch der Critical Raw Materials Act (CRMA) der EU setzt eine Reihe von Benchmarks und Berichtsaufgaben für die Mitgliedsländer fest, die in den nächsten Jahren zu erfüllen sind. Hierzu gehört das Ziel zur Erreichung einer Recyclingkapazität von 25 % für strategische Rohstoffe innerhalb der EU. Zur Abbildung derartiger Ist- und Soll-Zustände von Stoffkreisläufen bedarf es neuer Informationen und Daten entlang der jeweiligen Wertschöpfungsketten, welche derzeit noch nicht vorliegen. Auch im Hinblick auf die NKWS lassen sich die Wirkungen von Maßnahmen auf den Stoffhaushalt und spezifische Stoffflüsse bislang nicht oder nur unzureichend bewerten.

In diesem Papier bewerten die Fachebenen der oberen Bundesbehörden Umweltbundesamt (UBA) und Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) die Datenlage für Metalle systematisch.

Der Fokus liegt dabei im Besonderen auf der Erfassung und Bilanzierung von Sekundärrohstoffen, der Effektivität des Recyclings mit Blick auf erzeugte Mengen und Qualitäten sowie deren Wiedereinsatz. Hierzu werden die neuen Anforderungen zum zirkulären Wirtschaften dargelegt und erläutert (Kap. 1). Weiterhin werden ein Referenzschema zur Diskussion der notwenigen Komplexität eines metallischen Stoffflusssystems vorgestellt und kategorisch Datenquellen qualitativ bewertet (Kap. 2). Anhand der zwei repräsentativen Rohstoffe Aluminium (Basismetall) und Kobalt (Technologiemetall) wird in Fallstudien aufgezeigt, wie die Abbildung des Stoffkreislaufes mit den bekannten Datenquellen und Qualitätskriterien möglich ist. Basierend auf den Ergebnissen und der Fachexpertise der Autor*innen werden Rückschlüsse auf die generelle Datenlage zur Beschreibung von Metallkreisläufen abgeleitet und ein Fazit zur Datensituation gezogen (Kap. 3). Abschließend werden Lösungsansätze beschrieben, die eine Verbesserung der Datenlage und Datenverfügbarkeit in Abstimmung mit den relevanten Interessengruppen aussichtsreich erscheinen lassen (Kap. 4).

Mit dem zirkulären Wirtschaften gehen neue Anforderungen an Daten einher, die unterschiedlichen Erwartungen gerecht werden müssen: der Ermöglichung von vorausschauenden Investitionen in Anlagenkapazitäten, der Verringerung von Umweltwirkungen, der Erhöhung der Versorgungssicherheit sowie dem Leisten eines Beitrags zur gesellschaftlichen Daseinsvorsorge für jetzige und zukünftige Generationen. Hierzu werden ausreichend differenzierte und valide Daten zu Stoffflüssen und Materialbeständen benötigt. Die zur Verfügung stehende Datenbasis für Metalle wird diesen Anforderungen derzeit teilweise nicht gerecht. Die Herausforderungen bestehen einerseits in fehlenden oder nicht verfügbaren relevanten Daten und damit einer Mess- und Vergleichbarkeit. Andererseits sind die für die Metrik notwendigen Definitionen teilweise widersprüchlich. Einige relevante Daten sind hingegen vorhanden und werden bereits im Zuge von gesetzlichen Verpflichtungen wie der Nachhaltigkeitsberichtserstattung oder dem CO₂-Grenzausgleichsmechanismus (CBAM) erhoben. Jedoch werden diese bislang nicht für Belange der Kreislaufwirtschaft ausgewertet. Geht man klug bündelnd vor, lässt sich dies ändern. Im Sinne des Once-Only Prinzips sowie von Omnibus-Paketen, die von der EU im Arbeitsprogramm bis 2029 vorgesehen sind, kann eine bürokratiearme und redundanzfreie Erhebung gewährleistet werden. Dies erlaubt es im Einklang mit der NKWS strategische Maßnahmen zur Förderung des zirkulären Wirtschaftens zu entwickeln, die Sekundärrohstoffwirtschaft zu stärken und die sich daraus ergebenden Erfolge zu messen, ohne der Wirtschaft weitere bürokratische Pflichten aufzuerlegen.

Anhand der in diesem Papier aufgezeigten Struktur von metallischen Stoffflusssystemen in Zusammenfassung mit den verfügbaren Datenquellen und deren Auswertung soll es möglich werden, die Datenbasis gezielt auszubauen und zu verbessern.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	4
1 Neue Anforderungen an die Datenbasis zum zirkulären Wirtschaften	5
2 Status Quo: Datenquellen für Recyclingstoffströme	8
2.1 Referenzschema zur Beschreibung von Stoffkreisläufen	8
2.2 Datenquellen zur Erhebung von Stoffströmen im Recyclingsystem.....	12
2.2.1 Amtliche Statistiken	12
2.2.2 Daten kommerzieller Anbieter	14
2.2.3 Branchenstatistiken	14
2.2.4 Weitere Studien, Datenaufbereitungen und Modellierungen.....	14
2.2.5 Individuelle Expertise	15
2.3 Zusammenfassende Einschätzung der Datenquellen.....	15
3 Datenbasis am Beispiel relevanter Industriemetalle.....	17
3.1 Rückschlüsse auf die allgemeine Datenlage	17
3.2 Fazit zur Datensituation.....	20
4 Wie kann die Datenbasis verbessert werden und was folgt daraus?	22
4.1 Terminologie und Nomenklaturen schärfen und etablieren.....	22
4.2 Amtliche Statistiken in Zusammenschau denken und hinsichtlich der Materialkreisläufe besser auswerten	23
4.3 Gezielte Datenerhebungen prüfen.....	24
4.4 Bessere Bestimmung von Rohstoffpotenzialen in verschiedenen Abfallströmen.....	26
4.5 Weitere Informationsgrundlagen mit systemischen Datenmodellierungen erschließen ..	27
4.6 Neue Datenquellen integrieren	27
4.7 Anthropogene Lagerdynamik abbilden und Prognostik zum Urban Mining liefern	29
4.8 Datenbereitstellung verbessern	30
4.9 Zugriffsrechte auf Daten unter Wahrung der Interessen aller Beteiligten.....	30
A Anhang	31
A.1 Aluminium - Fallstudie zur Datensituation	31
A.2 Kobalt – Fallstudie zur Datensituation	34
Literaturverzeichnis.....	38
Impressum.....	42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Schema einer produkt- und technologiezentrischen Kreislaufwirtschaft.....	7
Abbildung 2	Referenzschema eines spezifischen Metall-Materialsystems mit relevanten Stoffströmen und Beständen.....	10
Abbildung 3	Referenzschema mit relevanten Recyclingindikatoren.....	11
Abbildung 4	Gesamtbewertung der Datenverfügbarkeit für Metallstoffströme.....	17
Abbildung 5	Datenverfügbarkeit der Aluminiumstoffflüsse	32
Abbildung 6	Datenverfügbarkeit der Kobalt-Stoffflüsse	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Bewertung der aktuell verfügbaren Datenquellen zu recyclingrelevanten Fragestellungen nach sechs statistischen Qualitätskriterien.....	16
Tabelle 2	Erkenntnisse zur allgemeinen Datenlage für Metallkreisläufe	18

1 Neue Anforderungen an die Datenbasis zum zirkulären Wirtschaften

Mit dem European Green Deal verfolgt die Europäische Union eine nachhaltige Wachstumsstrategie, die zu einer klimaneutralen Wirtschaft bis 2050 unter Erhalt der Biodiversität und natürlichen Umwelt führen soll [1]. Gelingen soll dies vor allem mit dem Aufbau einer Kreislaufwirtschaft, in der der Wert von Produkten, Materialien und Ressourcen so lange wie möglich erhalten bleibt. Um die Umsetzung des Green Deals zu erleichtern, hat die Europäische Kommission einen Clean Industrial Deal vorgestellt, der bis 2029 insbesondere die Rolle einer international wettbewerbsfähigen Industrie in den Vordergrund stellt. Dekarbonisierung und Kreislaufwirtschaft sind dabei die grundlegenden Ausrichtungen [2]. Als einer der wichtigsten Bausteine zur Kreislaufwirtschaft gilt der 2. EU Kreislaufwirtschaftsaktionsplan (Circular Economy Action Plan) von 2020 [3]. Im Zuge des Clean Industrial Deals wurde bereits ein European Steel and Metals Action Plan [4] vorgestellt, der sich dezidiert der Angebots- und Nachfragsteigerung für Rezyklate widmet. Für 2026 wird ein weitreichender europäischer Circular Economy Act angekündigt.

Die Operationalisierung der Kreislaufwirtschaft¹ mit Ansätzen einer zirkulären Wirtschaftsweise schlägt sich in vielschichtigen Hierarchien [5] über gesamte Produkt- und Materiallebenszyklen nieder. Dabei kommt dem Recycling am Ende dieser Abfolgen als anzustrebende stoffliche Verwertungsoption eine besondere Rolle zu [6]. Denn das Recycling bildet das unabdingbare Bindeglied zu möglichst geschlossenen Stoffkreisläufen in der Volkswirtschaft mit allen angestrebten wirtschaftlichen und ökologischen Entlastungseffekten (vgl. zirkuläres Schema in Abbildung 1). Dazu zählen u.a. gesteigerte inländische Wertschöpfung, Versorgungs- und Rohstoffsicherheit sowie wesentliche Beiträge zum Klima- und Umweltschutz. Insbesondere, wenn Dekarbonisierung und Defossilisierung gelingen sollen, muss die Produktion auf Sekundärrohstoffe² zurückgreifen können. Dafür muss neben der Quantität des Recyclings auch die Qualität in den Blick genommen werden [7].

Rechtliche Vorgaben und Zielsetzungen

Das Recycling und der Wiedereinsatz von Rezyklaten im Sinne einer Substitutionsquote[8] sind ganz wesentliche, neue Gestaltungsansätze in Rechtsakten wie der neuen EU-Batterieverordnung [9], dem Gesetz über kritische Rohstoffe (Critical Raw Materials Act/CRMA) [10] oder der derzeit noch erarbeiteten Neuregelung der EU-Altfahrzeugverordnung. Neu sind dabei nicht grundsätzlich Sammel- und Recyclingziele, die ambitionierter werden, sondern deren material- und elementscharfe Auslegung – wie im Falle von Batterierohstoffen – und die Verknüpfung mit neuen Zielwerten für den Einsatz von Rezyklaten in den betreffenden Produkten. Damit werden tatsächlich Stoffkreisläufe - über einen betrachteten Produktlebenszyklus hinaus - in den Blick genommen, um mit dem Einsatz von Sekundärrohstoffen Primärrohstoffe und natürliche Ressourcen insgesamt zu schonen. Gleichsam werden Anreize für die Berücksichtigung der Recy-

¹ Der Begriff „Kreislaufwirtschaft“ wird hier im Sinne der Nationalen-Kreislauf-Wirtschafts-Strategie (NKWS) und des EU- Kreislaufwirtschaftsaktionsplan verwendet und umfasst demnach alle Phasen der Wertschöpfung – von der Produktgestaltung und Produktion bis hin zu Verbrauch, Reparatur, Abfallbe- wirtschaftung und sekundären Rohstoffen, die in die Wirtschaft zurückgeführt werden. Die Begriffe Circular Economy und zirkuläres Wirtschaften sind synonym. In Deutschland gibt das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) eine rechtliche Definition: „Kreislaufwirtschaft im Sinne dieses Gesetzes sind die Vermeidung und Verwertung von Abfällen“, KrWG § 3 (19). Dieser engere Begriff ist miteingeschlossen, aber nur ein Teil des umfassenden Ansatzes und deshalb hier nicht gemeint.

² Sekundärrohstoffe erstrecken sich auf Abfälle, industrielle Nebenprodukte und auch aus solchen hervorgehende gering oder unverarbeitete Produkte. Die Bezeichnung beinhaltet keine Nachrangigkeit gegenüber Primärrohstoffen. Der teilweise synonym verwendete Begriff „Recyclingrohstoff“ umfasst in diesem Papier all jene Sekundärrohstoffe, die ein Recycling erfahren.

clingfähigkeit im Design gesetzt, indem beispielsweise auf schwer trennbare Verbundmaterialien verzichtet wird. Auch im Monitoring-Framework der EU zur Kreislaufwirtschaft liegt das Hauptaugenmerk derzeit auf Indikatoren der Abfallbewirtschaftung gerade nicht nur beim Aufkommen, sondern vor allem auch beim Recycling, dem Sekundärrohstoffeinsatz, Selbstversorgungsraten, Importabhängigkeiten und gesamtwirtschaftlichen Relationen[11]. Prominent ist dabei die Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe (Circular Material Use Rate / CMUR), welche 2022 in der EU-27 bei 12 % und in Deutschland bei 13 % lag. Diese bildet für den inländischen Gesamtrohstoffbedarf den Anteil ab, der durch Recycling gespeist wird und soll von 2021 bis 2030 verdoppelt werden[3]. Neben der CMUR wird im Monitoring zur EU-Kreislaufwirtschaft auch der Beitrag der recycelten Materialien zur Rohstoffnachfrage (Recycling-Input-Rate am Ende des Lebens / EOL-RIR) für einzelne Rohstoffe alle drei Jahre für die EU-27 berichtet.

Auf nationaler Ebene sind die Rolle des Recyclings und des Sekundärrohstoffeinsatzes gleichermaßen hoch aufgehängt. So bildeten sie bislang eine von drei Säulen der deutschen Rohstoffstrategie zur Sicherung der Rohstoffversorgung [12] und finden sich in zahlreichen Maßnahmen und dem Indikatorensystem des Ressourceneffizienzprogramms ProgRess III [13] wieder. Vor allem sind sie unmittelbar mit dem Zielsystem der im Dezember 2024 verabschiedeten Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS)[14] verknüpft. Diese sieht die Verbesserung der Recyclingfähigkeit, des Recyclings an sich zu hohen Materialqualitäten sowie die Förderung des Rezyklateinsatzes in inländischer Produktion und Produkten in allen Handlungsfeldern als Gestaltungsansätze vor. Bei den Zielen bekräftigt sie zum Schließen von Stoffkreisläufen die europäischen Vorgaben wie der Verdopplung der Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe (CMUR) bis 2030 oder auch die Steigerung der Selbstversorgungsraten einzelner kritischer und strategischer Metalle. Auch wird explizit das Ziel gesetzt, relevante Datenlücken zum Import und Export von Produkten mit kritischen Rohstoffen einschließlich der in Halb- und Fertigwaren enthaltenen kritischen Rohstoffe bis 2030 zu schließen. Weiterhin zielt die NKWS auf eine deutliche Senkung des Rohstofffußabdrucks (Raw Material Consumption / RMC) und damit die Verringerung der Pro-Kopf-Primärrohstoffanspruchnahme bis 2045 ab. Der Sekundärrohstoffeinsatz trägt neben anderen Strategien wesentlich dazu bei [15, 16].

Datenlücken

Mit den genannten Politikprogrammen, Rechtssetzungen und zahlreichen darüberhinausgehenden Kreislaufwirtschaftsstrategien einzelner Regionen und Branchen werden wegweisende, innovative Impulse zum zirkulären Wirtschaften gegeben. Allerdings klafft derzeit eine große Lücke zwischen den Formulierungen von Programmen mit Zielsetzungen und Maßnahmen einerseits und deren möglicher Erfassung, Bilanzierung und des Monitorings andererseits. Die Datenverfügbarkeit kann momentan nicht Schritt halten.

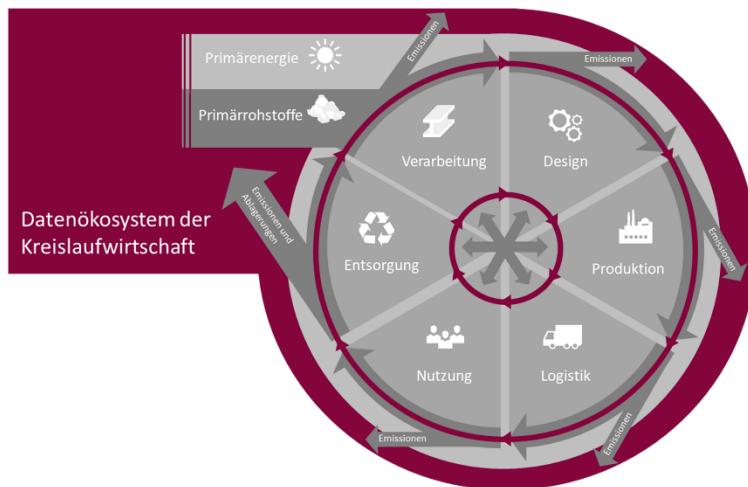
„You can't manage what you can't measure“ lautet eine Maxime des betrieblichen Managements³, die auch für Kreislaufwirtschaftspolitik und insbesondere das Recycling gilt. Dies ist in dreierlei Hinsicht problematisch:

1. Der tatsächliche, aktuelle Zustand lässt sich nur unzureichend erfassen – „Wir wissen vielfach nicht, wo wir stehen!“ – Dennoch werden bereits Ziele gesetzt.
2. Die vorhandenen Daten reichen zur sicheren Ableitung von Zielen bzw. Szenarien und für das Monitoring der Zielerreichung nicht aus.
3. Mit der bisherigen Datengrundlage ist es kaum möglich, gezielt strategische Behandlungs- und Aufbereitungskapazitäten zum Recycling zu entwickeln sowie realistische Ziele für den Rezyklateinsatz abzuleiten.

³ Diese wird dem Ökonomen und Managementdenker Peter F. Drucker zugeschrieben.

Die verlässliche Bereitstellung von Daten zu aktuellen und prognostizierten Materialflüssen könnte einen essenziellen Erfolgsfaktor für die Wirtschaft darstellen, indem gezielter in Anlagenkapazitäten der Sekundärrohstoffwirtschaft investiert, die Versorgungs-, Planungssicherheit und Wettbewerbsfähigkeit im produzierenden Gewerbe durch Sekundärrohstoffe gesteigert und Kosten gesenkt werden können. Denn um Produkt- und Materialkreisläufe zu schließen, dabei Wirtschaftsbereiche und Akteure kooperativ zu verbinden - zeitlich und räumlich - sind nicht nur Stoff- und Energieflüsse erforderlich, sondern vor allem auch Datenflüsse, deren Informationsgehalt sich in relevanten, verlässlichen, regelmäßig berichteten Indikatoren widerspiegelt. Diese Datenflüsse erstrecken sich einerseits entlang der Material- und Energieflüsse bzw. deren Produkten und andererseits zwischen den Funktionsbereichen wie Produktion, Nutzung und Entsorgung – produkt- und materialübergreifend. Materialsysteme erfahren praktisch viele Zu- und Abflüsse und sind vor allem bei Verwertung und Recycling miteinander verschnitten. Folglich ist zum erfolgreichen zirkulären Wirtschaften auch ein neues, integriertes Datenökosystem als Betrachtungs- und Auswertungsebene erforderlich (S. Abbildung 1). Die Kreislaufwirtschaft erfordert zur quantitativen und insbesondere zur qualitativen Steigerung des Recyclings eine eigene, wesentlich tiefer als bislang gegliederte Datenbasis, dazu Erfassungs- und Darstellungskonzepte für Indikatoren, die so noch nicht zufriedenstellend existieren, um tatsächlich dem Zielsystem zu entsprechen und die Potenziale einer zirkulären Wirtschaftsweise im Sinne des European Green Deals, des Circular Economy Action Plans, des Clean Industrial Deals und der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie auszuschöpfen. Die derzeitige Datenlage ist nicht ausreichend.

Abbildung 1 Schema einer produkt- und technologiezentrischen Kreislaufwirtschaft



Quelle: Eigene Abbildung nach [17]

2 Status Quo: Datenquellen für Recyclingstoffströme

2.1 Referenzschema zur Beschreibung von Stoffkreisläufen

Die Beschreibung und nähere Betrachtung von Materialkreisläufen der Metalle erfolgt in diesem Papier anhand eines Referenzschemas (Abbildung 2). Dieses stellt die Prozesse und Stoffflüsse (a) bis (t) entlang eines Kreislaufschemas mit typischen Funktionsbereichen und Prozessen dar.

Grundsätzliches zu Stoffmengen und Konzentrationen

Grundsätzlich verändern sich die Konzentrationen und Qualitäten eines Stoffes durch die Prozesse der Verhüttung/Raffination und Halbzeugproduktion bis hin zur Produktherstellung durch Verarbeitung. Am Beginn der Wertschöpfungskette im Erz liegen Metalle in Gesteinen, gebunden an Wertminerale, in einem Gemenge mit gesteinsbildenden Mineralen vor und werden durch Aufbereitung und Raffination aufkonzentriert. Im Ergebnis liegen sie dann in Reinform oder gebunden in einer Legierung vor. Durch Herstellung von Halbzeugen und vor allem Endprodukten verdünnt sich der Metallgehalt in der Regel wieder. Im Abfallstrom nimmt die Materialvielfalt schließlich durch die Heterogenität der Altprodukte bei der Sammlung typischerweise ihr Maximum an, was für die anschließende Aufbereitung bis hin zum Recycling meist mit einem hohen Aufwand verbunden ist, um die Wertelemente jeweils wieder zu trennen, bzw. anzureichern (Bspw. Gold und Zinn in Elektroaltgeräten, die sich dort vor allem in Leiterplatten befinden [18]). Im- und Exporte (t) beeinflussen die verfügbaren Mengen entlang des gesamten Materialzyklus. So findet ein Außenhandel in der Regel mit allen Verarbeitungs-, Produkt- und Schrottqualitäten statt und muss daher im jeweiligen Aggregat betrachtet werden. Dabei kann der Saldo entlang des Materialzyklus nicht nur insgesamt sondern auch zwischen den verschiedenen Verfahrensschritten unterschiedliche Vorzeichen aufweisen, also sowohl mit Export- als auch mit Importüberschüssen einhergehen [19, 20].

Erläuterung des Stoffflusssystems

Zur Herstellung eines Endproduktes werden zunächst Metalle raffiniert (b) und zu Halbzeugen (c) verarbeitet. Hierbei können sowohl Primärrohstoffe (a) als auch Sekundärrohstoffe (j, m) verwendet werden. Außerdem werden in der Raffination und Halbzeugproduktion auch Stoffströme als interne Kreislaufmaterialien geführt, auf die hier aber nicht näher eingegangen wird. Es ist zu beachten, dass in Deutschland derzeit so gut wie kein Bergbau auf Metallerze mehr stattfindet (a*) und Erze bzw. vor allem ihre Konzentrate vollständig importiert werden müssen.

Die Produkte gelangen anschließend in die Verwendung (u). Die Verwendung umfasst vor allem die Materialbindung von Metallen im anthropogenen Lager, das sich aus langlebigen Gütern konstituiert, mit entsprechenden Zu- und Abflüssen (s) [21]. Viele Metalle gelangen dabei erst stark zeitversetzt zum Inverkehrbringen ins Recycling, im Gegensatz zu kurzlebigen Gütern wie Verpackungen.⁴ Wann bestimmte Produkte mit ihrer stofflichen Zusammensetzung als Abfall anfallen und damit potenziell einem Recycling zur Verfügung stehen, hängt von der Verweildauer im anthropogenen Lager ab. Diese Verweildauer umfasst sowohl aktive Nutzungsdauern – ggf. verlängert durch Wiederverwendungen - als auch die Dauer inaktiven Verbleibs im Nutzungsraum, beispielsweise für stillgelegte Infrastrukturen oder aufbewahrte, aber nicht mehr genutzte Produkte [22].

⁴ Für eine ressourcenschonende Kreislaufwirtschaft sind lange Nutzungsdauern unter Ausnutzung von Reparatur, Ertüchtigung und Wiederverwendung ökologisch erstrebenswert und sollten vor dem Recycling ausgeschöpft werden.

Recycling und Sekundärrohstoffwirtschaft – ein komplexes System

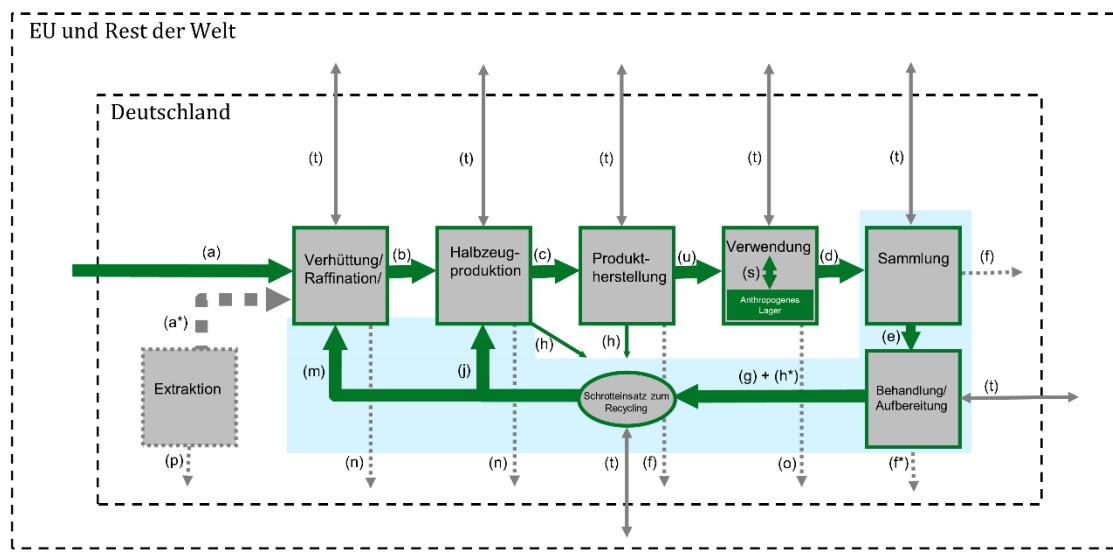
Am Ende der Verweildauer im Nutzungsraum werden die Metalle - enthalten in verschiedensten Produkten - im Abfallstrom durch Sammlung erfasst (d), über geeignete Verfahren behandelt und aufbereitet (e) und schließlich über den Schrotthandel (g) als End-of-Life-Schrotte für den Wiedereinsatz in der Produktion durch Recycling (j, m) zur Verfügung gestellt. Die Sekundärrohstoffwirtschaft (in Abbildung 2 hellblau hinterlegt) erstreckt sich in der Regel von der Sammlung über die Aufbereitung bis hin zum technischen Recycling - bei Metallen durch Wiedereinsatz in der Raffination und Halbzeugproduktion, zumeist durch Schmelzen. Darüber hinaus gelangen auch nennenswerte Mengen an Neuschrotten aus Produktion und Verarbeitung (h) in die Sekundärrohstoffwirtschaft und tragen zum Recycling in der Produktion bei (j, m). Diese erfahren je nach Sorte, Spezifikation und Sortenreinheit der Sammlung ebenfalls eine Aufbereitung und Vorkonfektionierung oder sie gehen direkt in die Produktion und Verarbeitung als Schrotte ein. Der Metallhandel und die Abfallwirtschaft erfassen und vermitteln diese Stoffflüsse. Um diesem Umstand gerecht zu werden, sind die Flüsse (h) im Schema als Eingang in die Sekundärrohstoffwirtschaft (hellblauer Kasten) deklariert. Ein Teil dieser wird dann gesammelt und/oder aufbereitet (als (h*) im Schema geführt). Das Recycling (j, m) kann sowohl funktional - also auf dem vorherigen Qualitäts- und Spezifikationsniveau - als auch nicht-funktional erfolgen. Letzteres ist der Fall, wenn die eingesetzten Schrotte nicht zur Produktion vergleichbar spezifizierter Legierungssorten eingesetzt werden [23, 24].

Materialverluste treten im ganzen Stoffflusssystem auf

Auf diesem Weg der Kreislaufführung kommt es zu vielfältigen Materialverlusten. Diese entstehen bereits upstream in der Produktion durch Abfälle im Bergbau (p), die auf Halden oder in Rückhaltebecken abgelagert werden⁵ sowie durch Prozessrückstände, Aschen und Schlacken bei der Herstellung (n). Weiterhin gehen die Metalle durch die inadäquate Erfassung von Abfallströmen – entweder nicht ordnungsgemäß oder materialfremd – aus Produktherstellung und von EOL-Abfällen nach der Verwendung (f) sowie durch Prozessineffizienzen bei Separation und Behandlung mit Verfrachtung in andere Abfallströme (f*) teilweise für ein Recycling verloren. Daselbe gilt für Stofffrachten, die während der Nutzungsphase – beispielsweise durch Korrosion – dissipativ verlorengehen, oder aber illegal entsorgt werden (o).

⁵ Bergbauhalden und Rückhaltebecken (p) sind möglicherweise durch technologische Nachbehandlung wieder für ein Recycling erschließbar, aber mit deutlich gesteigertem Aufwand, langfristigen Projektierungen angesichts der sehr individuellen Ablagerungscharakteristiken und großen wirtschaftlichen Risiken.

Abbildung 2 Referenzschema eines spezifischen Metall-Materialsystems mit relevanten Stoffströmen und Beständen



Legende

- (a) Eingang Erz / Primärmetall durch Import
- (a*) Eingang Erz / Primärmetall aus Inland
- (b) Raffinade
- (c) Zwischenprodukte/ Halbzeuge
- (d) Sammelmengen EOL
- (e) EOL- Stoffstrom zur Behandlung / Aufbereitung
- (f) Stoffstrom in inadäquater Verwertung
- (f*) Verluste durch Prozessineffizienzen
- (g) EOL-Stoffstrom in Recycling
- (h) Produktionsabfälle (in Sammlung/Aufbereitung/Behandlung oder unmittelbares Recycling)
- (h*) Sekundärrohstoffstrom der Produktion aus Behandlung/Aufbereitung im Recycling
- (i) Recycling in Halbzeugproduktion (Umschmelzschrött)
- (m) Recycling in Verhüttung/ Raffination/ Schmelze
- (n) Rückstände, Aschen und Schlacken aus Verhüttung/Raffination/ Schmelze und Halbzeugproduktion
- (o) Dissipative Verluste und inadäquate Entsorgung
- (p) Bergbauabfälle und -rückstände
- (u) Güter für inländische Verwendung
- (s) Zu- und Abflüsse anthropogenes Lager
- (t) Außenhandel (Im- und Exporte der jeweiligen Materialien nach Prozessschritt)
- Sekundärrohstoffwirtschaft**: Ein blauer Balken am unteren Rand des inneren Bereichs.

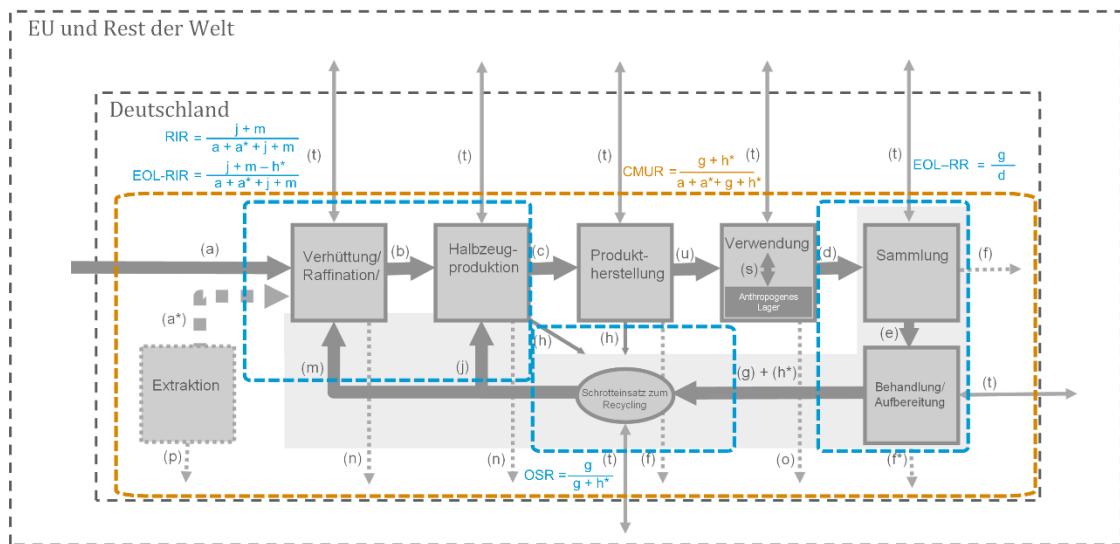
Quelle: Eigene Abbildung

Abbildung von Stoffflussindikatoren zum Recycling

Im Referenzschema lassen sich auch relevante Stoffflussindikatoren (vgl. Kapitel 1) verorten (Abbildung 3). Von besonderer Bedeutung für die Beschreibung und Bilanzierung des Recyclings sind die Recycling-Indikatoren „Recycled Content (RC)“ auf Produktebene, auf Prozessebene häufig auch „Recycling-Input-Rate (RIR)“ genannt sowie die „End-of-Life-Recycling-Rate (EOL-RR)“. Beide Indikatoren werden in einer Vielzahl von Veröffentlichungen zur Quantifizierung des Recyclings herangezogen [8, 25]. Während die RIR bzw. der RC den Anteil von Sekundärrohstoffen in der Produktion und Produkten beschreiben und somit den Einsatz verfügbarer Mengen darstellen (teilweise noch konkreter als Ausweisung der Anteile an Altschrotten mithilfe der EOL-RIR), wird die EOL-RR zur Bewertung der Effektivität der Verwertung von Abfällen aus der Nutzungsphase herangezogen. Sie bezieht die tatsächlich zum Recycling aufbereitete Menge an Altmetallen (g) auf die der Sammlung zur Verfügung stehende Menge an Schrott aus dem Abfallstrom (d) ohne Verluste. Da auch Schrotte aus der Produktion (h) im Kreislauf geführt werden, ist es wichtig, den Anteil an Altschrott zu kennen - nur so kann die EOL-RR korrekt berechnet werden.

Das Gesamtschrottaufkommen ist Basis für die „Old-Scrap-Ratio (OSR)“, den Anteil von EOL-Metallen nach der Nutzungsphase (g) an der Gesamtmenge an vorhandenen Alt- und Neuschrotten ($g/g+h^*$), die recycelt werden (j, m). Auch die Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe (Circular Material Use Rate / CMUR), die derzeit nur über alle Stoffflüsse für Deutschland ermittelt und für metallische Materialien insgesamt grob abschätzbar ist (Eurostat [26, 27]), lässt sich zuordnen. Diese setzt das Aufkommen an Sekundärmaterialien zum Recycling ($g+h^*$) ins Verhältnis zum gesamten Materialeinsatz, also der Summe aus Primärmaterialeinsatz ($a + a^*$), der zur inländischen Nutzung (u) bestimmt ist, und dem Aufkommen des Sekundärmaterials zum Recycling ($g+h^*$). Um international anschlussfähig zu sein, müssen die Indikatoren um die Exporte ergänzt und um die Importe reduziert werden (t), was aus Gründen der Übersichtlichkeit hier nicht in den Formeln aufgenommen ist.

Abbildung 3 Referenzschema mit relevanten Recyclingindikatoren



Quelle: Eigene Abbildung

2.2 Datenquellen zur Erhebung von Stoffströmen im Recyclingsystem

Für die Datenerhebung entlang des Metallkreislaufes stellen insbesondere die wechselnden Verantwortlichkeiten und Besitzverhältnisse in den Wirtschaftszweigen wie auch die sich ändernden Bezugsgüter (Erz, Legierung, Halbzeug, Produkt, Abfall) mit ihren sehr unterschiedlichen Metallgehalten eine enorme Herausforderung dar.

Während die Kreislaufwirtschaft im Sinne wirklichen zirkulären Wirtschaftens Produktlebenszyklen und Materialkreisläufe mit ihren Qualitäten in den Blick rückt, wird das Recycling ursprünglich aus der Abfallbewirtschaftung heraus begründet und erfasst. Recycling bezeichnet im abfallwirtschaftlichen Kontext ein Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen für eine stoffliche Verwendung aufbereitet werden (Artikel 3, Nr. 17 AbfallRRL). Angestrebt werden hierbei Rezyklate, die wieder Eingang in Produktionsprozesse finden können, um Primärmaterialien zu substituieren.

Zur Beschreibung der Recyclingsituation werden Daten zu anfallenden Abfällen in Form von Produkten oder Materialien und ihren Zusammensetzungen, Behandlungs- und Verwertungskapazitäten und daraus resultierenden Stoffströmen benötigt. Diese Daten werden an unterschiedlichen Stellen im Wirtschaftskreislauf von verschiedenen Akteuren in unterschiedlicher Art erfasst und ggf. veröffentlicht. Die maßgeblichen Datenquellen lassen sich aus Sicht der Autor*innen den fünf Kategorien **(a) Amtliche Statistiken, (b) Daten kommerzieller Anbieter, (c) Branchenstatistiken, (d) Weitere Studien, Datenaufbereitungen und Modellierungen und (e) Individuelle Expertise** zuordnen. Diese Daten sind in Bezug auf die Erkenntnisziele unterschiedlich ergiebig. Diese Clusterung ist nicht als hierarchische Abstufung zu verstehen.

2.2.1 Amtliche Statistiken

Die von staatlichen Behörden bereitgestellten statistischen Daten werden als amtliche Statistik bezeichnet. Zentrale aber nicht ausschließliche Instanz sind hierbei das Statistische Bundesamt zusammen mit den Statistischen Ämtern der Länder. Amtliche Statistiken stehen als Gemeingut allen Nutzenden aus Regierung, Wirtschaft und Öffentlichkeit kostenfrei zur Verfügung [28].

Für die Behandlung und Verwertung von Abfällen liegt die Abfallstatistik vor, die jährlich verpflichtend gemäß Umweltstatistikgesetz (UStatG) vom Statistischen Bundesamt erhoben wird, auch um europa- und völkerrechtliche Berichtspflichten zu erfüllen. Sie fußt zum einen auf dem **Europäischen Abfallverzeichnis**, nach dem Abfälle einheitlich eingestuft und nach ca. 900 Arten untergliedert werden. Zum anderen auf den erhobenen Abfallmengenströmen, die in Behandlungs- und Verwertungsanlagen, darunter auch Recyclinganlagen, gelangen. Während die daraus ausgewertete Abfallbilanz, die ca. 18 Monate nach dem Berichtszeitraum zur Verfügung steht, einen wichtigen strukturellen Einblick in die Abfallwirtschaft erlaubt, ist sie mit Blick auf die Erfassung von Stoffkreisläufen durch Recycling stark limitiert. Dies gilt insbesondere für Metalle, die in nahezu allen Abfallkapiteln und Untergruppen auftreten, aber nicht differenziert betrachtet werden. Die auftretenden Abfallfraktionen sind maßgeblich nach ihrem Aufkommensort in den Wirtschaftszweigen und nicht nach den enthaltenen Materialien gegliedert. Es erfolgt eine gesonderte Ausweisung von Abfallschlüsseln für gefährliche Abfälle.

So geben Abfallschlüssel nicht hinreichend Auskunft über:

- Art und Zusammensetzung der Fraktionen und Materialien und die tatsächlichen Frachten bestimmter Wert- und Schadstoffe. Diese Informationen werden nicht erfasst und müssen über zusätzliche Datenbanken und Auswertungen abgeleitet werden [29, 30]. Jedoch sind diese ergänzenden Quellen hinsichtlich der Datenqualität nicht ausreichend und nur sehr eingeschränkt verfügbar bzw. auch ohne verbindliche Erhebungsgrundlage.

- die erzeugten Verwertungs- und Recyclingqualitäten, die Verwertungsaufwände und -materialverluste sowie den Verbleib der Materialien jenseits der Abfallbehandlung. Diese werden nicht erfasst, obgleich eine stärkere Differenzierung des Outputs aus Behandlungsanlagen seit 2020 prinzipiell vorgesehen ist.
- Nebenprodukte und Sekundärmaterialien, die nicht oder nicht mehr als Abfall gelten und somit keiner abfallrechtlichen Informations- oder Notifizierungspflicht unterliegen. Sie werden nicht erfasst.
- Recyclingkreisläufe, die produktionsintern und zwischen Verarbeitern von Primärmaterialien stattfinden. Sie werden überwiegend nicht berücksichtigt.

Für diejenigen Produkte, für die eine **erweiterte Herstellerverantwortung** verankert ist, gibt es zum Teil zusätzlich spezifische Statistiken (z.B. für Verpackungen, Elektrogeräte, Batterien), die i.d.R. Daten zur in Verkehr gebrachten Menge [31], erfassten Abfallmenge, den Behandlungs-ort (Inland, EU-Ausland, außerhalb der EU) sowie die letztendliche Behandlungsart (Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling, sonstige Verwertung, Beseitigung) erfassen. Dies erfolgt nicht nur für den Produktstrom in Summe, sondern unterschiedlich untergliedert, z.B. in sechs verschiedene Produktkategorien für Elektro- und Elektronikgeräte oder die unterschiedlichen chemischen Systeme der Gerätebatterien [32].

Für einige Produkte bzw. ihre Abfälle - so für Batterien - gibt es weitere spezifische Datenerhebungen und Ansätze einer tieferen Aufgliederung des Abfallartenkatalogs, um die Erfüllung der gesetzlich verankerten Sammel- und Recyclingquoten nachweisen zu können.

Während bei Verpackungen und ihren Abfällen aufgrund der Monomaterialität bei einigen Untergruppen teilweise materialspezifische Aussagen getroffen werden können, beinhalten die Statistiken keine solchen Informationen für komplexe Produkte wie Elektro- und Elektronikgeräte. So können keine Rückschlüsse auf die Frachten bestimmter Stoffe und Materialien in der in Verkehr gebrachten oder als Abfall angefallenen Menge gezogen werden. Auch bzgl. der recycelten Mengen gibt es keine Auskunft darüber, welche Anteile verschiedene Stoffe/Materialien hieran haben. Nicht zuletzt ist für Verpackungen und Elektroaltgeräte keine originäre Verknüpfung zu den Statistiken nach Abfallschlüsselnummern des Europäischen Abfallverzeichnisses vorhanden.

Ähnliche Problemlagen ergeben sich aus den weiteren statistischen Erhebungen wie den **Produktions- und Außenhandelsstatistiken**. Diese sind gesetzlich verankert und mit europäischen Durchführungsverordnungen abgesichert, werden monatlich vom Statistischen Bundesamt erhoben, bzw. auf Basis von Daten der Statistischen Landesämter und des Zolls für die Bundesrepublik bereitgestellt. Die Außenhandelsstatistik bildet die Ein- und Ausfuhren von Waren ab und damit die Zu- und Abflüsse von Materialien aus dem physischen Bilanzraum – sowohl gering und unbearbeitete Stoffe wie Primär- und Sekundärrohstoffe als auch Materialien in Form von Halb- und Fertigwaren. Beide Statistiken nehmen eine harmonisierte Zuordnung nach ineinander überführbaren Güter- und Warenverzeichnissen vor und erfassen Tonnagen, Stückzahlen und Werte [33]. Das Unterverzeichnis für Produktionsstatistiken dient der statistischen Erfassung der Produktion in produzierenden Betrieben des Verarbeitenden Gewerbes. Das Warenverzeichnis der Außenhandelsstatistiken (HS-Codes, CN-Codes und TARIC) dient der zollrechtlichen Erfassung des Außenhandels. Während es anhand beider Klassifikationsbereiche gelingt, für gewinnungsnahe Waren wie Erze und Erzkonzentrate sowie abfallseitig große, überwiegend homogene Stoffströme wie Stahlschrotte auf die enthaltenen Wertstofffrachten der Hauptmaterialien zu schließen, ist dies für weitere Legierungs-, Neben- und Spurenelemente so-

wie für Metalle und Materialien als Bestandteile von komplexeren Produkten wie Fahrzeugen allenfalls mit großen Unsicherheiten, in der Regel aber gar nicht möglich. Erschwerend kommen Mengenschwellen der Berichtspflicht für kleinteilig gehandelte Warenströme hinzu. Weder aus Produktions- noch aus Außenhandelsstatistiken geht bspw. der Recycled Content (RC) in den Waren hervor oder gar eine darüberhinausgehende Information zum Rezyklateinsatz aus EOL-Produktrecycling.

2.2.2 Daten kommerzieller Anbieter

Kommerzielle Anbieter bieten teils sehr aktuelle, häufig jedoch auch nur mit Branchen- und Unternehmenskenntnis geschätzte Daten an. Dabei unterscheiden sich die Datenqualitäten und Repräsentativität der Daten je nach Anbieter deutlich. Zudem sind die Studien hinsichtlich der konkreten Erfassungs- und Schätzmethodik teils intransparent. Für zahlreiche Neben- und Spurenelemente gibt es keine kommerziellen Studien. Für manche Metalle bieten verschiedene Institutionen zahlungspflichtige Einzelstudien an, die jedoch unregelmäßig aktualisiert werden und deren Fortschreibung nicht verlässlich ist. Darüber hinaus unterliegen diese Studien teilweise Lizenzbedingungen, die eine öffentliche Bereitstellung und Weitergabe enthaltener Daten nicht gestatten.

2.2.3 Branchenstatistiken

Wirtschaftsverbände veröffentlichen in der Regel statistische Jahresberichte zur Branchenentwicklung. Auch die von Wirtschaftsverbänden aus anonymisierten Daten der Mitgliedsunternehmen oder aus Marktbeobachtungen abgeleiteten Daten sind nicht immer vollständig repräsentativ, da sie von der Marktdeckung der Verbände bzw. den Rücklaufquoten der Mitgliederbefragungen abhängen. Vor allem sind diese mit Blick auf den Materialeinsatz und Sekundärrohstoffinformationen allenfalls hochaggregiert und teils wenig aussagekräftig. Tiefergehende Informationen werden ggf. den Mitgliedsunternehmen bereitgestellt. Die Aktualität von Branchenstatistiken kann sehr gut sein. Jedoch ist die durchgehende und zukünftige Verfügbarkeit dieser Daten nicht gewährleistet, da mehr und mehr Verbände trotz Anonymisierung aus wettbewerbsrechtlichen Gründen von einer weiteren Veröffentlichung Abstand nehmen, Zeitreihen und Kennzahlen nicht weiter veröffentlichen und folglich kein Monitoring ermöglichen.

2.2.4 Weitere Studien, Datenaufbereitungen und Modellierungen

Eine weitere wichtige Datenquelle stellen wissenschaftliche Studien zur Beschreibung von Stoffflusssystemen, einzelnen Prozessschritten oder Mengenströmen dar. Dies sind zumeist Auftragsstudien aus der Ressortforschung, geförderte Drittmittelprojekte von Forschungseinrichtungen oder aber Eigenforschungsberichte. Vielfach werden diese Projekte flankierend in wissenschaftlichen Journals veröffentlicht. Diese Art von Quellen zeichnet sich oft durch eine hohe Datenauflösung und einen hohen Detailgrad aus. Bestrebungen der Harmonisierung von Produkt-, Komponenten- und Materialbeschreibungen wurden in den letzten Jahren vorangetrieben [34], finden jedoch übergreifend noch keine Anwendung, wodurch die Verwendung dieser Daten eingeschränkt ist. Einzelstudien stellen wichtige Quellen zum Füllen von Datenlücken dar [35], sind aufgrund ihrer punktuellen, diskontinuierlichen und auf Förderung angewiesenen Durchführung für die langfristige sichere Datenbereitstellung jedoch nur wenig geeignet.

Datenaufbereitungen, wie z.B. der Recyclingatlas der Deutschen Rohstoffagentur [25], geben einerseits einen guten, konzentrierten Überblick zu unternehmensrelevanten Kennzahlen sowie elementbezogenen Recyclingdaten (z.B. Recyclingindikatoren), leiden aber auch an mangelnden (öffentlichen) verfügbaren Daten wie zum Beispiel Produktionsdaten für recycelte Metalle. Dabei

erschwert auch die restriktivere Haltung von Unternehmen und deren Verbänden - teils aufgrund der geltenden wettbewerbsrechtlichen Vorbehalte - eine verbesserte und transparentere Berichterstattung.

Mit Blick auf detaillierte Materialflussinformationen hat das Umweltbundesamt auf Grundlage von Einzelforschungsprojekten ein Sekundärrohstoffportal [20] erstellt, das eine Vielzahl von Datenquellen auswertet. Es basiert auf Zusammenfassung, Aufbereitung und Modellierung verfügbarer Daten – darunter Verwertungsmengen, Wertstoffgehalte, sektorbezogene und produktionsinterne Einsatz- und Handelsmengen, Stoffdissipationen sowie Im- und Exporte im Außenhandel. Der Nutzwert dieses Portals ist mangels verbindlicher Fortschreibung und somit abnehmender Aktualität derzeit allerdings ebenfalls eingeschränkt.

Weitere wichtige Datenzusammenstellungen und Modellierungen sind die EU Material System Analysis (MSA) Studien [36]. Diese sind ein wichtiges informatorisches Instrument zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz in Europa. Die Studien analysieren die Flüsse unterschiedlicher Materialien wie Metalle in der EU und werden zur Berechnung von Indikatoren wie der EOL-RIR auf EU-Ebene im Rahmen des CE-Monitorings [37] und der Bewertung von Kritikalität [38] herangezogen. Die Studien basieren auf einheitlichen Prozessen und Systemgrenzen, werden regelmäßig für die EU-Kommission erstellt und im Raw Materials Information System (RMIS) des EU Joint Research Centre (JRC) – allerdings nur in aggregierter Form für die EU 27 – veröffentlicht. Sie basieren auf frei zugänglichen Daten und leiden ebenfalls an einem Mangel verfügbarer Daten, weshalb einem guten Teil der Modellierungen auch Schätzungen zugrunde liegen.

2.2.5 Individuelle Expertise

Als weitere Quelle dienen häufig Befragungen von Personen mit individueller Fachkunde zu fehlenden oder strittigen Daten. Diese Fachleute verfügen aufgrund ihrer Berufserfahrungen und Tätigkeitsfelder in relevanten Themenstellungen über ausgeprägtes implizites oder auch explizites Wissen, das in dieser Form aber nicht über Publikationen zur Verfügung steht. Mithilfe dieser individuellen Expertise lassen sich punktgenau Datendefizite auffüllen. Dies geschieht gewöhnlich anlassbezogen, jedoch wird hierdurch keine langfristige Datenbereitstellung gesichert. Häufig sind sich auch die herangezogenen Fachleute in der Bewertung von Sachverhalten nicht einig. Die Daten, die auf dieser Grundlage erhoben werden, können somit subjektiv sein.

2.3 Zusammenfassende Einschätzung der Datenquellen

Übergreifend lassen sich für die aktuelle Datenerhebung und -verfügbarkeit recyclingrelevanter Daten in den fünf Quelltypen unterschiedliche Stärken und Schwächen konstatieren. Hierzu werden die Qualitätskriterien Relevanz, Genauigkeit, Aktualität und Pünktlichkeit, Verfügbarkeit und Transparenz, Vergleichbarkeit sowie Kohärenz angewendet, die im Europäischen Statistischen System (ESS) entwickelt wurden [39]. Die **Relevanz** steht dabei für die Passgenauigkeit auf Fragen aus Nutzersicht, die **Genauigkeit** für Mess- oder Aufbereitungsfehler der Erhebung, **Aktualität und Pünktlichkeit** für die zeitnahe Bereitstellung als Informationsgrundlage für Entscheidungsprozesse, **Verfügbarkeit und Transparenz** für die Zugänglichkeit und den Grad der Dokumentation, die **Vergleichbarkeit** für die Zuverlässigkeit für zeitliche, räumliche und fachliche Vergleiche sowie die **Kohärenz** für die Widerspruchsfreiheit für unterschiedliche Statistiken, die sich auf dieselbe Grundgesamtheit oder denselben Betrachtungsgegenstand beziehen.

Eine Einstufung erfolgt von hohem Erfüllungsgrad des Kriteriums (+) bis zu einem schwachen Erfüllungsgrad (-) des Kriteriums, wobei die Ausprägung auf den Darlegungen in Kapitel 2.2 und der Einschätzung der Autor*innen fußt.

Tabelle 1 Bewertung der aktuell verfügbaren Datenquellen zu recyclingrelevanten Fragestellungen nach sechs statistischen Qualitätskriterien

	Relevanz	Genauigkeit	Aktualität und Pünktlichkeit	Verfügbarkeit und Transparenz	Vergleichbarkeit	Kohärenz
Amtliche Statistiken	-	0	0	+	+	+
Daten kommerzieller Anbieter	0	0	0	-	0	-
Branchenstatistiken	-	0	0	-	0	-
Weitere Studien, Datenaufbereitungen und Modellierungen	0	+	-	+	-	-
Individuelle Expertise	+	+	-	-	-	-

Legende

- + hoher Erfüllungsgrad des Kriteriums
- 0 mittlerer Erfüllungsgrad des Kriteriums
- schwacher Erfüllungsgrad des Kriteriums

Demnach erweisen sich weiterführende Studien, Datenaufbereitungen und Modellierungen neben der Einbindung individueller Expertise als sehr relevante Quellen recyclingbezogener Daten zu Fragen der Kreislaufwirtschaft und ihrer politischen Umsetzung. Sie sind aber gleichermaßen hinsichtlich Kohärenz, Vergleichbarkeit und Aktualität defizitär. Amtliche Statistiken können in den letztgenannten Kategorien als sehr gut bewertet werden. Allerdings ist bei diesen die Relevanz für recyclingrelevante Fragen als überwiegend schwach zu beurteilen. Einer der Hauptgründe liegt darin, dass amtliche Statistiken in ihrer Systematik in der Regel nicht material- oder stoffspezifisch, sondern im Fall der Produktion und des Handels eher an Produkten und Produktkategorien und im Fall von Abfällen an der Gefährlichkeit und dem Aufkommensort orientiert sind. Die Zusammensetzungen der Produkte und Abfälle - mit Blick auf Legierungselemente, Wertstoffe, Störstoffe, Schadstoffe - sind nicht erfasst. Auch wenn amtliche Statistiken in den genannten Segmenten Mengenphänomene systematisch abbilden, darin jeweils ein geschlossenes Gesamtbild vermitteln und in diesen auch ein bedeutender Wert der Informationsbereitstellung besteht, so sind sie für die dringlichen Fragen bei der Betrachtung von Stoffkreisläufen bislang wenig relevant. Für Branchenstatistiken und Daten kommerzieller Anbieter ergibt sich ein gemischtes Bild, wobei auch bei diesen die Anschlussfähigkeit und Verfügbarkeit als gering bewertet werden müssen. Hinsichtlich Aktualität und Pünktlichkeit der Veröffentlichungen sind alle Datenquelltypen mit teils beträchtlichen Verzögerungen behaftet.

3 Datenbasis am Beispiel relevanter Industriemetalle

Zur Verdeutlichung der Datenlage über den Lebenszyklus und die Kreisläufe von Metallen werden die Ausgangsdaten zur Einschätzung der Kreisläufe von Aluminium und Kobalt als Beispiele herangezogen und die vorhandene Datenbasis jeweils in Fallstudien geprüft und bewertet. Dies erfolgt für Deutschland als Volkswirtschaft.

Aluminium steht hierbei exemplarisch für ein Basismetall, das in großen Mengen gefördert, verarbeitet und auch recycelt wird. Es weist dank seiner thermischen, mechanischen und elektrischen Eigenschaften ein breites Anwendungsspektrum als Industriemetall auf. Kobalt steht hingegen beispielhaft für ein Spezialmetall, das in vergleichsweise geringen Mengen vor allem als Koppelprodukt gefördert wird, aber dank seiner chemischen Eigenschaften in sehr spezifischen Anwendungsfeldern zum Einsatz kommt und dort ein signifikantes Nachfragewachstum erfährt.

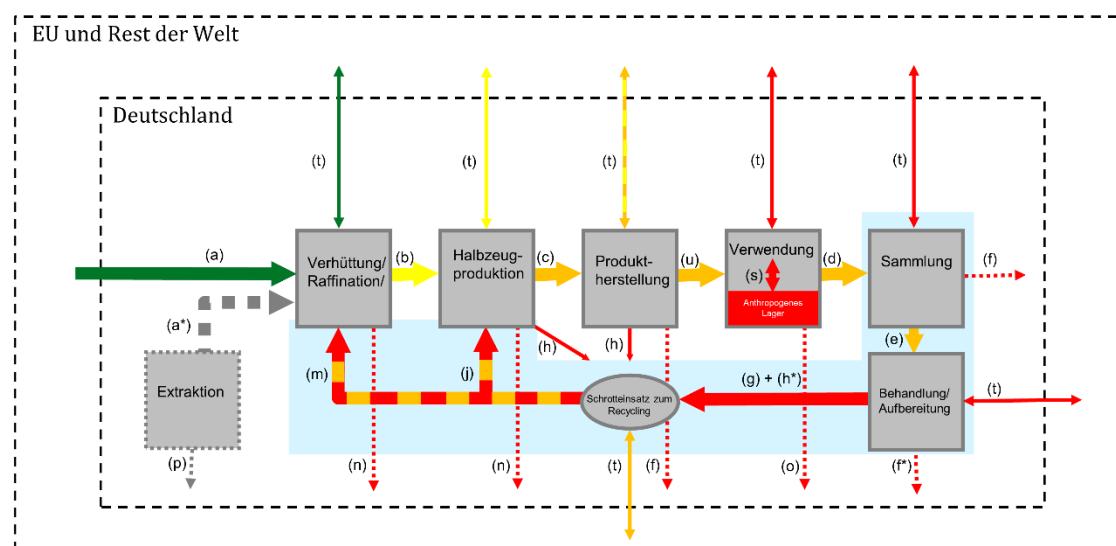
Für beide Metalle wurde mithilfe des Referenzschemas in 2.1 dezidiert die Datensituation entlang der Wertschöpfungskette untersucht: Von der Extraktion, Verhüttung, Raffination und Halbzeugproduktion, über die Produktherstellung, die Nutzung von Produkten sowie die Sammlung, Behandlung/Aufbereitung von Altprodukten bzw. Schrotten und den Schrotthandel, bis hin zum Recycling von Schrotten. Ziel der Datenanalyse war nicht die Quantifizierung der Stoffflüsse, sondern die Bewertung der Datensituation, d.h. der Verfügbarkeit der Daten einschließlich ihrer Qualität und Herkunft. Hierfür wurde die Einschätzung zur jeweiligen Datensituation einzelner Elemente im Referenzschema farbig codiert.

Die detaillierten Fallstudien zu Aluminium und Kobalt sind dem **Anhang** zu entnehmen.

3.1 Rückschlüsse auf die allgemeine Datenlage

Mit der Betrachtung der Datensituation der zwei ausgewählten Fallstudien lassen sich insgesamt Rückschlüsse auf weitere Metalle ziehen, die sich aus Analogieschlüssen, der Prüfung relevanter Datenquellen und dem Erfahrungswissen der Autor*innen speisen. Das Ergebnis dieser Auswertung ist im Referenzschema (s. Abbildung 4) mithilfe einer Farbcodierung visualisiert.

Abbildung 4 Gesamtbewertung der Datenverfügbarkeit für Metallstoffströme



Legende

- Grün: Daten zu Mengen und Qualitäten weitgehend vorhanden
- Gelb: Daten zu Mengen in amtlichen Statistiken unvollständig, keine Informationen zu Qualitäten
- Orange: Daten zu Mengen unvollständig oder unregelmäßig über andere Datenquellen, keine Informationen zu Qualitäten
- Rot: Keine oder nur sporadische Daten zu Mengen und Qualitäten vorhanden (aus individueller Expertise, Einzelstudien, Modellen etc.)

Quelle: Eigene Abbildung

Folgende Aspekte treffen bei der Beschreibung der Materialkreisläufe für viele Massen- und Spezialmetalle hinsichtlich der Datensituation zu. Die Buchstaben beziehen sich dabei unmittelbar auf die Beschriftung im Referenzschema (Abbildung 2).

Tabelle 2 Erkenntnisse zur allgemeinen Datenlage für Metallkreisläufe

Materialfluss	Beschreibung
a, a*, b, t	<p>Bezgl. der Gewinnung eines Rohstoffs oder der Raffinadeproduktion in Deutschland sind die Daten grundsätzlich öffentlich über die Produktionsstatistiken einsehbar. Aber da es sich oft nur um Einzelproduzenten handelt, unterliegen diese Daten dennoch oft der Vertraulichkeit und sind aus diesem Grund trotzdem nicht oder nur eingeschränkt verfügbar, sofern diese nicht von Unternehmen ihrerseits veröffentlicht werden.</p> <p>Weiterhin gibt es kommerzielle Anbieter, die solche Daten teilweise bereitstellen können. Dies ist mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden.</p> <p>Erfolgt keine Gewinnung oder Raffinadeproduktion in Deutschland, sondern werden Roh- und Grundstoffe nur im- bzw. exportiert, so sind Handelsdaten auszuwerten. Obgleich die Systematik des Warenverzeichnisses im Außenhandel eine sehr tiefe Waren-gliederung beinhaltet, ist diese zuvorderst für Zollzwecke erstellt. So reicht diese nur bei Rohstoffen oder gering verarbeiteten Waren aus, um enthaltene Metallmengen und Qualitäten zu bemessen. Bei Spuren- und Nebenelementen gibt es meist aggregierte Waren-Codes, so dass einzelne Rohstoffe nicht separat betrachtet werden können.</p>
c, t	<p>Die Bilanzierung von Rohstoffmengen basiert im Wesentlichen auf einzelnen Produktionsdaten zu Erzeugnissen, die mit der Produktionsstatistik erfasst werden. Eine Gesamterfassung für einzelne Metalle erfolgt nicht. Die jeweiligen Materialgehalte müssen aus den Produktionsmengen der Produkte abgeschätzt werden. Mengen an Spezifikationen eines Rohstoffs (versch. Legierungen etc.) werden in der Regel auch nicht ausgewiesen und müssen ebenfalls geschätzt werden. Hierzu können Preisangaben genutzt werden, um auf die tatsächlichen Wertstoffgehalte und Konzentrationen zu schlussfolgern. Dies gilt für Produktionsdaten ebenso wie für die Außenhandelsdaten. Waren-Codes umfassen in diesem Abschnitt der Produktion bereits höher verarbeitete Produkte, was das Herunterbrechen der Mengen auf Elementebene deutlich erschwert. Für Neben- und Spurenelemente ist die Abschätzung noch schwieriger, bzw. für Metalle, die in sehr vielen unterschiedlichen Produkten zur Anwendung gelangen. Folglich gibt es über diese Primärstatistik zwar lückenhafte Einblicke, jedoch keinen Gesamtüberblick, in welchen Mengen spezifische Metalle bzw. ihre Legierungen in welchen Produkten eingesetzt werden.</p>
u, t	<p>In Waren-Codes untergliederte Produktions- und Handelsstatistiken umfassen Daten zu den Gesamtmengen von Produkten und Produktgruppen. Für einige Produkte (Fahrzeuge, Batterien, Elektrogeräte, Verpackungen) existieren spezifische Daten für die in Deutschland in Verkehr gebrachte Menge, die unterschiedlich stark differenziert sind. Ein Rückschluss auf die materielle Zusammensetzung ist nur mit Hilfe von spezifischen</p>

Materialfluss	Beschreibung
	<p>Herstellerangaben oder Studien zur Zusammensetzung von Produkten möglich. Mit Hilfe dieser Ergebnisse können mit beträchtlichem Aufwand Hochrechnungen auf die Gesamtmenge erfolgen, die aufgrund der Komplexität der Produkte und der Veränderung der Zusammensetzung im Zuge von Weiterentwicklungen mit großen Unsicherheiten behaftet sind.</p>
s	<p>Um die Materialbindung im anthropogenen Lager zu bemessen, ist eine Auswertung der in-Verkehr gebrachten Mengen langlebiger Güter in Abgrenzung zu kurzlebigen Umlaufgütern und Verbrauchsgütern erforderlich. Hierzu können Produktions- und Außenhandelsstatistiken in Verbindung mit weiteren Bestandsstatistiken wie Zensusdaten und Erhebungen zum Anlagekapital dienen. Hinzu kommt eine Auswertung der abfallwirtschaftlichen Ströme, um zu Nettobestandsveränderungen zu gelangen. Letztere sind aus dem bestehenden statistischen System aus dem Materialkonto nur als materialunspezifischer Saldo als Residual ausweisbar. Um die Flüsse des anthropogenen Lagers und seine Beschaffenheit materialdifferenziert zu untersuchen, sind zahlreiche weitergehende Daten zur typischen Güterbeschaffenheit erforderlich. Sollen hingegen auch Prognosen zu aufkommenden Sekundärrohstoffmengen möglich sein, sind dynamische Rechnungen mit Güterverweilzeiten notwendig. All diese Auswertungs- und Bilanzierungsansätze werden im Themenfeld Urban Mining bislang nur in Sonderstudien bei-spielhaft erarbeitet.</p>
d, t	<p>Für gesammelte Abfälle werden Informationen über die Masse der Altprodukte, nicht aber über die enthaltenen Roh- und Grundstoffe erfasst. Gesamtmassen der Altprodukte sind größtenteils meldepflichtig, aber sehr stark aggregiert. Metallgehalte müssen über die Mengen spezifischer enthaltener Altprodukte abgeschätzt werden. Dies gilt ebenso für die Mengen in den Import- und Exportdaten der Außenhandelsstatistik. Es existieren Warendaten für Abfälle und Schrotte bestimmter Metalle, allerdings können die tatsächlichen Anteile der Wertstoffe stark variieren. Preisangaben in Verbindung mit Informationen zu den Aufbereitungskosten können eine Abschätzung möglich machen.</p> <p>Da die Warendaten nicht auf die Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen ausgelegt sind, sind sie in der Regel ungeeignet, um Qualitäten, Legierungen etc. zu unterscheiden. Viele Neben- und Spurenelemente, die als kritische Rohstoffe gelten, werden nicht gesondert mit eigenen Warendaten oder solchen für Produkte, die diese enthalten, ausgewiesen.</p> <p>Für die Projektion, wann welche Güter und Produkte zu Abfall werden, um daraus Recyclingpotenziale ermitteln zu können ist ein Rückgriff auf Nutzungs- bzw. Verweildauern notwendig. Entsprechende Daten zu Nutzungs- und Verweildauern sind nur aus Einzelstudien und für wenige Güter/ Produkte verfügbar. Zu beachten ist auch, dass sich Nutzungs- und Verweildauern durch Nutzungsgewohnheiten ändern und in der Regel nicht deckungsgleich mit bilanziellen Abschreibungszeiträumen sind.</p>
e, t	<p>Behandelte und aufbereitete Mengen an Abfällen und Altschrotten werden zumindest teilweise erfasst. Für bestimmte Produktgruppen (z.B. Verpackungen, Batterien, Elektrogeräte) bestehen zusätzliche Vorgaben sowie Daten zu Recyclingquoten. Prinzipiell sollte der Input in die Behandlung dem Output aus der Sammlung entsprechen, weshalb häufig erhobene Daten zum Input in die Behandlung als Erfassungsmenge angenommen werden. Ansonsten siehe d</p>
g, h*	<p>Altschrottmenge der großen Metallströme (Stahl, Leicht- und Buntmetalle) und der Edelmetalle sind über Daten von Verbänden und kommerziellen Anbietern teilweise gut erfasst. Für die Neben- und Spurenelemente gibt es dies jedoch nicht, zumal ein großer Teil nicht-funktional mit einem Hauptelement recycelt und somit verdünnt und nicht separat erfasst wird. Im Außenhandel existieren Warendaten für Abfälle und Schrotte bestimmter Rohstoffe, allerdings können die Anteile an Rohstoffen in Abfällen und Schrotten deutlich variieren. Ebenso reicht die Auflösung der Warendaten nicht aus, um</p>

Materialfluss	Beschreibung
	einzelne Qualitäten, Legierungen etc. zu unterscheiden; bzw. bei Spuren- und Neben-elementen gibt es in der Regel aggregierte Warendaten. Ein Rückschluss, aus welchen Produkten welche Altschrottmengen stammen, ist i.d.R. nicht möglich. Eine Differenzierung zwischen Altschrotten (g) und behandelten Neuschrotten (h*) (z.B. Stanzabfälle, entölte Späne und Materialreste, unsortierte Produktionsreste) ist auf Basis der verfügbaren Daten derzeit nicht möglich.
h	Die anfallenden Neuschrottmengen werden nur dann erfasst, wenn sie gehandelt werden. Es gibt keine zentrale Erfassung. Die Verwertung erfolgt häufig direkt im Werk. Es sind lediglich Abschätzungen möglich.
j, m	Für die großen Massenströme gibt es teilweise Informationen über den Einsatz von Schrotten in der Raffinadeproduktion und Verarbeitung. Häufig sind dies jedoch auch nur Schätzungen. Es gibt keine Hinweise über die Qualitäten der Schrotte. Für Neben- und Spurenelemente gibt es abgesehen von wenigen Einzelstudien mit teilweise jahrzehntelangen Abschätzungen keine Informationsgrundlage.
f, f*	Verluste in den jeweiligen Bereichen können anhand von einzelnen Studien nur abgeschätzt werden [40]. Ein fortlaufendes Monitoring existiert nicht. Für Verluste die im Rahmen der Sammlung sowie einer nicht 100 % trennscharfen Sortierung und Zuordnung zur jeweiligen Recyclingroute entstehen, liegen keine Daten vor, die über Abschätzungen von Werten für einzelne Materialien aus Einzelstudien hinausgehen. Verluste durch inadäquate oder ineffiziente Entsorgung führen auch zu Metallfrachten in deponierten Abfallströmen, die im Zuge eines Landfill Minings von Interesse sein können. Hierzu existieren lediglich Abschätzungen und Hochrechnungen auf Basis einzelner Projekte.
n	Materialverluste aus Verhüttung (Abbrand, Schlacken, Stäube) sowie der Produktion von Halbzeugen und Produkten werden nicht zentral erfasst. Es sind nur Abschätzungen auf Basis von Einzelstudien und Unternehmensbefragungen möglich.
o	Zu dissipativen Verlusten in der Nutzungsphase sowie Verlusten, die durch eine falsche Entsorgung entstehen, existieren keine Daten, die über punktuelle Abschätzungen für einzelne Materialien auf Basis von Einzelstudien hinausgehen.
p	Daten zu Erzbergbauabfällen sind für Deutschland nicht relevant, da innerhalb von Deutschland derzeit kein Erzbergbau mehr zum Zwecke der Metallraffination betrieben wird. Allerdings existieren historische Halden, die im Zuge des Landfill Minings zukünftig auch metallische Sekundärmaterialien zur Aufbereitung bereitstellen könnten. Eine Datenbasis ist hierzu teilweise auf Basis von Einzelprojekten / Studien vorhanden.

3.2 Fazit zur Datensituation

Aus der Datenanalyse geht hervor, dass es zahlreiche Datenlücken in den Wertschöpfungsketten von Metallen gibt. Während im Bereich der Gewinnung von Rohstoffen und der Raffinadeproduktion noch eine vergleichsweise gute Datenbasis existiert, verringert sich diese mit der zunehmenden Komplexität der Produkte und deren Einsatzgebieten entlang der Wertschöpfungskette. Im Besonderen wirkt sich dies auf die Daten der Erfassung und Bilanzierung von Sekundärmaterialien, der Erfassung der Effektivität des Recyclings mit Blick auf erzeugte Mengen und Qualitäten sowie deren Verbleib aus. Diese lassen sich aus Produkt- und Herstellerangaben, Sammelquoten und Recyclingraten des bestehenden statistischen Erfassungssystems und der vorhandenen, amtlich erhobenen Datenbasis in ihrer Struktur und Auflösung nicht zufriedenstellend ableiten. Die heimische Versorgungsrate mit einzelnen Metallen aus End-of-Life-Produkten (Rezyklatmengen) oder erzielte Substitutionsquoten von Primär- durch Sekundärmaterial (Rezyklatanteile) in der Produktion sind allenfalls mit individueller Expertise, Einzelerhebungen

und Modellierungen in Studien und teils nur anhand von generischen europäischen oder globalen, vielfach älteren Datenquellen abschätzbar [24].

Nicht zuletzt ist die Quantifizierung historisch gewachsener anthropogener Lager auf Ebene einzelner Metalle bislang im besten Fall in exemplarischen Einzelstudien für die Welt oder große Wirtschaftsräume vorhanden. Allerdings stellt genau diese strukturelle Information eine wesentliche Bestimmungsgröße für die effektive Bewirtschaftung in Stoffkreisläufen (Urban Mining) dar. All diese signifikanten Datenlücken und Qualitätsmängel sind problematisch, da sie die Beantwortung grundlegender Fragestellungen rund um das Themenfeld Recycling und Rezyklate in einer zirkulären Wirtschaft schon auf nationaler Ebene nicht in hinreichender Güte und Verlässlichkeit gewähren. Das Problem verschärft sich im internationalen Maßstab nochmals. Diese Einschätzungen decken sich mit weiteren Bewertungen zur Datenverfügbarkeit, insbesondere für kritische Rohstoffe zur Energiewende [41].

4 Wie kann die Datenbasis verbessert werden und was folgt daraus?

Die Verbesserung der Datenbasis erscheint notwendig, um Erfolge von Maßnahmen der avisier-ten politischen Zielsetzungen messen und bewerten zu können. Dies ist eine wesentliche Grundlage, um die zukünftige Ausrichtung der Kreislaufwirtschaft steuern zu können. Jenseits der politischen Ausgestaltung einer Kreislaufwirtschaft mithilfe dieser Daten ist eine verbesserte Datensituation ein Schlüsselement für eine funktionierende Kooperation der Akteure der Kreislaufwirtschaft, bspw. der Entsorger mit Produktherstellern. Diese hilft vor allem der Sekun-därrohstoffwirtschaft, um sich rechtzeitig auf die Behandlung sich verändernder Stoffströme und Stoffstromzusammensetzungen beim Recycling einzustellen zu können. Die Datenerfassung sollte den zahlreichen Stakeholdern, wie Unternehmen, Behörden und der Gesellschaft als hilf-reiches Werkzeug dienen. Ein fortlaufender gemeinsamer Austausch sollte dazu etabliert wer-den.

Auch wenn in dieser Veröffentlichung die Situation zu unmittelbaren Stoffflussindikatoren zum Recycling und deren Datengrundlagen im Vordergrund steht, so ist die Ableitung von Indikato-ren mit Bezug auf Versorgungsrisiken, Importabhängigkeiten und Selbstversorgungsraten in diesem Zusammenhang sehr relevant, sowohl für Deutschland als auch im Sinne des CRMA für die EU Darüber hinaus ist es notwendig, die mit Stoff- und Materialflüssen verbundenen Um-weltwirkungen messen zu können und auch soziale Aspekte der Rohstoffbereitstellung und -weiterverarbeitung zu erschließen. All diese Aspekte – Bereitstellen von Anlagenkapazitäten, Verringerung von Umweltwirkungen, Erhöhung der Versorgungssicherheit, Ermöglichung einer gesellschaftlichen Prosperität für jetzige und zukünftige Generationen - benötigen ausreichend differenzierte, valide Daten zu Stoffflüssen und Materialbeständen. Die aktuell verfügbaren Da-ten reichen hierfür nicht aus.

Ansatzpunkte zur Verbesserung der Datenlage sind aus Studien, Workshops, Gesprächen und Erfahrungsaustauschen mit verschiedenen Stakeholdern aus Industrie, Behörden und Gesell-schaft der letzten Jahre hervorgegangen oder ergeben sich aus sich zukünftig ändernden Rah-menbedingungen (z.B. Verordnungen). Vor dem Hintergrund der hier durchgeföhrten Datenana-lyse führen die Autor*innen eine nicht-priorisierende Liste von Ideenansätzen an, welche die Qualität und Vielschichtigkeit der Datensituation zukünftig verbessern könnte. Diese Ansatz-punkte sollen vor allem als Diskussionsgrundlage dienen, sind im Kontext zu prüfen und stets unter Berücksichtigung des avisierten Bürokratieabbaus mit Blick auf die Verhältnismäßigkeit abzuwägen.

4.1 Terminologie und Nomenklaturen schärfen und etablieren

Differenzierte und auf die Denkweise des zirkulären Wirtschaftens zugeschnittene Begriffs-definitionen und Nomenklaturen sind eine Grundvoraussetzung für die Erhebung und Be-reitstellung richtungssicherer Daten.

- **Differenzierte Begriffsdefinitionen:** Auf dem Weg zu einer Kreislaufwirtschaft muss die Produktion auf Sekundärrohstoffe zurückgreifen können. Damit kommt der präzisen Beschreibung der Qualitäten und der Lenkung in die passenden Anwendungsbereiche von Recyclingmaterialien eine zunehmend wichtigere Rolle zu. Der rechtlich definierte Begriff „Recycling“ ist daher zu untersetzen. Beispielsweise wäre es sinnvoll zu definie-ren, was unter „hochwertigem Recycling“, „werkstofflichem Recycling“, „Downcycling“, „funktionalem Recycling“ oder „Closed-Loop“-Recycling zu verstehen ist. Nur auf diese Weise wird eine differenzierte Beschreibung des Degradationsgrades der Stoffströme ermöglicht. Analog wäre es transparenter, gerade für den Endnutzer, wenn auch der Grad

der Recyclingfähigkeit von Materialien und Produkten so definiert würde, dass ersichtlich würde, wie hochwertig ein Produkt rezyklierbar ist.

- **Praktikable Nomenklaturen finden:** Bestehende Klassifizierungen, Nomenklaturen und Taxonomien stellen die für das zirkuläre Wirtschaften benötigten Daten und Informationen nicht immer in hilfreicher Weise zur Verfügung, so z.B. die Anforderungen an die differenzierte Beschreibung der Materialqualitäten. Daher wäre eine Weiterentwicklung in Abstimmung mit der Industrie zu prüfen; ob z.B. in Hinblick auf Stahlschrottarten deren Materialzusammensetzung, die End-of-Life-Schrottanteile sowie die Störstoffgehalte spezifischer abgebildet werden könnten. Ein Beispiel auf Produktebene wäre die tiefere Aufschlüsselung der Daten zu Elektrogeräten nach UNU-Keys [42]. Um Datenquellen unterschiedlicher Herkunft (z.B. amtliche Statistiken, Verbandsdaten, wissenschaftliche Studien, Bills of material) zu einem konsistenten Gesamtbild zusammenführen zu können, könnten Taxonomien, die eine standardisierte und granulierte Datenauflösung ermöglichen, harmonisiert und in Statistikmethodik und Wissenschaft verankert werden.

4.2 Amtliche Statistiken in Zusammenschau denken und hinsichtlich der Materialkreisläufe besser auswerten

- **Verknüpfung der existierenden statistischen Regelungsbereiche:** Zur Berichterstattung der wirtschaftlichen Aktivitäten, der Güterproduktion, der erzeugten Güter sowie des internationalen Warenhandels existieren weitgehend ineinander überführbare Systematiken – auf Ebene einzelner Länder wie Deutschland, regionaler Gruppen wie der EU sowie dem Rest der Welt. Ein Bindeglied ist dabei die „Kombinierte Nomenklatur“ (Combined Nomenclature) mit bis zu 8-stelligen CN-Codes, welche eine Vergleichbarkeit der bezeichneten Güter in einer sehr tiefen Gliederung herstellen kann. Diese korrespondiert auch mit weiteren Klassifikationen wie HS und TARIC und lässt sich in die Güterproduktionssystematik übersetzen. Abfallseitig existiert mit dem Abfallartenkatalog der EU eine davon unabhängige Systematik zur Erfassung von Abfällen, die mit dem Ziel der Unterscheidung in gefährliche und nicht gefährliche Abfälle entwickelt wurde. Es existiert keine Anbindung an die CN-Codes.
Die verschiedenen Statistiken zur Produktion und zur Abfallbewirtschaftung erfüllen gesetzlich geregelte Berichtszwecke und folgen einer inhärenten Logik, sind aber nicht miteinander abgleichbar und auf Ebene von Materialströmen übersetzbare. Um dies zukünftig zu ermöglichen, sollte geprüft werden, inwiefern **Übersetzungstabellen der Güter- und Warenstatistik in die Systematik der Abfallschlüssel und umgekehrt** erarbeitet und bereitgestellt werden könnten. Dies betrifft erwartete Abfallschlüssel nach Verwendungsbereichen und Behandlungsverfahren. Ergänzt werden sollten diese um die Materialkategorisierung der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (UGR). Hierzu hat Eurostat mit dem „waste management indicator“ einen Vorstoß gewagt [30], der mit validieren, differenzierten Daten aus den Mitgliedstaaten der EU fortentwickelt werden könnte.
Der Mehrwert solch einer Verknüpfung besteht in der besseren Verfolgbarkeit der Metallströme in Materialkreisläufen über den Lebenszyklus bis in die Abfallphase, insbesondere auch der grenzüberschreitenden Ströme. Da es sich um voneinander unabhängige Quellen handelt, könnten sie bei einer guten Übersetzbarkeit gegenseitig zur Plausibilisierung der Datenqualität und Vollständigkeit dienen, bzw. zur Offenlegung von Lücken. Auch Doppelzählungen sind eine Herausforderung, da Rezyklatanteile in Codes der Güter- und Warenstatistik implizit enthalten sind. An etlichen Stellen wird das Zusammenstellen direkter äquivalenter Codes nicht möglich sein, da die Zuordnung

zu vage ist und eine Behandlung über mehrere Behandlungsstufen erfolgt. Daher könnte das langfristige Ziel ein Dialog zur Weiterentwicklung der Klassifikationen vor dem Hintergrund einer Kreislaufwirtschaft sein [43].

4.3 Gezielte Datenerhebungen prüfen

- **Erhebung von Daten zur Kreislaufführung von kritischen und strategischen Rohstoffen:** Mit der europäischen Verordnung zu kritischen Rohstoffen (CRMA) hat sich die EU u. a. das Ziel gesetzt, eine Verbesserung und Diversifizierung der Versorgung der EU mit 34 kritischen, darunter 17 strategischen Rohstoffen, die Stärkung der Kreislauffähigkeit einschließlich des Recyclings und die Unterstützung von Forschung und Innovation in den Bereichen Ressourceneffizienz und Entwicklung von Substituten zu erreichen. Enthalten sind konkrete Zielsetzungen. So sollen bis 2030 für das Recycling in der EU Kapazitäten für 25 % des Eigenbedarfs an den strategischen Rohstoffen aufgebaut werden. Es wäre in Abstimmung mit Stakeholdern wie Industrieunternehmen und Verbänden zu prüfen, inwiefern ein Monitoring der Zielerreichung aus Sicht der Bundesrepublik Deutschland durch eine Verankerung einer Erhebung der erzeugten Rezyklate kritischer Rohstoffe und deren Einsatz mithilfe einer Ergänzung des Umweltstatistikgesetzes (UStatG) sowie des Gesetzes über die Statistik im Produzierenden Gewerbe (ProdGewStatG) erfolgen könnte. Bislang existiert keine Erhebungsgrundlage für diese Daten. Je weiter Datenerhebungen (z.B. anlässlich des CRMA) überarbeitet und an den Datenbedarf einer erfolgreichen Kreislaufwirtschaft angepasst werden, desto mehr bleibt zu prüfen, ob andere Erfassungsaufwände stattdessen reduziert werden können, um Bürokratie insgesamt abzubauen – dies würde sowohl der Industrie als auch den Behörden zu Gute kommen.
- **Gezielte Schärfung der Abfallstatistik für die Zirkuläre Wirtschaft:** Die Systematik der Abfallschlüssel richtet sich in erster Linie nach Herkunft und Gefährlichkeit der Abfälle. Entsprechend können bestimmte Datenbedürfnisse über Wertstoffinhalte, Schrottqualitäten etc. (siehe Kapitel 2.2.1) derzeit nicht ausreichend befriedigt werden. Um die erhobenen Daten besser für Fragen zu Stoffkreisläufen nutzbar zu machen, kann als pragmatischer Zwischenschritt eine Untergliederung der 6-stelligen in 8-stellige Abfallschlüssel effektiv sein. Dieses Instrument ist für die amtliche Statistik bereits praktisch etabliert und wird bei Destatis für diverse Abfallschlüssel in den Erhebungsformularen der Bundesländer genutzt. Ein Beispiel ist der sehr unspezifische Abfallschlüssel 160215 „aus gebrauchten Geräten entfernte gefährliche Bauteile“, der unterteilt wurde in „16021501* quecksilberhaltige Abfälle“ bis „16021512* cadmium- oder selenhaltige Fotoleiterstrommeln“, um Daten zu den einzelnen Separationspflichten aus Anhang VII der Elektroaltgeräte-Richtlinie 2012/19/EU [44] zu gewinnen. Auf diese Weise können gezielt benötigte Informationen zu Materialzusammensetzung (Wertstoffe, Schadstoffe) generiert werden. Aufschlussreiche weitere Beispiele für weitere Nutzungen 8-stelliger Abfallschlüssel mit Blick auf Metalle sind:
 - die tiefere Untergliederung der Schredderoutput-Fraktionen in Gruppe 1910, insbesondere von „191002 NE-Metall-Abfälle“ nach Metallen (z.B. Kupfer, Aluminium, Edelstahl),
 - die Differenzierung des Eintrags für Altfahrzeuge (Abfallschlüssel 160104*) in die verschiedenen Antriebstechnologien (Elektrofahrzeuge, Verbrennerfahrzeuge) und Fahrzeugklassen,

- die Neuausrichtung bzw. Untersetzung der Abfallschlüssel für Elektroaltgeräte gemäß den Kategorien der WEEE-RL und der UNU-Keys sowie Materialaspekte berücksichtigend, insbesondere bei Fraktionen aus der Behandlung.

In solchen Differenzierungen kann eine Chance bestehen, gezielte Daten zu Abfallströmen mit bestimmten Wertstoffen (z.B. Edelmetallen oder kritischen Rohstoffen) zu gewinnen. Es ist allerdings anzumerken, dass die Auskunftspflichtigen von den Statistischen Landesämtern zunächst dazu motiviert werden müssen, diese nicht gesetzlich einzuhalten achtstelligen Abfallschlüssel zu verwenden. Dies ist zuweilen sehr aufwendig und rückfragenintensiv für die Statistischen Landesämter wie für die Unternehmen. Auch bei der grenzüberschreitenden Abfallverbringung sowie der Erhebung über die gefährlichen Abfälle sind lediglich die sechsstelligen Abfallschlüssel verfügbar, da diese Sekundärerhebungen auf Daten aus den offiziellen Begleitscheinen zurückgreifen. Langfristig ist daher die sukzessive Weiterentwicklung des Europäischen Abfallkatalogs unabdingbar. Als gutes Beispiel kann die derzeitige Vorbereitung der Aufnahme von etlichen neuen und sehr differenzierten Abfallschlüsseln für Lithium-Ionen- und weitere Batterien, die bisher überwiegend unter dem Abfallschlüssel 16 06 05 „Andere Batterien und Akkumulatoren“ subsummiert sind [45], gelten. Bei solch einer Weiterentwicklung könnten in gemeinsamer Abstimmung mit den Auskunftspflichtigen neue strukturelle Ansätze geprüft werden, um den Daten- und Materialienkungsanforderungen der Kreislaufwirtschaft besser entsprechen zu können.

- **Einführung einer Statistik für den Export von Gebrauchprodukten:** Für die Recyclingwirtschaft ist von hoher Relevanz, wie umfangreich das verwertbare Abfallpotenzial ist. Jedoch ist für etliche Altprodukte, z.B. Altfahrzeuge und Elektroaltgeräte, das Abfallpotenzial z.B. nicht aus der Inverkehrbringungsmenge und der Verweildauerverteilung bestimmbar. Denn es verlassen (u.a. aufgrund des Wohlstandsgefälles) relevante Mengen bestimmter Produkte während ihrer Nutzungsphase Deutschland als Gebrauchprodukte. Diese Mengen fallen entsprechend nicht in Deutschland als Abfall an. Das inländische Potenzial an Sekundärrohstoffen errechnet sich aus dem inländischen Konsum abzüglich der Gebrauchsexporte. Eine Information über den Umfang des Exports ist also notwendig, um Urban-Mining-Potenziale z.B. bei Fahrzeugen, Elektro- und Elektronikgeräten sowie Generatoren von Windkraftanlagen (CRM-Relevanz) zu ermitteln und (verfehlte) Sammelquoten interpretieren zu können. Dies ist eine wichtige Datengrundlage für die Steuerung und Beurteilung der Erfassungsinfrastruktur und für Investitionsentscheidungen der Recyclingwirtschaft.

Die Außenhandelsstatistik erfasst aufgrund ihrer Mengenschwellen Ex- und Importe von kleineren Unternehmen, die im Gebrauchtwarenhandel anzutreffen sind, kaum. Grundsätzlich ist die Erhebung der Außenhandelsstatistiken zwar als Totalerhebung konzipiert. Im Extrahandel (Handel mit Nicht-EU-Mitgliedstaaten) werden aufgrund der engen Bindung an die Zollformlichkeiten nahezu 100 % aller Importe und Exporte Deutschlands erfasst. Im innergemeinschaftlichen Handel (Intrastat) wurde zur Entlastung der kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) jedoch eine Anmeldeschwelle eingeführt. Derzeit sind Unternehmen von der Meldung befreit, deren innergemeinschaftlicher Warenverkehr pro Jahr den Wert von 500 000 Euro bei der Versendung bzw. 800 000 Euro bei den Importen nicht übersteigen. Der Umfang des innergemeinschaftlichen Handels unterhalb der Anmeldeschwelle wird anhand der von der Steuerverwaltung übermittelten Daten lediglich undifferenziert geschätzt.[46] Angesichts dieser im Sinne der Bürokratieentlastung für KMU gewünschten Mengenschwellen wäre folglich eine weitere Differenzierung der Waren-Codes in Neu- und Gebrauchprodukte nur bedingt

nützlich. Selbst bei Fahrzeugen, für die eine solche Differenzierung bereits existiert, erfasst die Außenhandelsstatistik nur rund ein Fünftel der tatsächlichen Exporte von Gebrauchtfahrzeugen aus Deutschland in andere Mitgliedstaaten.

Im Gegensatz dazu sind neue Statistiken in anderen Bereichen aussichtsreich, in denen bereits eine gesetzliche Registrierung und Erfassung existiert, um zusätzlich Bürokratie zu vermeiden. Für Fahrzeuge könnten die Bewirtschaftungsdaten des Kraftfahrtbundesamtes genutzt werden [47]. Für Elektro- und Elektronikgeräte ist ein Ansatzpunkt in den bestehenden produktsspezifischen Datenerhebungen unter der WEEE-RL zu sehen.

4.4 Bessere Bestimmung von Rohstoffpotenzialen in verschiedenen Abfallströmen

- **Durchführung von bundesweiten Abfallsortieranalysen und Abfallanalysen:** Sortieranalysen werden aufgrund ihres hohen Kostenaufwands nur unregelmäßig über Studien und i.d.R. nur für Restmüll und weitere Siedlungsabfallfraktionen durchgeführt. Sie sind aber wesentlich, um Stoffflüsse nachzuvollziehen, die ggf. unsachgemäß verwertet werden, so dass sie für ein adäquates Recycling verloren gehen.

In den letzten Jahren wurden auf EU-Ebene für mehrere Abfallarten regelmäßige (alle vier bzw. fünf Jahre) Untersuchungs- und Berichtspflichten eingeführt, so für Kunststoffverpackungsabfälle (nach Durchführungsverordnung (EU) 2023/595), Verpackungsabfälle aller Materialien (gemäß dem Guidance-Dokument zur Entscheidung 2005/270/EG der EU-KOM), Altbatterien (nach Batterie-Verordnung (EU) 2023/1542) und Lebensmittelabfälle (gemäß Delegiertem Beschluss (EU) 2019/1597). In den Sortieranlaysen der Mitgliedstaaten sind die Anteile dieser Abfallarten im Hausmüll und z.T. von weiteren Abfallströmen und gewerblichen Siedlungsabfällen zu ermitteln. Gelänge es, Untersuchungen zu weiteren Abfallströmen zu diesen regelmäßigen Sortier- und Abfallanalysen zu ergänzen, ließen sich sehr effizient relevante Daten zum Stand und zur weiteren Entwicklung der Kreislaufführung erheben. Diese regelmäßigen Abfallanalysen müssten in enger Abstimmung mit den betroffenen Unternehmen erfolgen.

Neben dem Feststellen der Erfassung werthaltiger Abfälle in Abfallströmen, in denen sie nicht verwertet werden, sind z.B. Sortieranlaysen von getrennt erfassten Abfällen wie Elektro- und Elektronikaltgeräten aufschlussreich, um die aktuellen Anteile spezifischer Geräte bzw. Gerätegruppen sowie Materialien und Rohstoffe ermitteln zu können. Hierzu gilt es, den Abfall vor der Behandlung zu untersuchen (Bestimmung der Fehlwürfe, Differenzierung spezifischer Abfallteilströme innerhalb eines Abfalls, z.B. Anteil der IT-Geräte). Ergänzend dazu sind chemische Analysen nach der Behandlung bedeutend, um Aussagen zu Legierungsgruppen und Störstoffverschleppung treffen zu können. Durch die regelmäßig wiederkehrende Durchführung kann das bestehende System der Abfallanalysedaten kontinuierlich aktuell gehalten werden. Der hohe Erhebungsaufwand lässt sich aber durch Repräsentativitätsanalysen, Kombinationen von Fragestellungen und zeitliche Intervalle, z.B. alle fünf Jahre, verringern [48]. Dies kann dem Gesetzgeber helfen, Verbesserungspotenziale in der Kreislaufwirtschaft zu heben und ist für die Investitions- und Kostenrechnung der Anlagenbetreiber sinnvoll. Die Analysedaten sollten öffentlich in Datenbanken wie ABANDA bereitgestellt werden. Auch hierfür sollte eine Kosten-Nutzen-Analyse gemeinsam mit Stakeholdern abgestimmt werden.

- **Bessere Nutzung von Abfallanalysedaten aus dem Vollzug der Bundesländer:** Für die Entsorgung nachweispflichtiger Abfälle legen die Abfallerzeuger den Abfallbehörden einen Entsorgungsnachweis vor, zu dem oft auch eine Deklarationsanalyse des Abfalls gehört (§ 3 NachwV). Diese Analysen stellen somit eine Informationsquelle in der Regel

zu Schadstoffgehalten, teilweise auch zu Metallgehalten dar. Zur Auswertung der Schadstoffniveaus und Wertstoffpotenziale bestimmter Abfallarten im zeitlichen Verlauf wäre eine (anonymisierte) systematische Sammlung der bei den Abfallbehörden vorliegenden Daten hilfreich. Ein Beispiel stellt die ABANDA-Datenbank [29] des Informations-Portals Abfallbewertung (IPA) dar, die Abfallanalysendaten von Fachbehörden mehrerer Bundesländer sammelt und eine Auswertung ermöglicht. So könnte die Datenlage durch Anknüpfen an bereits bestehende Datenbestände verbessert werden.

- **Daten aus Sortierprozessen nutzbar machen:** Daten zu den Mengen und Qualitäten der aufbereiteten Materialien liegen den Schrottaufbereitungs- und Schredderbetreibern zumindest teilweise vor, wenn sie automatisierte Detektions- und Trenntechniken verwenden (z.B. LIBS, XRF). In Absprache mit den Betreibern könnten diese Daten einmalig in aggregierter Form und nach Legierungsgruppen und Handelsqualitäten getrennt rückwirkend für einzelne Geschäftsjahre abgefragt werden. Dies würde es ermöglichen, einen Überblick über die behandelten Stoffströme zu erhalten.

4.5 Weitere Informationsgrundlagen mit systemischen Datenmodellierungen erschließen

- **Regelmäßige Durchführung von Materialflussanalysen (MFA) für kritische, strategische und umweltrelevante Rohstoffe:** Auf EU-Ebene werden regelmäßig sogenannte Material System Analysen (MSA) für kritische und strategische Rohstoffe durchgeführt. Diese Studien dienen als wichtige Datengrundlage für die Berechnung von Kennzahlen im Rahmen der EU-Kritikalitätsstudien sowie für das Monitoring der Kreislaufwirtschaft. Die Ergebnisse zeigen eindrucksvoll, dass die Recyclingverfügbarkeit entscheidender Rohstoffe für die Energiewende, wie beispielsweise Lithium oder Neodym, derzeit nahezu bei null liegt. Die EU-MSA-Studien bieten ein etabliertes Rahmenwerk für Materialflussanalysen und die Erfassung von Daten und Indikatoren zur Kreislaufwirtschaft. Deutschland könnte auf dieser Grundlage nationale MSA-Studien für strategisch relevante Rohstoffe erstellen, um Datenlücken in den amtlichen Statistiken zu schließen. Synergien mit der Datenerhebung auf EU-Ebene, insbesondere durch das Joint Research Centre (JRC), sollten hierbei berücksichtigt werden. Das Ziel wäre, bestehende Datenlücken zu schließen und konkrete Ziele und Kennzahlen für die deutsche Kreislaufwirtschaftspolitik abzuleiten.

4.6 Neue Datenquellen integrieren

- **Daten aus der verpflichtenden Nachhaltigkeitsberichterstattung prüfen und auswerten:** Die Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD[49]) schreibt mit transparenten Standards eine umfassende und überprüfte Berichterstattung über Umwelt, Soziales und Unternehmensführung (ESG) vor, die genauere Einblicke in die Nachhaltigkeitsrisiken und -chancen von Unternehmen bietet. Der daran geknüpfte neue European Sustainability Reporting Standard (ESRS) E5 führt eine verpflichtende Berichterstattung über Ressourcennutzung, Abfallerzeugung und zirkuläre Geschäftsmodelle wie die Rückgewinnung von Altprodukten und Materialien ein. Es ist zu prüfen, ob diese Daten systematisch ausgewertet werden können, um dabei auch in Aggregation über zahlreiche Unternehmen und Branchen Rückschlüsse auf Rezyklatgehalte und -qualitäten zu ziehen. Zusammen mit der Lieferkettenrichtlinie (CSDDD) wird die CSRD im Zuge eines Omnibus Pakets der EU-Kommission angepasst, so dass vor allem die daraus hervorgehenden Regelungen zum ESRS E5 von Bedeutung sein werden.

- **Daten des CBAM berücksichtigen:** Ein zur Nachhaltigkeitsberichtserstattung vergleichbares Vorgehen ist auch hinsichtlich der Außenhandelsströme möglich, die vom Grenzausgleichsmechanismus (CBAM)[50] betroffen sind. Dieser wird Anfang 2026 implementiert und erstreckt sich auf energieintensive Waren, darunter solche aus Stahl und Aluminium. Importeure müssen dann die direkten und indirekten Emissionen, welche im Produktionsprozess der importierten Güter aus Nicht-EU-Ländern entstanden sind, berechnen und dokumentieren. Der Einsatz von Rezyklat sorgt verfahrensbedingt bei den Metallprozessrouten zu 5 bis 18fach geringeren CO₂-Emissionen. Diese Daten können herangezogen werden um Rezyklatgehalte in den Güterströmen zu erfassen.
- **Industrial Emissions Portal Regulation (IEPR) - Berichterstattung für relevante Rohstoffe nutzen:** Das Industrieemissionsportal (IEPR) erfüllt internationale Berichtspflichten (UNECE PRTR-Protokoll und Aarhus Convention) und bietet dabei der Öffentlichkeit Zugang zu wichtigen Umweltdaten von Industrieanlagen in der EU. Zusammen mit der ebenfalls novellierten Richtlinie über Industrieemissionen (IED) sollen die damit einhergehenden Vorschriften und Berichtspflichten einen besseren Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt bewirken, da schädliche Emissionen aus Industrieanlagen verringert und gleichzeitig Energieeffizienz, Kreislaufwirtschaft und Dekarbonisierung gefördert werden. Die Verordnung sieht die Veröffentlichung von Informationen über den Rohstoffeinsatz und -verbrauch bei der Tätigkeit der Anlagen vor. Bis Ende 2025 wird die EU-Kommission eine Liste an Rohstoffen mit entsprechenden Kriterien erarbeiten und vorstellen. Zur Harmonisierung der Anforderungen aus der Verordnung zu kritischen Rohstoffen (CRMA) sowie den Kreislaufwirtschaftszielen der EU insgesamt sollten bei der Berichterstattung kritische und Sekundärrohstoffe mitgedacht werden.
- **Digitale Produktpässe (DPP) ausgestalten und nutzbar machen:** Die europäische Ökodesignverordnung (ESPR [51]) macht nachhaltigere Produkte zur Norm und sieht die Verwendung des Digitalen Produktpasses (DPP) langfristig für alle Produktkategorien vor. Mit der Einführung von DPP wird die Bereitstellung und Weitergabe verschiedener Produktinformation entlang von Wertschöpfungsketten ermöglicht (siehe Art. 77 EU BattV [52], Art. 9 bis 15 ESPR [51]). Hierzu zählen die Komponenten, Materialien und chemischen Substanzen aber auch Informationen zu Reparierbarkeit, Ersatzteilen, fachgerechter Entsorgung sowie ökologische Kennwerte. Erwartet werden kann eine deutliche Verbesserung der Verwertungsqualität, insbesondere mit Blick auf Spezialmetalle, denn bedeutende Hindernisse für hochwertiges Recycling sind der Mangel an Informationen über Menge und Lokalisierung der Materialien sowie Informationen zur Separation seitens der Verwerter. Daten aus dem DPP können zusätzlich der Erkundung (Prospektion) und Kartierung des anthropogenen Lagers dienen, indem diese in Typologien, Materialkataster und Datenbanken mit Szenarioanalysen einfließen. Kombiniert mit Lebensdauerinformationen der Produktgruppen sind auf diese Weise volkswirtschaftliche Prognosen möglich, wann (Sekundär-)Rohstoffe nach dem Lebensende von Produkten aus dem anthropogenen Lager wieder verfügbar werden (dynamische MFA-Modellierungen). Hierzu müssen auf europäischer Ebene die Voraussetzungen geschaffen werden. Dies bedeutet, dass staatlichen Einrichtungen wie Fachbehörden, Vollzügen oder auch dem Zoll zur Erfüllung ihrer Aufgaben Zugriffsmöglichkeiten auf die DPP und insbesondere die Stoff- und Materialdeklarationen ermöglicht werden müssen, um recyclingrelevante Daten aggregiert auswerten und der Öffentlichkeit bereitstellen zu können.
- **Digitalisierung eröffnet neue Datenmöglichkeiten:** Viele moderne Produkte sind verbunden, wodurch sich neue Datenquellen eröffnen. So werden beispielsweise diverse Daten von Fahrzeugen regelmäßig an die Hersteller übermittelt. Eine datenschutzkonforme

Auswertung könnte offizielle Fahrzeugstatistiken unterstützen, um Abflüsse der Fahrzeugflotte aus Deutschland besser nachzuvollziehen. In Kombination mit Informationen zur Materialzusammensetzung (insbesondere über einen DPP) ließe sich das bedeutende anthropogene Materiallager von Fahrzeugen in Deutschland nachverfolgen.

- **Bürokratiearme Erfassung und Auswertung neuer Datenquellen.** Die EU Kommission hat im Arbeitsprogramm bis 2029 so genannte Omnibus-Pakete vorgeschlagen [53], mit denen die bürokratischen Belastungen aus unterschiedlichen Bereichen, auch im Umwelt- bzw. Nachhaltigkeitsbereich, entweder vor ihrem Inkrafttreten zurückgenommen oder bestehende Dokumentations- und Berichtspflichten verringert werden sollen. Die Kommission strebt eine Verringerung des Verwaltungsaufwands für Unternehmen bis 2029 um mindestens 25 % und gar 35 % für mittelständische Unternehmen an. Da die deutsche Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft mittelständig geprägt ist, drohen Branchen- und Trendcharakterisierungen durch die geplante Erhöhung der Mindestbetriebsgrößen für die Berichterstattung lückenhafter zu werden. Bei der Ausrichtung der Omnibus-Pakete sollte daher gezielt nach Optionen intelligenter Zusammenlegung von Berichtspflichten gesucht werden, um im Zuge des Bürokratieabbaus keine steuerungsrelevanten Daten und Informationen komplett einzubüßen. Die Berichterstattung zu Stoffströmen einer Kreislaufwirtschaft lässt sich verbessern, indem diese gebündelt wird, ohne zusätzliche Berichtspflichten aufzuwerfen. Es bleibt auch abzuwarten, welchen Beitrag Künstliche Intelligenz und Big Data im Zusammenhang mit Erfassung, Aggregation und Normung von Daten leisten können.

4.7 Anthropogene Lagerdynamik abbilden und Prognostik zum Urban Mining liefern

- **Nationale Urban-Mining-Datenplattform:** Das anthropogene Rohstofflager steht im Zentrum einer nationalen, resilienten Rohstoffbewirtschaftung, die zunehmend auf ressourcenschonende sekundäre Rohstoffquellen aus dem Recycling fußt. Das anthropogene Lager Deutschlands wächst jährlich um rund 600 Mio. t [54] und damit um rund 50 % des inländischen Primärmaterialeinsatzes für Konsum und Investitionen. Flankierend zur Verabschiedung einer Urban-Mining-Strategie mit Aktionsfeldern besonders relevanter Gütergruppen sollte eine nationale Urban-Mining-Datenplattform entstehen. Diese könnte als öffentlich zugängliches Datenportal Potenziale aufzeigen und die Planbarkeit von Anlagenkapazitäten und Selbstversorgungsraten zur effektiven Aufbereitung der freiwerdenden Lagermassen des anthropogenen Lagers unterstützen. Hierzu sollte die Datenplattform solche Informationsgrundlagen und Datenquellen bündeln, die die Entwicklung der Güterbestände mit ihren spezifischen Materialgehalten erfassen und diese mithilfe von Produktnutzungsdauern und Verweilzeitfunktionen prognostisch auswerten. Zu dieser Kartierung des anthropogenen Lagers sind bereits wissenschaftliche Voruntersuchungen vorhanden, die es fortzuschreiben und regelmäßig aufzubereiten gilt [55]. In diesem Zusammenhang ist auch in der NKWS als Maßnahme vorgesehen, ein dynamisches Materialkataster zu erstellen, welches Informationen über Stoffströme sowie Legierungsarten und deren chemische Zusammensetzung, u. a. über das Vorkommen kritischer und Technologiemetalle in Produkten und in Abfallströmen, bereitstellt. Zur nationalen Urban-Mining-Plattform sollen digitale Produktpässe, Gebäuderessourcenpässe und Materialkataster perspektivisch neue, wesentliche Informationsgrundlagen liefern.

4.8 Datenbereitstellung verbessern

- **Ressortübergreifende Datenerfassung und zentrale Bereitstellung von Sekundärrohstoffdaten:** Es ist zu prüfen, ob es als hoheitliche Aufgabe gelten soll, Daten zur Sekundärrohstoffproduktion in einer ausdifferenzierten Materialgliederung bereitzustellen – analog zur bereits etablierten Berichterstattung zur Primärrohstoffproduktion. In Abstimmung mit der Industrie sollten mit möglichst wenig Aufwand Strukturen geschaffen werden, die eine bessere Messbarkeit und damit Steuerung der Kreislaufwirtschaft ermöglichen. Dabei können unbürokratisch bereits vorhandene Open-Data-Infrastrukturen genutzt werden, um die Daten aufbereitet und adressatengerecht bereitzustellen [56].

4.9 Zugriffsrechte auf Daten unter Wahrung der Interessen aller Beteiligten

- **Öffentliche Datenräume mit Data-Governance schaffen:** Die Kreislaufwirtschaft erfordert insbesondere zur Steigerung des qualitativen und quantitativen Recyclings eine eigene, wesentlich tiefer als bislang gegliederte Datenbasis, die sich u.a. auf die Beschaffenheit der in Verkehr gebrachten Produkte erstreckt. Dazu müssten öffentliche und private Datensysteme dezentral miteinander verbunden und die Nutzung von Daten über Ländergrenzen, Sektoren und Akteure entlang von zirkulären Wertschöpfungsketten hinweg sowie innerhalb eines definierten, vertrauenswürdigen Datenraums ermöglicht werden [57, 58]. So existiert, ausgehend von Catena-X [59], einem kollaborativen und offenen Datenökosystem, das die Transparenz, Effizienz und Nachhaltigkeit in den Wertschöpfungsketten der Automobilindustrie verbessern soll, mit Manufacturing-X [60] eine Plattforminitiative der Bundesregierung, die darauf abzielt, ein offenes digitales Ökosystem für alle Fertigungsindustrien zu schaffen, um Prozesse zu rationalisieren und neue digitale Geschäftsmodelle zu ermöglichen.

Diese Datenräume sollten den symmetrischeren Austausch unter Achtung sensibler Unternehmensdaten ermöglichen und sowohl Unternehmen als auch den öffentlichen Sektor in die Lage versetzen, bessere Entscheidungen in einer Kreislaufwirtschaft zu treffen. Hierzu ist eine dezidierte zirkuläre Data-Governance erforderlich, also ein Regelwerk, das präzise festlegt, wie produktbezogene Informationen erzeugt, gespeichert, verwendet und geteilt werden sollen [61]. Diese Anforderung manifestiert sich zuvorderst im Digitalen Produktpass (DPP). Dabei muss den Geschäfts- und Geheimhaltungsinteressen beteiligter Unternehmen genauso Rechnung getragen werden wie den Informationsbedarf der Politik, der Wissenschaft und der Öffentlichkeit, um die Kreislaufwirtschaft fortzuentwickeln. Hierzu können je nach Datenbedarf und Zugriffsrecht automatisierte Anonymisierungen und räumliche wie auch zeitliche Aggregationen vorgenommen werden. Im Zuge der Umsetzung der NKWS sollte ein Regelwerk erarbeitet werden, um die Zugriffsbedarfe und -rechte auf die Datengrundlagen der Kreislaufwirtschaft konsistent festzulegen und europäisch zu harmonisieren. Staatliche Behörden wie das UBA oder die DERA sind hierbei wichtige Nutzergruppen, die mitgedacht werden müssen, um recyclingrelevante Daten auswerten und diese sowie die Ergebnisse der Öffentlichkeit bereitzustellen zu können.

A Anhang

A.1 Aluminium - Fallstudie zur Datensituation

Charakteristik

Aluminium ist nach Stahl massenmäßig der global zweithäufigste recycelte metallische Werkstoff mit einer jährlichen Produktion von fast 3 Mio. t Recycling-Aluminium (2022) allein in Deutschland [25]. Bei Kontakt mit Luftsauerstoff bildet das Leichtmetall eine schützende Passivierungsschicht, die eine weitere Korrosion verhindert. Es lässt sich leicht verformen, und seine Festigkeit kann durch Zugabe von Legierungselementen erhöht werden. Zudem hat Aluminium eine hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit. Aufgrund dieser Materialeigenschaften wird es in Form von Aluminiumlegierungen in verschiedenen Anwendungsfeldern eingesetzt, darunter Transport (wie PKW, LKW, Bahn, Schiff und Luftfahrt), Bauwesen, Verpackungen (wie Dosen und Folien), Maschinenbau, Elektrik, Konsumgüter und in von der Menge her kleineren, meist dissipativen Anwendungen [62].

Grundsätzlich werden bei Aluminium zwei Haupttypen von Legierungen unterschieden: Knetlegierungen und Gusslegierungen. Die Knetlegierungen werden nach EN 573 in die Legierungsgruppen „1xxx – 8xxx“ eingeteilt. Diese Einteilung orientiert sich hauptsächlich an den Hauptlegierungselementen wie Magnesium, Silizium, Kupfer, Zink und Mangan. Knetlegierungen werden u.a. für Lebensmittelverpackungen, Getränkedosen, Wärmetauscher, Fahrzeugrahmen oder Anwendungen in der Luftfahrt verwendet. Das Hauptanwendungsgebiet für Gusslegierungen liegt vor allem in Motorblöcken im Fahrzeugbau. Typische Gusslegierungen sind AlSi, AlSiCu oder AlMg.

Die Nachfrage nach Aluminiumlegierungen weltweit besteht zu etwa einem Drittel aus 6xxx Knetlegierungen. Weitere mengenmäßig relevante Knetlegierungsgruppen sind 1xxx, 3xxx, 5xxx und 8xxx, während die Knetlegierungsgruppen 2xxx, 4xxx und 7xxx eher Nischenanwendungen bedienen. Etwa ein Viertel der Nachfrage entfällt auf Gusslegierungen.

Für das Recycling von Aluminiumschrotten ist die Identifikation und anschließende Separation ausschlaggebend, um ein hochwertiges Recycling ohne Vermischung der Legierungsgruppen zu ermöglichen und so einen Qualitätsverlust (Downcycling) zu verhindern. Nur so können hochwertige Knetlegierungen aus Sekundärrohstoffen produziert werden.

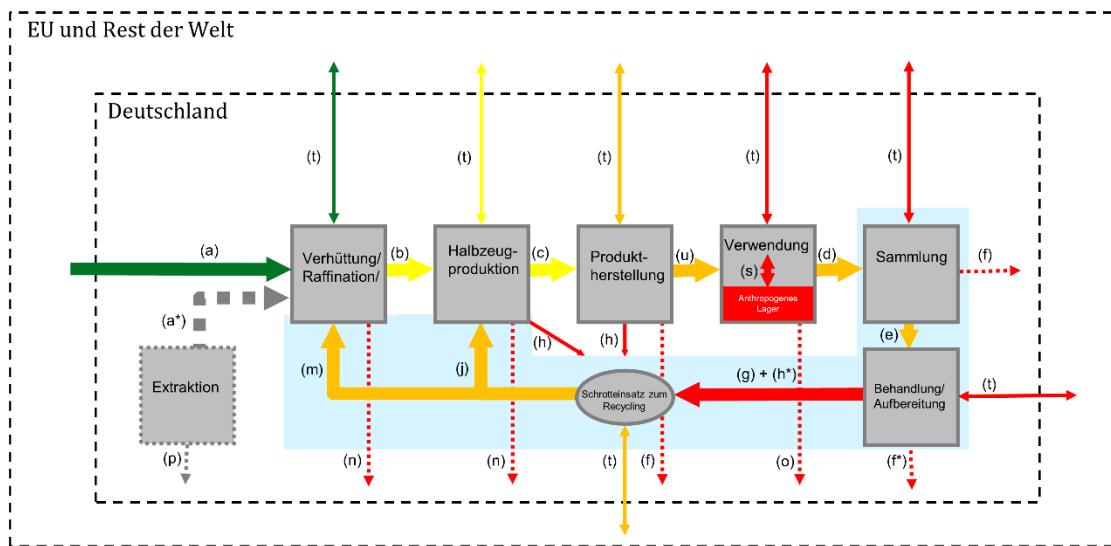
Datensituation

Die Datensituation bei Extraktion, Verhüttung, Raffination und Halbzeugproduktion ist durch öffentlich zugängliche Statistiken vergleichsweise gut. Allerdings verschlechtert sich gerade die Zugänglichkeit zu aktuellen globalen Produktionsdaten, da viele kommerzielle Anbieter in den Markt drängen und diese Daten zunehmend kleinteilig verkaufen. Gerade bei Aluminium sei darauf hingewiesen, dass wichtige Produktions- und Exportländer wie Russland, Jamaika oder Guinea keine Import- und Exportstatistiken herausgeben und man hier auf Angaben der Importländer angewiesen ist (Spiegeldaten). Bei der Produktherstellung und insbesondere bei Sammlung, Behandlung/ Aufbereitung, Schrotthandel und Recycling von Aluminiumlegierungsschrotten gibt es hingegen einen großen Mangel an Informationen über die Mengen und ihre chemische Zusammensetzung.

In Abbildung 5 wird für den Stoffstrom Aluminium die Datensituation farbig visualisiert und nachfolgend erläutert. Die Buchstaben beziehen sich dabei unmittelbar auf die Beschriftung im Referenzschema (Abbildung 2). Dabei werden in eckigen Klammern die Kategorien der Quellen

als Abkürzung genannt: Amtliche Statistiken [AS], Daten kommerzieller Anbieter [KA], Branchenstatistiken [BS], Weitere Studien, Datenaufbereitungen und Modellierungen und [WS] Individuelle Expertise [IE].

Abbildung 5 Datenverfügbarkeit der Aluminiumstoffflüsse



Legende

- Grün: Daten zu Mengen und Qualitäten weitgehend vorhanden

Gelb: Daten zu Mengen in amtlichen Statistiken unvollständig, keine Informationen zu Qualitäten

Orange: Daten zu Mengen unvollständig oder unregelmäßig über andere Datenquellen, keine Informationen zu Qualitäten

Rot: Keine oder nur sporadischen Daten zu Mengen und Qualitäten vorhanden (aus individueller Expertise, Einzelstudien, Modellen etc.)

Quelle: Eigene Abbildung

- a, a*: In Deutschland wird kein Bauxit (Aluminumerz) gewonnen, sodass hierfür keine Daten notwendig sind; für Import und Export von Bauxit stehen Import- und Exportdaten von Destatis zur Verfügung. [AS]

b: Die Produktion von Alumina (Aluminumoxid) in Deutschland wird erfasst, allerdings produziert nur ein Unternehmen Aluminumoxid. Daten könnten über das Unternehmen, oder mit mehrjähriger Verzögerung über den British Geological Survey (BGS) bezogen werden. Import- und Exportdaten gibt es über Destatis. Insgesamt sind diese Daten als zuverlässig einzuschätzen.

Die Produktion von Aluminium in Deutschland wird vom Verband „Aluminium Deutschland (AD)“ erfasst und steht grundsätzlich vergleichsweise zeitnah zur Verfügung. Auch hier gibt es nur noch ein Unternehmen, das Primäraluminium in Deutschland produziert und in seinen Geschäftsberichten Daten zur Verfügung stellt.

Ansonsten stehen Daten erst über den BGS mit mehrjähriger Verzögerung zur Verfügung. Import- und Exportdaten werden von Destatis erfasst und veröffentlicht. [BS, AS] Daten zur Produktion von einzelnen Aluminiumlegierungen liegen nicht vor. Über

AD können jedoch die recycelten Mengen nach Refiner und Remelter bzw. nach den eingesetzten Alt- und Neuschrotten in Deutschland unterschieden werden. Zusammen mit den existierenden Abfallstatistiken ist es möglich, daraus Hinweise auf die jeweiligen Legierungsgruppen abzuleiten. [BS]

- c, u: Die Aluminiummengen müssen über den Gehalt in den jeweiligen Anwendungsfeldern quantifiziert werden. Die Datenerfassung für Altfahrzeuge, Bau- und Gewerbeabfälle sowie Verpackungen und Elektroaltgeräte sind hier maßgeblich. Für Verpackungen (v.a. Dosen) werden Daten erfasst. Der Aluminiumgehalt in anderen Stoffströmen ist nicht statistisch erfasst und liegt in Einzelfällen lediglich für spezifische Produkte vor. Entsprechend liegen auch keine spezifischen Daten auf Legierungsebene vor. Eine Abschätzung für Aluminium in Fahrzeugen, Elektrogeräten und Batterien sowohl für im Verkehr gebrachte Mengen als auch im anthropogenen Lager sowie im Abfallstrom wurde im Forschungsprojekt ProSUM [63] sowie teilweise in KartAL III [64] vorgenommen. Die Daten werden jedoch nicht regelmäßig aktualisiert und sind aufgrund von Vertraulichkeitserklärungen teilweise nur stark aggregiert verfügbar. Daten zu Nutzungs- und Verweildauern zur Vorhersage des Abfallanfalls von Produkten, die aus Aluminium bestehen oder Aluminium enthalten, sind ebenfalls nur punktuell verfügbar. [AS, WS, IE]
- d: Die Daten zu Aluminiumfrachten in EoL-Abfallströmen werden nur teilweise statistisch erhoben. Aggregierte Daten zu Metallen insgesamt liefern die Abfallschlüsselnummern für Siedlungsabfälle (AVV 20 01 40) sowie Verpackungen (AVV 15 01 04). Lediglich für Bau- und Abbruchabfälle wird Aluminium separat ausgewiesen (AVV 17 04 02). [AS, WS, IE]
- o: Es existieren keine Daten zu Materialverlusten in andere Abfallfraktionen, aus denen das Aluminium nicht zurückgewonnen wird. Es sind lediglich punktuelle, eingeschränkte Abschätzungen möglich (z.B. über Analyse von MVA-Aschen). Dies gilt ebenso für sonstige Verluste aus dem anthropogenen Lager. [IE]
- e: Es existiert keine Erfassung von Mengen und Qualitäten zwischen der Sammlung und Behandlung/Aufbereitung. In Teilbereichen können Daten zu Mengen berechnet und Qualitäten abgeschätzt werden (beispielsweise über die VerpackungsVO). [WS, IE]
- f: Die Verluste aus der Produktherstellung und Sammlung werden nicht erfasst und liegen nur den Unternehmen vor. [IE]
- f*: Die Verluste durch ineffiziente Aufbereitung werden nicht systematisch erfasst. [IE]
- g, h*: Die aufbereiteten Materialmengen an Alt- und Neuschrotten aus der Behandlung werden meist nicht zentral erfasst. Die Informationen zu Mengen und Qualitäten sind aber bei den Aufbereitungs-/ Behandlungsanlagen (z.B. Shredderbetriebe) bekannt. Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen erfassen nur Nichteisenmetalle als Summe und weisen Aluminium nicht separat aus. So gibt der AVV 19 10 02 die NE-Metall-Abfälle aus Schreddern von metallhaltigen Abfällen und AVV 19 12 03 die Nichteisenmetalle aus der mechanischen Behandlung von Abfällen (z. B. Sortieren, Zerkleinern, Verdichten, Pelletieren) a. n. g. wieder. [AS, WS, IE]
- h: Daten zu Mengen und Qualitäten von Neuschrotten aus der Halbzeug- und Produktherstellung werden nicht erfasst. Es sind nur Abschätzungen auf Basis von Einzelstudien und Unternehmensbefragungen möglich. [WS, IE]

- j: Daten über den Einsatz von Rezyklaten in der Halbzeugindustrie liegen meist nicht vor. Ansonsten siehe m. [BS, WS, IE]
- m: Daten zum Einsatz von Neuschrotten (in „Remeltern“) und Altschrotten (in „Refinern“) sind durch die Statistik des Verbandes AD indirekt vorhanden. Über die veröffentlichten Einsatzmengen in Remeltern und Refinern ist eine indirekte Abschätzung des OSR möglich. Es werden allerdings keine Legierungsqualitäten erfasst. [BS, WS, IE]
- n: Materialverluste aus Verhüttung, Produktion von Halbzeugen und Produkten werden nicht zentral erfasst. Es sind nur Abschätzungen auf Basis von Einzelstudien und Unternehmensbefragungen möglich. [BS, WS, IE]
- s: Für die im anthropogenen Lager gebundene Menge an Aluminium und die jährlichen Zu- und Abflüsse existieren nur Abschätzungen in Einzelstudien im Themenfeld Urban-Mining.
- t: Die Mengen von Importen und Exporten von Aluminium und verschiedenen Warengruppen stehen über das statistische Bundesamt (DESTATIS) zur Verfügung. Hier könnte ebenfalls eine grobe Abschätzung auf Legierungsgruppenebene erfolgen. Aluminiumschrotte können über die HS-Codes 262040 und 7602 über die öffentliche Statistik teilweise erfasst werden. [AS, WS, IE] Konkretere Daten oder Datenreihen zu den Aluminiumimporten in höherverarbeiteten Gütern wie PKW stehen allerdings nicht zur Verfügung.
- p: Nicht relevant, da in Deutschland derzeit kein Bauxitbergbau betrieben wird.

Die Beschreibung des Aluminiumkreislaufes ist nach heutigem Stand für die ersten Abschnitte der Wertschöpfungskette recht gut. Mit zunehmendem Produktcharakter und am Übergang in die Verwendung verschlechtert sich die Datenlage jedoch. Nicht erfasste Mengen und Verluste in der Verwendung und am (Produkt-)Lebensende machen Aussagen zur Kreislaufführung schwierig. Für EOL-Materialien basieren die Daten auf einzelnen Berichtspflichten für Produkte (z.B. Verpackungen), Verbandsdaten, (kommerziellen) Studien und Schätzungen durch Fachleute. Differenzierte Aussagen zu (Knet- und Guss-) Legierungen können in der Regel nicht getroffen werden.

A.2 Kobalt – Fallstudie zur Datensituation

Charakteristik

Kobalt ist ein Übergangsmetall und wird hauptsächlich als Beiprodukt in der Bergwerksförderung von Kupfer und Nickel gewonnen. In seiner elementaren Form ist es ein glänzendes, grau-silbernes, sprödes Metall. Kobalt ist sehr hart, zäh und ferromagnetisch und kann mit vielen anderen Metallen Legierungen bilden wie z. B. Eisen, Chrom, Molybdän, Nickel. Kobalt behält seine Festigkeit sowie seine magnetischen Eigenschaften bei hohen Temperaturen und weist eine relativ geringe thermische und elektrische Leitfähigkeit auf.

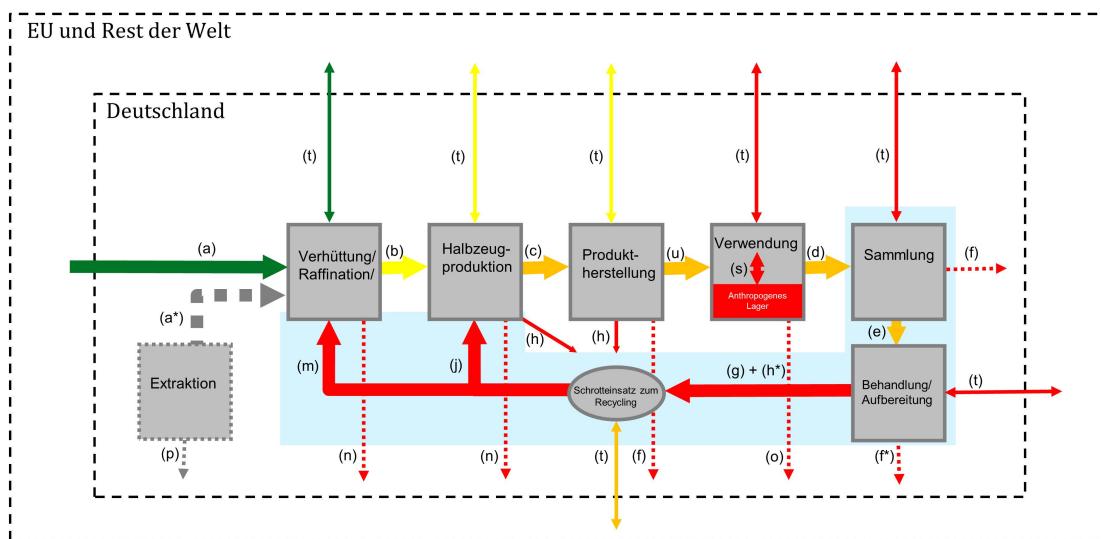
Weltweit wird generell mit stark steigender Primärproduktion aufgrund des weiter steigenden hohen Bedarfs für Batterien für die Elektromobilität gerechnet. Der Elektromobilitätssektor sowie tragbare Elektronik sind mittlerweile die größten Kobaltnutzer mit einem Anteil von etwa 70%.

Durch die Transformation im Verkehrssektor und die rasch ansteigende Verbreitung von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) gewinnt Kobalt auch in der Recyclingindustrie eine signifikante Bedeutung. Insbesondere die vielen für Deutschland geplanten Projekte für ein flächendeckendes LIB-Recycling werden stark steigende Recyclingmengen zur Folge haben.

Datensituation

In Abbildung 6 wird für den Stoffstrom Kobalt die Datensituation farbig visualisiert und nachfolgend erläutert. Die Buchstaben beziehen sich dabei unmittelbar auf die Beschriftung im Referenzschema (Abbildung 2). Dabei werden in eckigen Klammern die Kategorien der Quellen als Abkürzung genannt: Amtliche Statistiken [AS], Daten kommerzieller Anbieter [KA], Branchenstatistiken [BS], Weitere Studien, Datenaufbereitungen und Modellierungen und [WS] Individuelle Expertise [IE].

Abbildung 6 Datenverfügbarkeit der Kobalt-Stoffflüsse



Legende

- Grün: Daten zu Mengen und Qualitäten weitgehend vorhanden
- Gelb: Daten zu Mengen in amtlichen Statistiken unvollständig, keine Informationen zu Qualitäten
- Orange: Daten zu Mengen unvollständig oder unregelmäßig über andere Datenquellen, keine Informationen zu Qualitäten
- Rot: Keine oder nur sporadischen Daten zu Mengen und Qualitäten vorhanden (aus individueller Expertise, Einzelstudien, Modellen etc.)

Quelle: Eigene Abbildung

a, a*: Es ist eine umfassende Datengrundlage im Bereich Vorkommen, Informationen zu Metallgehalten sowie Ressourcen und Reserven bezogen auf unterschiedliche Lagerstättentypen vorhanden. Diese Daten sind öffentlich zugänglich z.B. über geologische Dienste (BGR, USGS, BGS). Produktionszahlen zur Bergwerksförderung werden teilweise ebenfalls durch öffentliche Institutionen (BGR, USGS, BGS, Cobalt Institute [65]) sowie durch Jahresberichte einzelner Unternehmen und kommerzielle Anbieter, wie z.B. Darton Commodities [66], in Form von Marktanalysen zur Verfügung gestellt.

Preisdaten zu Primärrohstoffen werden durch die BGR erhoben. [AS, BS, WS] Da in Deutschland kein Kobalt gefördert wird, müssen hierfür keine Daten bereitgestellt werden.

- b: Daten zur Raffinadeproduktion von Kobalt werden von öffentlichen Institutionen bereitgestellt und können auch über kommerzielle Anbieter erworben werden. In Deutschland wird kein raffiniertes Kobalt produziert, Daten zu Importen und Exporten sind aus den Import- und Exportdaten der öffentlichen Statistik erhältlich [67]. Verschiedene Kobaltformen werden oftmals im gleichen HS-Code gebündelt, was die Qualität der Import- und Exportdaten mindert. Beispiel: „Kobaltmatte, Zwischenerzeugnisse der Kobaltmetallurgie“ wird mit „Kobalt in Rohform; Pulver aus Kobalt“ im HS-Code 81052000 kombiniert, obwohl der Kobaltgehalt dieser beiden Kobaltformen sehr unterschiedlich ist. Im Jahr 2023 wurden von dieser Warengruppe 2.177 t nach Deutschland importiert. Dies ist von besonderer Bedeutung, wenn man versucht, die globalen Kobaltströme zu verfolgen, da der Großteil des aus der DR Kongo, dem Hauptabbau-land, verschifften Materials ein Zwischenprodukt ist. Demgegenüber wurden lediglich 44 Tonnen deklarierte Kobalterze und ihre Konzentrate (HS-Code 260500) im Jahr 2023 nach Deutschland importiert. [AS]
- c, u, d, e: Aktuell gibt es kaum Daten zur Produktion, genauen Verteilung auf spezifische Produkte, Erfassung dieser Produkte am Lebensende als Abfall und zum Recycling von Kobalt aus diesen Altprodukten in Deutschland. Eine weiterführende Studie gibt, basierend auf Daten von 2016, EOL-Recyclingraten (EOL-RR) bzw. Recycling-Input-Raten (RIR) für die Europäische Union an [68]. Dies entspricht auch dem Datenstand des „Raw Materials Information System“ (RMIS) der EU. [WS, IE] Daten zu Nutzungs- bzw. Verweildauern der verschiedenen kobalthaltigen Produkte, die notwendig für die Vorhersage des Abfallanfalls sind, stehen nur vereinzelt aus Studien und Modellierungen zur Verfügung. [WS]
- f: Es liegen keine Daten zu den Verlusten an Kobalt bei der Produktherstellung, Sammlung sowie bei der Behandlung/Aufbereitung von Abfällen und Schrotten in Deutschland vor.
- f*: Die Verluste durch ineffiziente Aufbereitung werden nicht erfasst. [IE]
- g, h*: Es liegen keine genauen Angaben zu den Mengen des aus Magneten, Hartmetallen und kobalthaltigen Legierungen und Schrotten zurückgewonnenen Kobalts vor. Detaillierte Angaben zum Kobaltgehalt in Zwischen- und Endprodukten der Behandlung/ Aufbereitung von Altprodukten und Schrotten sowie produktbezogene Recyclingraten für Kobalt z.B. in Magneten sind somit nicht vorhanden.
Den Kobaltgehalt im Kathodenmaterial einer Lithium-Ionen-Batterie könnte über die Berichtspflichten i.R.d. der Verordnung (EU) Nr. 493/2012 „zur Berechnung der Recyclingeffizienzen von Recyclingverfahren für Altbatterien und Altakkumulatoren“ abgeschätzt werden, sofern diese Daten veröffentlicht würden. [AS] Eine Differenzierung zwischen Altschrotten (g) und behandelten Neuschrotten (h*) ist auf Basis der verfügbaren Daten derzeit nicht möglich.
- h: Materialausschuss aus Produktion von Halbzeugen und Produkten wird nicht zentral erfasst, nur Abschätzungen über Expert*innen oder Unternehmensabfragen sind möglich. [IE]
- j: Es liegen keine Daten zu den in die Halbzeugproduktion rückgeführten Kobaltmengen und damit zu den hier eingesetzten Recyclingmaterialien vor.

- m: Schrottmengen für die Verhüttung werden nicht zentral erfasst, nur auf Grundlage von Unternehmensangaben oder Expert*innen ist eine Abschätzung möglich. Für Batterien gibt die neue EU-Batterie-Verordnung Vorgaben zur Mindestzyklateinsatzquote vor. [IE, AS]
- n: In Deutschland gibt es keine Produktion von raffiniertem Kobalt, sodass Daten zu Rückständen und Schlacken nicht vorliegen.
- o: Es gibt keine Datenquellen zum dissipativen Verlust an Kobalt.
- p: Nicht relevant, da in Deutschland derzeit kein Kopalterzbergbau betrieben wird.
- s: Für die im anthropogenen Lager gebundene Menge an Kobalt und die jährlichen Zu- und Abflüsse existieren nur Hochrechnungen in Einzelstudien zu den erwarteten Bestandszuwachsen in den kommenden Jahrzehnten.
- t: Daten zu deutschen Importen von kobalthaltigen Abfällen und Schrotten (HS-Code 810530) sind abrufbar, jedoch nicht differenziert nach Legierungen. Handelsdaten zu Kobalt sind in vielen Fällen von mangelnder Qualität, da viele Inkonsistenzen zwischen HS-Codes und Produktionsdaten herrschen. [AS]

Die Datenverfügbarkeit zum Kobaltkreislauf variiert stark entlang der Wertschöpfungskette. Mengen zu Extraktion und Verhüttung können insbesondere durch quantitative, teilweise auch qualitative, Daten abgedeckt werden. Mit zunehmenden Produktcharakter und beim Eintritt in die Nutzungsphase verschlechtert sich die Datengrundlage erheblich. Daten zu Neuschrottmengen, sowie Verlustmengen bei der Sammlung und Behandlung/Aufbereitung von Abfällen und Schrotten werden nicht erfasst und fehlen für die Quantifizierung des Kobaltmaterials in der Kreislaufführung. Aussagen zu anfallenden EOL-Mengen können ausschließlich für Batterien im Rahmen produktspezifischer Berichtspflichten (EU-Batterieverordnung) statistisch abgesichert getroffen werden. Weitere Altbatterieströme können ggf. über (kommerzielle) Studien und individuelle Expertenschätzungen abgeschätzt werden.

Literaturverzeichnis

1. European Commission: The European Green Deal COM(2019) 640 final. 2019.Brussels.
2. European Commission: The Clean Industrial Deal: A joint roadmap for competitiveness and decarbonisation. COM(2025) 85 final. 2025.Brussels.
3. European Commission: *A new Circular Economy Action Plan - For a cleaner and more competitive Europe*. European Commission,: Brussels, 2020.
4. European Commission: A European Steel and Metals Action Plan COM(2025) 125 final. 2025.Brussels.
5. Potting, J., Hekkert, M.P. et al.: *Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain*. In: *The Hague, the Netherlands : PBL Publishers, Planbureau voor de Leefomgeving, nr.2544 (2017), 46 pp.*, 2017.
6. Kirchherr, J., Yang, N.-H.N. et al.: *Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 Definitions*. Resources, Conservation and Recycling, 2023. **194**. DOI:10.1016/j.resconrec.2023.107001
7. Agora Industrie und Systemiq: *Resilienter Klimaschutz durch eine zirkuläre Wirtschaft: Perspektiven und Potenziale für energieintensive Grundstoffindustrien*. 2023, 100 S.
8. Ressourcenkommission am Umweltbundesamt (KRU): *Substitutionsquote : ein realistischer Erfolgsmaßstab für die Kreislaufwirtschaft*. Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau, 2019.
9. European Union: Verordnung (EU) 2023 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG. 2023.Brussels.
10. European Union: VERORDNUNG (EU) 2024/1252 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. April 2024 zur Schaffung eines Rahmens für die Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen und zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 und (EU) 2019/1020. 2024.Brussels.
11. Eurostat: *EU monitoring framework on the circular economy*. Abgerufen am 25.02. 2025 von: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/circular-economy/information-data>.
12. Deutsche Bundesregierung: *Rohstoffstrategie der Bundesregierung: Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffen*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Berlin, 2019.
13. *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III - 2020 bis 2023*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz: Berlin, 2020, 80 S.
14. *Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz: Berlin, 2024.
15. Dittrich, M., Kämper, C. et al.: *Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz: Untersuchung von Pfadabhängigkeiten, strukturellen Effekten und technischen Potenzialen auf die zukünftige Entwicklung der Rohstoffproduktivität (DeteRess)*. Forschungskennzahl 3712 93 321. 2018, Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau, 252 S.
16. Günther, J., Lehmann, H. et al.: *Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten*. Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau, 2019, 72 S.
17. Müller, F., Kohlmeyer, R. et al.: *Leitsätze einer Kreislaufwirtschaft*. Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau, 2020.

18. Hagelüken, C., Schmidt, M. et al.: *Chancen und Grenzen des Recyclings im Kontext der Circular Economy : Rahmenbedingungen, Anforderungen und Handlungsempfehlungen*. Ressourcenkommission am Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau, 2023.
19. Steger, S., Ritthoff, M. et al.: *Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität* UBA-Texte. Bd. 34. Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau, 2019.
20. Umweltbundesamt: *Stoffstromorientierte Sekundärrohstoffwirtschaft*. Abgerufen am 27.02.2025 von: <https://www.umweltbundesamt.de/sekundaerrohstoffwirtschaft-metalle>.
21. Müller, F., Lehmann, C. et al.: *Urban Mining - Ressourcenschonung im Anthropozän*. Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau, 2017, 69 S.
22. Murakami, S., Oguchi, M. et al.: *Lifespan of Commodities, Part I*. Journal of Industrial Ecology, 2010. **14**(4): S. 598-612. DOI:<https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00250.x>
23. Tonini, D., Albizzati, P.F. et al.: *Quality of recycling: Urgent and undefined*. Waste Management, 2022. **146**: S. 11-19. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.037>
24. Graedel, T., Allwood, J. et al.: *Recycling rates of metals: A status report*. 9280731610. 2011. United Nations Environment Programme, UNEP, 1-48 S.
25. Liesegang, M., Bookhagen, B. et al.: *Status Quo des Recyclings bei der Metallerzeugung und -verarbeitung in Deutschland*. In: *DERA Rohstoffinformationen*. 2023. DERA/BGR, Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Berlin, 132 S.
26. Eurostat: *Circular economy - material flows*. Abgerufen am 27.02.2025 von: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Circular_economy_-_material_flows.
27. European Commission und Eurostat: *Circular material use rate – Calculation method – 2018 edition*. Publications Office: Brussels, 2018.
28. Destatis: *10 Grundprinzipien der amtlichen Statistik*. Abgerufen am 25.02. 2025 von: <https://www.destatis.de/DE/Methoden/Qualitaet/grundprinzipien.html>.
29. Abfallbewertung, I.-P.-. *Abfallanalysendatenbank ABANDA*. Abgerufen am 25.02. 2025 von: <https://www.abfallbewertung.org/?content=ABANDA&doc=inhalte>.
30. Eurostat: *Management of waste by waste management operations and type of material - Sankey diagram data*. Abgerufen am 27.02.2025 von: https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/env_wassd_esms.htm.
31. *Statistische Daten ElektroG*. Abgerufen am von: <https://www.stiftung-ear.de/de/service/statistische-daten/inputmengen>.
32. RLG Systems AG: *Erfolgskontrolle ReBat / ReBat+* 2022, RLG Systems AG: Dornach, 20 S.
33. Destatis: *Klassifikationen* Abgerufen am 25.02. 2025 von: https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/_inhalt.html#_2hmrrx78k.
34. *FutuRaM - A Horizon Europe funded project*. Abgerufen am 25.02. 2025 von: <https://futuram.eu/>.
35. Graedel, T.E.: *Material Flow Analysis from Origin to Evolution*. Environmental Science & Technology, 2019. **53**(21): S. 12188-12196. DOI:10.1021/acs.est.9b03413
36. Commission, E.: *Material system analysis (MSA)*. Abgerufen am 25.02. 2025 von: <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/msa>.

37. Eurostat: *Contribution of recycled materials to raw materials demand- end-of-life recycling input rates (EOL-RIR)*. Abgerufen am 25.02.2025 von: https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/cei_srm010_esmsip2.htm.
38. European Commission: *Critical Raw Materials* Abgerufen am 25.02. 2025 von: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en.
39. Destatis: *Die Qualitätsstandards der amtlichen Statistik*. Destatis: Wiesbaden, 2006, 97 S.
40. European Commission: *RMIS Recycling Indicators module. Data Sources*. 2024. JRC, Ispra, 16 S.
41. IRENA and NUPI: *Critical materials for renewable energy: Improving data governance*. 2024. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 44 S.
42. Forti, V., Baldé, C.P. et al.: *E-waste Statistics: Guidelines on Classifications, Reporting and Indicators*. second ed. United Nations University, ViE – SCYCLE: Bonn, 2018.
43. Petavratzi, E., Müller, D.B. et al.: *MinFuture Roadmap. A roadmap towards monitoring the physical economy*. In: *Horizon 2020 Framework Programme of the European Union*. 2018, 26 S.
44. European Union: *Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (Neufassung)*. 2012, E. Commission, 42 S.
45. Egle, L., Pierri, E. et al.: *Technical recommendations for the targeted amendment of the European List of Waste entries relevant to batteries – Support for the new batteries regulatory framework - WP8*. Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2024.
46. Destatis: *Erläuterungen zur Außenhandelsstatistik*. Abgerufen am 25.02. 2025 von: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Aussenhandel/Methoden/Erlaeuterungen/erlaeuterungen-aussenhandelsstatistik.html>.
47. Kohlmeyer, R.: *Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2022 nach Art. 7 Abs. 2 der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG*, Hrsg. Umweltbundesamt und N. Bundesministerium für Umwelt, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. BMUV: Dessau-Roßlau, Berlin, 2022.
48. Dornbusch, H.-J., Hannes, L. et al.: *Vergleichende Analyse von Siedlungsrestabfällen aus repräsentativen Regionen in Deutschland zur Bestimmung des Anteils an Problemstoffen und verwertbaren Materialien*. TEXTE. Bd. 113. Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau, 2020.
49. European Union: DIRECTIVE (EU) 2022/2464 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 14 December 2022 amending Regulation (EU) No 537/2014, Directive 2004/109/EC, Directive 2006/43/EC and Directive 2013/34/EU, as regards corporate sustainability reporting. 2022.Brussels.
50. European Union: REGULATION (EU) 2023/956 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism. 2023.Brussels.
51. European Union: REGULATION (EU) 2024/1781 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products, amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542 and repealing Directive 2009/125/EC. 2024.Brussels.
52. European Union: Verordnung (EU) 2023 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie

2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG. 2023.

53. European Commission: Commission work programme 2025. Moving forward together: A Bolder, Simpler, Faster Union. COM(2025) 45 final. 2025.Brussels.
54. Kathan, A., Ewers, B. et al.: *Kartierung des Anthropogenen Lagers V – Strategieentwicklung für einen nationalen Urban Mining Prozess. Gesamtwirtschaftliche Materialflussanalysen und Bestandsveränderungen des anthropogenen Lagers Deutschlands (2010–2020)*. UBA-Texte ed. Umweltbundesamt Dessau-Roßlau, 2025.
55. Umweltbundesamt: *Das anthropogene Lager*. Abgerufen am 25.02. 2025 von: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining/das-anthropogene-lager#das-anthropogene-lager-als-sekundarrohstoffquelle>.
56. *Einführung eines Data Cubes - Daten zur Umwelt*. Abgerufen am 25.02. 2025 von: <https://www.open-government-deutschland.de/opengov-de/ogp/aktionsplaene-und-berichte/4-nap/einfuehrung-eines-data-cubes-daten-zur-umwelt-2225458>.
57. *DACE- Datenkompetenzzentrum für Circular Economy-Daten*. Abgerufen am 25.02. 2025 von: <https://dace-info.de/hub/>.
58. *The Green Deal Dataspace*. Abgerufen am 25.02. 2025 von: <https://green-deal-dataspace.eu/de/green-deal-dataspace/>.
59. *Catena-X. Your Automotive Network*. Abgerufen am 25.02. 2025 von: <https://catena-x.net/de/>.
60. BMWK und BMBF: *Manufacturing-X. Initiative zur Digitalisierung der Lieferketten in der Industrie*. Abgerufen am 25.02. 2025 von: <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Manufacturing-X/Initiative/initiative-manufacturing-x.html>.
61. Piétron, D., Staab, P. et al.: *Digital circular ecosystems: A data governance approach*. GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society, 2023. **32**(1): S. 40-46.
DOI:10.14512/gaia.32.S1.7
62. Raatz, Seidel et al.: *OptiMet : Ressourceneffizienzsteigerung in der Metallindustrie - Substitution von Primärrohstoffen durch Verminderung des Downcyclings*. Texte. Bd. 81. Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau, 2022.
63. *ProSUM - Prospecting Secondary raw materials in the Urban mine and Mining wastes*. Abgerufen am 25.02. 2025 von: <https://www.prosumproject.eu/>.
64. Buchert, M., Bleher, D. et al.: *Kartierung des anthropogenen Lagers III - Etablierung eines Stoffstrommanagements unter Integration von Verwertungsketten zur qualitativen und quantitativen Steigerung des Recyclings von Metallen und mineralischen Baustoffen (KartAL III)*. Texte. Bd. 47. Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau, 2022.
65. Fisher, H. und Rawles, C.: *Cobalt Market Report*. 2023, Cobalt Institute: Guildford, 45 S.
66. Darton Commodities: *Cobalt, the technology enabling metal*. Abgerufen am 25.02. 2025 von: <https://www.dartoncommodities.co.uk/>.
67. Godoy Leon, M.F., Blengini, G.A. et al.: *Analysis of long-term statistical data of cobalt flows in the EU*. Resources, Conservation and Recycling, 2021. **173**: S. 105690.
DOI:10.1016/j.resconrec.2021.105690
68. Torres De Matos, C., Ciacci, L. et al.: *Material system analysis of five battery-related raw materials – Cobalt, lithium, manganese, natural graphite, nickel*, Hrsg. C. European Commission: Joint Research. Publications Office: Ispra, 2020.

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt

Wörlitzer Platz 1

06844 Dessau-Roßlau

Tel: +49 340-2103-0

buergerservice@uba.de

Internet: www.umweltbundesamt.de

Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Wilhelmstraße 26

13593 Berlin

Tel.: +49 30 36993 226

www.deutsche-rohstoffagentur.de

recycling@bgr.de

Abschlussdatum:

Oktober 2025

DOI: <https://doi.org/10.60810/openumwelt-8187>