

Urban Mining

Ressourcenschonung im Anthropozän



Maria Krautzberger
Präsidentin des Umweltbundesamtes

Im Laufe der Jahrhunderte, vor allem aber in den Jahrzehnten der Nachkriegszeit, haben die Bürgerinnen und Bürger unseres Landes einen enormen, aber verborgenen Reichtum angehäuft: Wir sind umgeben von einem vom Menschen gemachten, sprich anthropogenen Lager in Höhe von über 50 Milliarden Tonnen an Materialien. Viel davon befindet sich im Gebäude-, Infrastruktur-, Anlagen- und Konsumgüterbestand. Noch wächst dieses anthropogene Lager Jahr für Jahr um weitere zehn Tonnen pro Einwohner an und stellt für künftige Generationen eine substantielle Ressource dar.

Bisher verbaute und unzugängliche Materialien werden freigesetzt, können wiederverwendet und recycelt werden: Mineralische Materialien wie Beton, Gips oder Ziegel, Basismetalle wie Stahl, Kupfer oder Aluminium, spezielle Technologiemetalle wie Neodym, Cobalt oder Tantal, aber auch andere Materialien wie Kunststoffe, Asphalt oder Holz werden wieder als Sekundärrohstoffe zugänglich. Für ein als „rohstoffarm“ geltendes Land wie Deutschland ist dies ein ungeheurer Reichtum. Insbesondere in Hinblick auf einen zunehmenden internationalen Wettbewerb um die knappen Rohstoffe der Erde und die notwendige Drosselung der hohen weltweiten Umweltbelastungen der Primärrohstoffgewinnung. Inwiefern das anthropogene Lager aber einen wichtigen Beitrag zur Sicherung der Lebensgrundlagen bestehender und zukünftiger Generationen leisten kann, hängt davon ab, wie gut es gelingen wird, den Herausforderungen zu begegnen. Denn die immense Stoff- und Produktvielfalt, komplexe Nutzungskaskaden und rasante Technologiezyklen der Produkte und Güter erschweren letztlich eine hochwertige Aufbereitung und Rückgewinnung. Hinzu kommen der demografische Wandel, die Bedürfnisänderungen einer mobilen, schnelllebigen, digitalen und alternden Gesellschaft und damit verbundene regional und zeitlich unterschiedliche Bau-, Sanierungs- und Rückbauerfordernisse.

Seit einigen Jahren ist nun „Urban Mining“ in aller Munde, die quasi bergmännische Rohstoffgewinnung im urbanen Raum – in der Stadt wie auch in der Kommune. Genauer betrachtet verbergen sich dahinter bislang jedoch häufig nur Konzepte einer erweiterten Siedlungsabfallwirtschaft. Aber im Gegensatz zu dieser mit ihren recht kurzen und damit leicht erfass- und prognostizierbaren Materialumlaufzeiten erfordert eine generationenübergreifende Aufgabe wie Urban Mining weit umfangreichere Instrumente und eine weit vorausschauende Strategie zum Stoffstrommanagement. Für derart große Materialmengen, die erst nach langen Zeiträumen auf die Wirtschaft zukommen, braucht es ein Bewirtschaftungskonzept mitsamt einer prospektiven Wissens- und Entscheidungsbasis für die Sekundärrohstoffwirtschaft und für die Kommunalpolitik. Hierfür benötigen wir beispielsweise datenbankbasierte, dynamische und kreisscharfe Prognosemodelle, um vorbereitet zu sein für das, was Urban Mining zum Ressourcenschutz in einer zukunftsfesten Kreislaufwirtschaft beitragen kann.

Das Umweltbundesamt will mit dieser Broschüre ein gemeinsames Verständnis zum Urban Mining vermitteln und dazu ermutigen, mit diesem Strategieansatz konsequent voranzuschreiten. Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre.

Maria Krautzberger
Präsidentin des Umweltbundesamtes



INHALT

01 / EINFÜHRUNG	4
Urban Mining: Modewort oder Mehrwert?	5
Transformationsprozesse im Anthropozän	9
Der Anstieg des anthropogenen Materiallagers	12
02 // URBAN MINING ALS BEWIRTSCHAFTUNGSKONZEPT	16
Was ist Urban Mining?	17
Lagerbildung langlebiger Güter	18
Städtischer und konventioneller Bergbau im Vergleich	22
Landfill Mining	27
03 /// ROHSTOFFPOTENZIALE IM ANTHROPOGENEN LAGER	28
Der Gesamtbestand	29
Dynamische Lager	34
Besondere Aufmerksamkeit für kritische Rohstoffe	35
Potenziale: Von Ressourcen zu Reserven	39
04 //// STRATEGISCHE LEITFRAGEN	44
05 ///// DEN WEG EBEN – AKTIVITÄTEN UND MASSNAHMEN	48
Forschung – die richtigen Akzente sind gesetzt	49
Im Fokus – Erschließung und Aufbereitung von Baurestmassen	50
Gütesichere Recycling-Baustoffe	52
Schadstoffe ausschleusen	54
Materialpässe als zeitlose Informationsquelle	56
Recyclingeffizienz erhöhen – Downcycling verhindern	57
ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	62
LITERATURVERZEICHNIS	64
IMPRESSUM	68

01

EINFÜHRUNG

Bis dieser PKW ausgeliefert wird, hat er bereits einen Rohstoffeinsatz von 15 Tonnen.



Urban Mining: Modewort oder Mehrwert?

Rohstoffe sind ein wesentlicher Grundpfeiler des heutigen Lebens und des Wohlstands. Um den Bedarf zu decken, ist Deutschland zunehmend auf Importe angewiesen – mittlerweile werden jährlich über ein Drittel der bundesweit benötigten Materialien, rund 600 Mio. Tonnen, eingeführt. Tatsächlich müssen für diese Importe weltweit 1,7 Mrd. Tonnen an Primärrohstoffen gewonnen und geerntet, d. h. unmittelbar der Natur entnommen werden [1]. Denn wir importieren nicht nur Rohstoffe, sondern vielfach höherverarbeitete Produkte, die entlang ihres bisherigen Lebensweges weitaus mehr Rohstoffe erfordern, als es ihr tatsächliches Gewicht vermuten lässt. So hängt allein an einem importierten Mittelklasse-PKW ein Rohstoffeinsatz von ca. 15 Tonnen, bis dieser ausgeliefert werden kann. Zu den importierten Rohstoffen kommen die inländisch gewonnenen – pro Jahr ca. 1,1 Mrd. Tonnen [2].

Insgesamt liegt die direkte Materialnutzung der deutschen Volkswirtschaft – unter Abzug der Exporte – im Inland bei jährlich rund 1,3 Mrd. Tonnen. Die Materialmenge entspricht einem würfelförmigen Betonquader mit 800 Meter Kantenlänge, der in dieser Größe auch innerhalb der Bundesrepublik verbleibt – Jahr für Jahr. Wo aber geht dieser immense Materialstrom hin? Offensichtlich wächst die Volkswirtschaft physisch immer weiter an, denn weniger als ein Drittel dieser Menge lässt sich jährlich als Abfall registrieren.

Angesichts des enormen Rohstoffbedarfs und knapper natürlicher Ressourcen sind Alternativen gefragt. Hier setzt eine in den letzten Jahren populär gewordene Maxime an – Urban Mining, zu Deutsch „städtischer Bergbau“: Wenn das

anthropogene, also vom Menschen angelegte Lager immer weiter anwächst, warum es dann nicht verstärkt als Rohstoffquelle nutzen? Warum immer tiefer nach Bodenschätzen schürfen oder die Importe aus fernen Ländern immer weiter steigern, wenn der materielle Reichtum buchstäblich vor der eigenen Tür liegt? Urban Mining betrachtet unseren unmittelbaren Lebensraum selbst als Rohstoffquelle. Es geht im weitesten Sinne um die Gewinnung von Wertstoffen aus all jenen Quellen, die von Menschenhand geschaffen worden sind, also: Gebäude, Infrastrukturen, (langlebige) Konsum- und Anlagegüter und anderes mehr. Urban Mining weitet damit das aus der klassischen Recyclingwirtschaft bekannte Diktum „Abfall ist Rohstoff“ aus.

In der Wissenschaft seit Jahren bekannt, hat sich das Urban Mining-Konzept binnen Kurzem zu einem Modewort entwickelt, unter dessen Deckmantel eine Goldgräberstimmung vor der eigenen Haustür geschürt wird. Zum Teil wird suggeriert, dass sich in Bauschutt, Mobiltelefonen oder alten Haushaltsgeräten regelrechte Schätze verbergen, die nur darauf warten, gehoben zu werden. Doch wenn Begriffe wie Elektroschrott, Schubladenhandys, Altautorecycling, Wertstofftonne oder Deponieschatzkarte in einem Atemzug genannt werden, liegt der Verdacht nahe, dass mit dem Begriff „Urban Mining“ lediglich ein medienwirksam inszeniertes neues Gewand für die gesamte Abfall- und Rohstoffwirtschaft gefunden wurde – und damit auch altbekannte Antworten für zum Teil altbekannte Fragen und Probleme der Abfallwirtschaft, z. B. zur Getrenntsammlung von Siedlungsabfällen, der Wahrnehmung der Produktverantwortung, dem illegalen Elektroschrottexport oder der thermischen Beseitigung, um Schadstoffe auszuschleusen. Eine neue Aufmachung kann zwar hilfreich sein, um alten Problemen wieder zu Aufmerksamkeit

zu verhelfen. Gleichwohl liegt darin die viel größere Gefahr, dass das Innovative verloren geht und Urban Mining zu einer bloßen Worthölse verkommt, die je nach Kontext mit unterschiedlichen Inhalten gefüllt werden kann. Das wäre bedauerlich, denn Urban Mining enthält wesentliche neue Ansätze und ist als Strategie auf dem Weg zu einer ressourcenschonenden Kreislaufwirtschaft bedeutsam.

Die Abkehr vom ressourcenintensiven, linearen Wirtschaftsmodell des „take, make, consume and dispose“ hin zu einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft ist erklärtes Ziel der EU [3]. Um dahin zu gelangen, müssen die in Produkten enthaltenen Materialien möglichst in ihrer bisherigen Funktionalität in einem Materialkreislauf gehalten und dabei eine Schad- und Störstoffan-

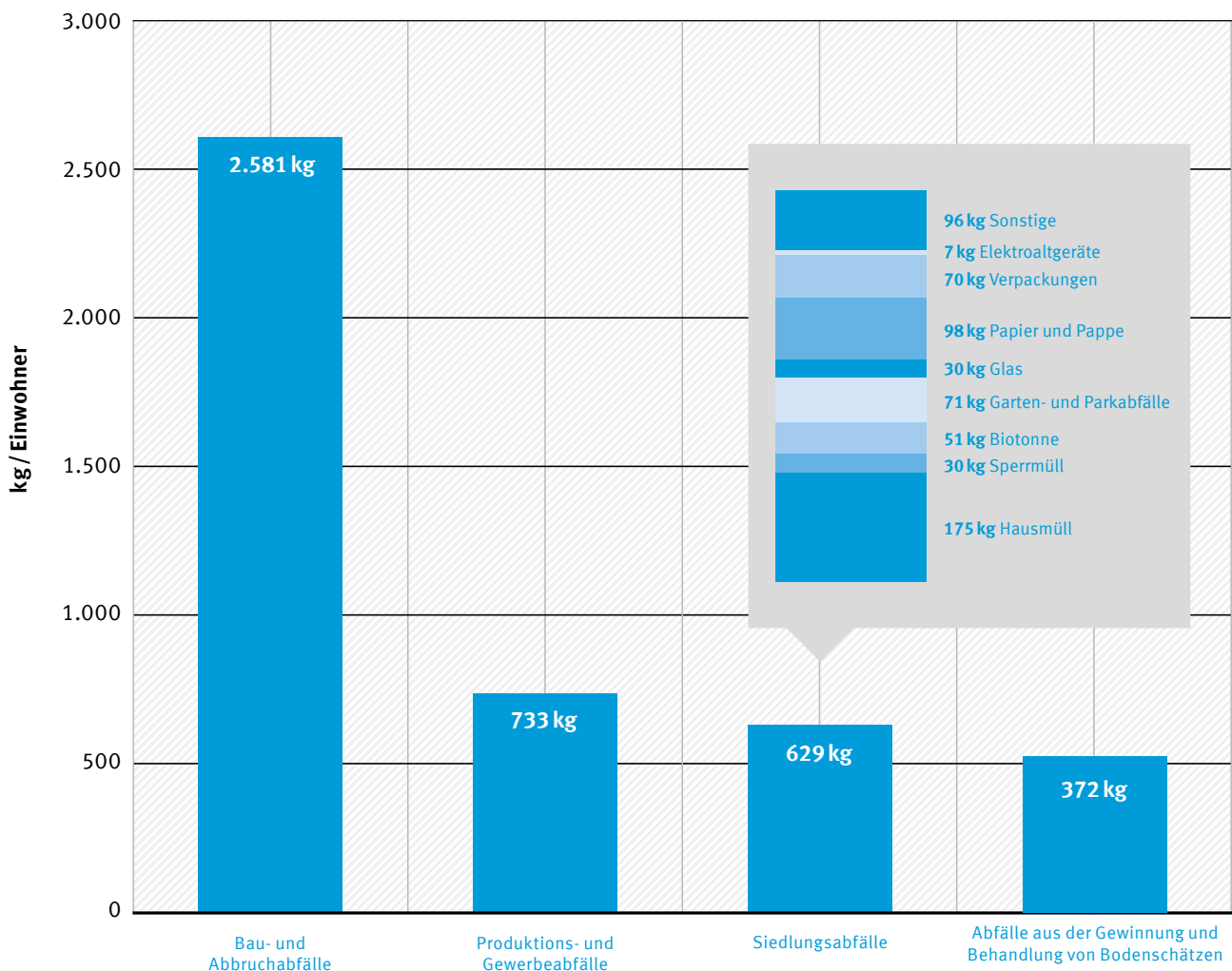
reicherung verhindert werden. Kreislaufwirtschaft erfordert also ein Denken in Stoffströmen aus einer Lebenszyklus-Perspektive, welche die gesamte globale Wertschöpfungskette von der Rohstoffgewinnung bis hin zur Abfallbewirtschaftung berücksichtigt. Urban Mining kann hier als strategischer Ansatz des Stoffstrommanagements helfen, die Potenziale der Kreislaufwirtschaft zu nutzen und dabei unterschiedliche Interessen zusammenzuführen [4, 5]. Die folgenden sechs Aspekte mögen dies beispielhaft illustrieren:

1. Erschließung des Sekundärrohstoffaufkommens und Reduzierung der Importabhängigkeit

Deutschland verfügt zwar noch über einen nennenswerten einheimischen Bergbau für Rohstoffe wie Kalisalz und Spezialtone, ist aber bei

Abbildung 1

Nettoabfallaufkommen in Deutschland pro Kopf [2014]



Erzen und Metallen zu 100 Prozent auf Importe angewiesen [105]. Deshalb besitzt Recycling eine hohe Priorität, so werden beispielsweise 30 Prozent der Kupferhalbzeug- und Kupfergussproduktion aus inländischen Kupferschrotten erzeugt. In der deutschen Stahlproduktion werden bereits mehr als 50 Prozent durch den Einsatz von Altschrotten und Schrottabfällen aus der Produktion hergestellt. Auch bei kritischen Technologiemetallen wie etwa den in Generatoren von Windkraftanlagen zum Einsatz kommenden Seltenen Erden Neodym und Dysprosium lässt sich mit selektiver Rückgewinnung perspektivisch die Importabhängigkeit mindern.

2. Bewältigung von Rohstoffknappheiten

Viele Zukunftstechnologien basieren auf kritischen Technologiemetallen, d. h. sie sind nicht nur risikobehaftet in der Beschaffung, sondern auch unverzichtbar. Für einige Elemente wie Gold, Zinn und Antimon würde ein fortschreitender Anstieg der Nachfrage schon in drei bis vier Jahrzehnten die derzeitige Reservenbasis, d. h. die technisch derzeit abbauwürdigen Lagerstätten, überschreiten. Es ist fraglich, ob in gleichem Umfang neue Lagerstätten entdeckt werden können, um die Reservenbasis entsprechend auszuweiten. Daraus resultierenden Knappheiten ließe sich durch Urban Mining entgegenwirken.

3. Wirtschaftliche Vorteile

Recycling erhöht die inländische Wertschöpfung und trägt zu erheblichen Kosteneinsparungen im produzierenden Gewerbe bei. Die deutsche Sekundärrohstoffwirtschaft stellte 2007 Kupfer und Stahl im Gesamtwert von 8,6 Mrd. Euro bereit. Daraus ergeben sich gegenüber Primärmetallen Kosteneinsparungen von 1,5 Mrd. Euro [6]. Urban Mining wird dazu beitragen, die inländische Wertschöpfung durch Recycling weiter zu steigern. Schon jetzt sind Recyclingaktivitäten mit 29,1 Mrd. Euro Umsatz 2014 und einem jährlichen Wachstum von 3,5 Prozent unangefochtener Kernbereich des Gesamtmarktes zur Kreislaufwirtschaft (41 Prozent) [7].

4. Beitrag zur globalen Verteilungsgerechtigkeit

Die direkte inländische Materialnutzung ist in Deutschland mit rund 16 Tonnen pro Kopf und Jahr noch um das Drei- bis Vierfache höher als in Schwellenländern wie Indien und etwa doppelt so hoch wie in China [8]. Und das obwohl oder

weil wir einen so hohen anthropogenen Lagerbestand haben? Urban Mining kann helfen, den Primärrohstoffbedarf zu senken und damit anderen Ländern den Zugriff zu Rohstoffen zu erleichtern und deren Entwicklung zu begünstigen.

5. Abfallbewältigung

2014 lag das Nettoabfallaufkommen in Deutschland bei rund 350 Mio. Tonnen, das macht pro Kopf rund 4,3 Tonnen Abfall [9] (s. Abbildung 1). Nur ein Siebtel davon sind sogenannte haushaltstypische Siedlungsabfälle wie Hausmüll, Verpackungen, Papier und Glas, die überwiegend aus kurzlebigen Gütern stammen. Doch dieser relativ kleine Teil bekommt in der öffentlichen Debatte, etwa um das Wertstoffgesetz, die größte Aufmerksamkeit. Die Novellierung der hebelwirksameren Gewerbeabfallverordnung ging demgegenüber fast lautlos vonstatten. Mit Urban Mining rückt die Frage, was mit den restlichen 3,7 Tonnen und den langlebigen Gütern passiert, in den Fokus.

Das Recycling von Metallen trägt erheblich zur Schonung natürlicher Ressourcen bei.





^
Gemischte Bau- und Abbruchabfälle zu recyceln, stellt eine große Herausforderung dar. Zukünftig soll daher die Getrenntsammlung verbessert werden.

6. Ökologische Entlastung

Allein das Recycling von Kupfer, Stahl und Aluminium spart in Deutschland 406 Petajoule an Primärenergieaufwand ein, immerhin fast drei Prozent des jährlichen Primärenergieverbrauchs Deutschlands. Dies entspricht dem jährlichen Brennstoffeinsatz von zwei großen Braunkohlekraftwerken. Zudem sind mit dem Recycling weltweite Rohstoffeinsparungen von 181 Mio. Tonnen jährlich verbunden, mitsamt den sonstigen Umweltwirkungen durch deren Veredelung und Weiterverarbeitung (2007) [6]. Ein strategischer Ausbau der Sekundärrohstoffgewinnung durch Urban Mining könnte diese Einsparungen noch beträchtlich erhöhen.

Damit Urban Mining nicht zu einem inhaltsleeren Modewort wird, sondern die genannten Möglichkeiten ausgeschöpft werden können, ist es notwendig, dass der Begriff einheitlich verstanden wird und inhaltlich klar ausgerichtet ist. Unter „Urban Mining“ soll gerade nicht die

gesamte etablierte Siedlungsabfallwirtschaft subsumiert werden. Vielmehr gilt es, den Fokus auf den Gesamtbestand an langlebigen Gütern und deren intelligente Bewirtschaftung in der Anthroposphäre, dem vom Menschen gestalteten Lebens- und Wirkungsraum, zu legen. Angesichts der Verweilzeiten stellt es für Urban Mining eine große Herausforderung dar, für die Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus langlebigen Gütern zu erfassen, welche Materialien in welchem Umfang wann und wo wieder aus dem anthropogenen Lager freigesetzt werden.

Im Kontext der globalen Rohstoffgewinnung kann der Urban Mining-Ansatz für einen zukünftigen Paradigmenwechsel stehen: Stoffstrommanagement und Bewirtschaftungskonzept langlebiger Güter als Beitrag zur Schonung natürlicher Ressourcen. Um den grundlegenden Umbruch zu verstehen, hilft ein Blick auf die Anthroposphäre selbst und ihre Wechselwirkungen mit der Ökosphäre.

Transformationsprozesse im Anthropozän

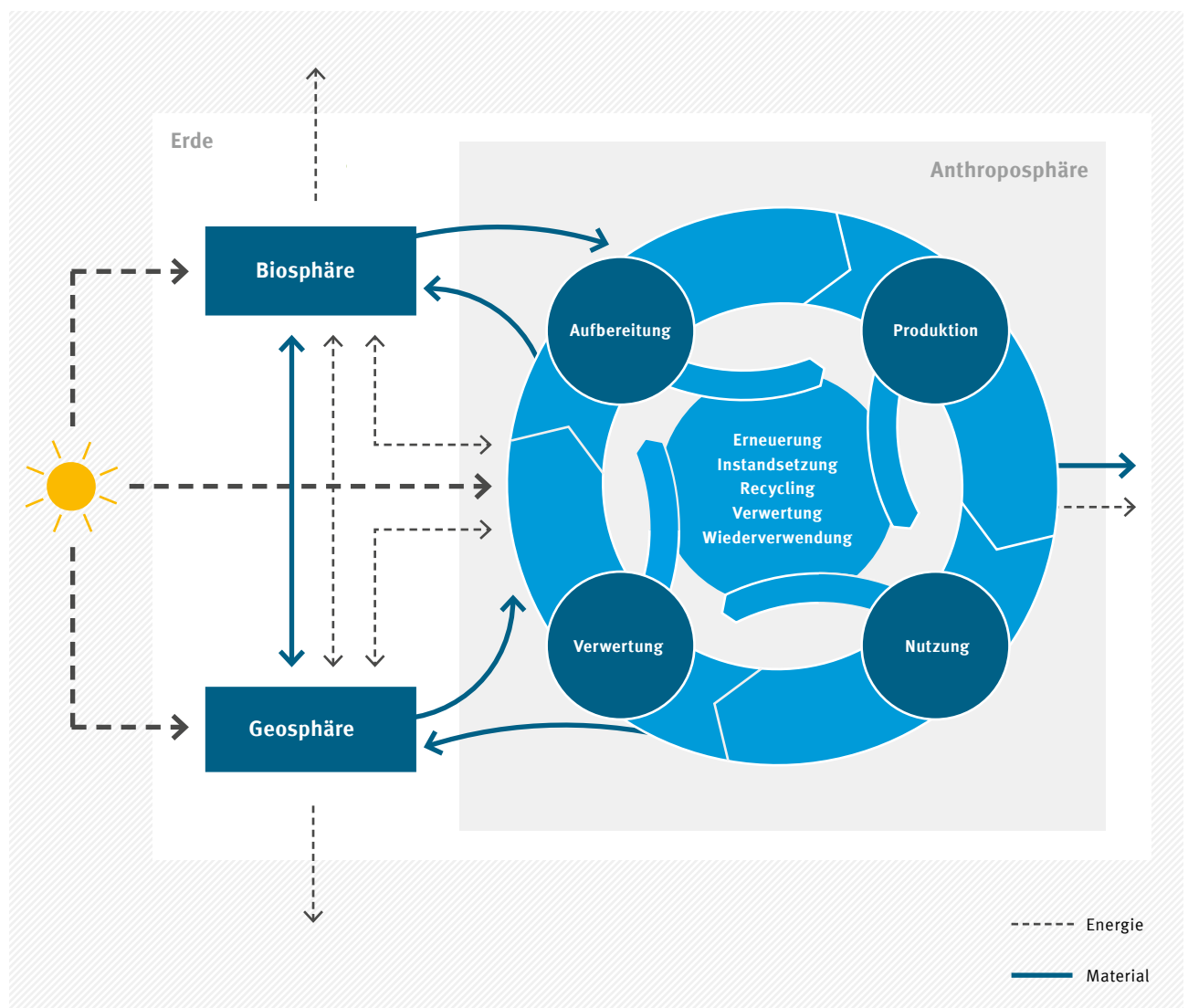
Der hinter dem Urban Mining stehende Wiederverwendungs- und Verwertungsgedanke ist keineswegs neu. Die Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus ausgedienten Gütern ist keine Erfindung der Moderne. Viele mineralische Materialien, wie bearbeitete Granitsteine, oder Eisenbeschläge wurden gerade vor der industriellen Revolution bis zur Unbrauchbarkeit weitergenutzt und wiederverwertet, da sie zu wertvoll waren und ihre Herstellung zu aufwendig, um sich ihrer vorschnell zu entledigen. Auch das Modell, das die Wechselwirkung zwischen dem menschlichen Lebensraum, der Anthroposphäre,

und der Bio- und Geosphäre beschreibt, gilt nach wie vor: Die verschiedenen Sphären sind Teil eines nahezu geschlossenen Systems, das durch die ständige Energiezufuhr der Sonne angetrieben wird.

Neu sind das Ausmaß der Wechselwirkungen, das zwischen der menschlichen Sphäre und den anderen Sphären besteht, sowie der rasante Anstieg des weltweiten gesellschaftlichen Rohstoffhungers während der letzten Jahrzehnte. Ein genauer Blick auf die Anthroposphäre bietet den Schlüssel zum Verständnis, warum Urban Mining in Zukunft von so großer Tragweite sein wird (s. Abbildung 2).

Abbildung 2

Anthropogener Stoffwechsel mit der natürlichen Umwelt



Die Anthroposphäre ist der gesellschaftliche, technologische und kulturelle Wirkungsraum des Menschen, in dem er lebt, arbeitet, kommuniziert und wirtschaftet. Der Mensch entnimmt seiner natürlichen Umwelt Rohstoffe, und bedient sich dabei weiterer natürlicher Ressourcen. Dadurch verlagert er sie in die Anthroposphäre, in der seine von ihm gebauten und betriebenen biologischen und technischen Prozesse stehen und in der seine Aktivitäten stattfinden.

Die entnommenen Rohstoffe werden zu Infrastrukturen, Wohn- und Nichtwohngebäuden sowie Gütern des täglichen Gebrauchs transformiert und bilden sogenannte anthropogene Lager. Diese Lager umfassen die Masse an Material, die in einem stofflichen System am Ende eines Bilanzzeitraums verbleibt. Die Größe eines Lagers ergibt sich als Summe des Anfangsbestands sowie des Saldos aus Zu- und Abflüssen. Je nachdem, ob ein Lager anwächst oder schrumpft, kann es Quelle oder Senke von Materialien sein [10, 11].

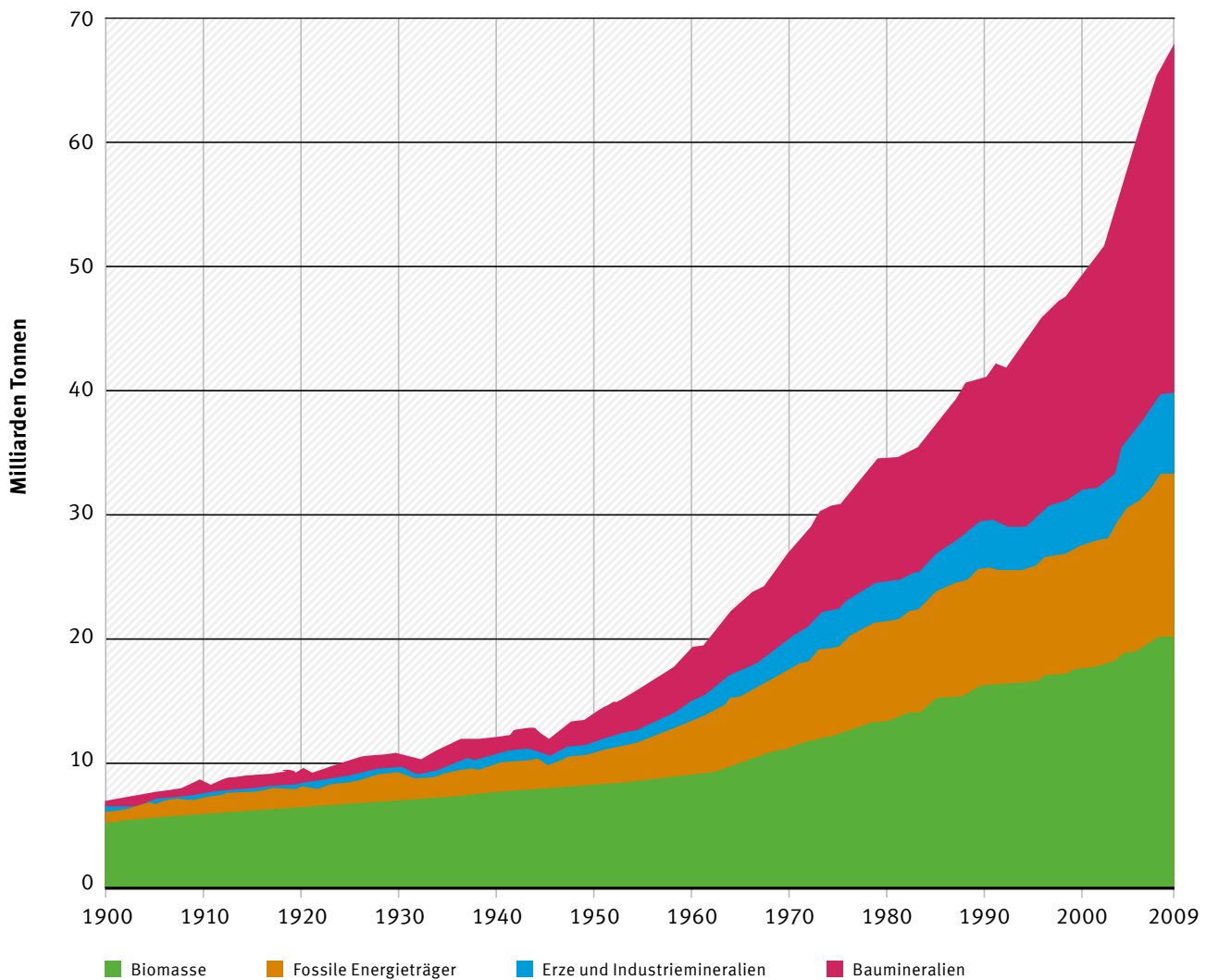
Die Anthroposphäre ist geprägt durch einen immensen Transformationsprozess. Alle menschlichen Aktivitäten produzieren mit jeder Form der Nutzung von Materialien und deren Umwandlung Abfälle und Emissionen. Diese werden teils gezielt, teils auch ungewollt in Deponien abgelagert, in Gewässer eingeleitet oder in die Atmosphäre ausgestoßen. Die Anthroposphäre kann als eigenständiger Metabolismus aufgefasst werden, der Stoffwechselbeziehungen zu seiner Umwelt unterhält. In Fachkreisen wird schon seit Langem von einem anthropogenen – oder synonym auch von einem sozioökonomischen, industriellen oder technischen – Metabolismus gesprochen [12, 13]. Teile der Umwelt wie Geosphäre, Hydrosphäre und Atmosphäre werden dabei nicht nur bei der Rohstoffentnahme kolonisiert, sondern auch infolge des Outputs des anthropogenen Stoffwechsels. Die Grenzen der Sphären sind fließend und werden durch dynamische Stoffwechselbeziehungen permanent verschoben.

Der anthropogene Stoffwechsel war auf globalem Niveau in der Menschheitsgeschichte lange Zeit ohne existenzielle Auswirkung auf die natürliche Umwelt, deren Senkenkapazität durch ein Ineinandergreifen von biologischen und geologischen Stoffkreisläufen in einem stabilen Gleichgewichtszustand verharrte. Es war erst der revolutionäre industrielle Wandel – getrieben durch

die Nutzbarmachung fossiler Energieträger –, der nicht nur einen massiven Eingriff in geologische Stoffkreisläufe, sondern auch eine großflächige Entkopplung der zunehmend industrialisierten Landwirtschaft von natürlichen Nährstoffkreisläufen mit sich brachte [14]. Der anthropogene Metabolismus hat sich qualitativ und quantitativ seitdem enorm intensiviert, sodass mittlerweile von einer neuen erdgeschichtlichen Epoche gesprochen wird: dem Anthropozän, dem Zeitalter des Menschen [15, 16]. Ein wichtiges Indiz dafür, dass die erdgeschichtliche Epoche des Anthropozäns begonnen hat, sind menschenverursachte Phänomene des Klimawandels, die Versauerung von Ozeanen, Versteppung, Erosion, Schwermetallbelastungen, radioaktive Verstrahlung und Biodiversitätsverlust [17]. Nach biophysikalischen Methoden und Modellen lässt sich ein globaler „safe operating space“ definieren, innerhalb dessen ökologischer Grenzen ein sicheres und nachhaltiges Leben für die Menschheit gewährt bleibt. Für vier von neun definierte planetare Grenzen haben wir die Belastungsgrenzen aller Wahrscheinlichkeit nach bereits überschritten [18, 19]. All dies sind existenzielle Ausprägungen des gestörten Stoffwechsels zwischen der Anthroposphäre und den übrigen Sphären – die Soll-Buchung einer nicht nachhaltigen Lebens- und Wirtschaftsweise.



Abbildung 3

Globale Rohstoffgewinnung [1900 – 2009]

Quelle: [20]

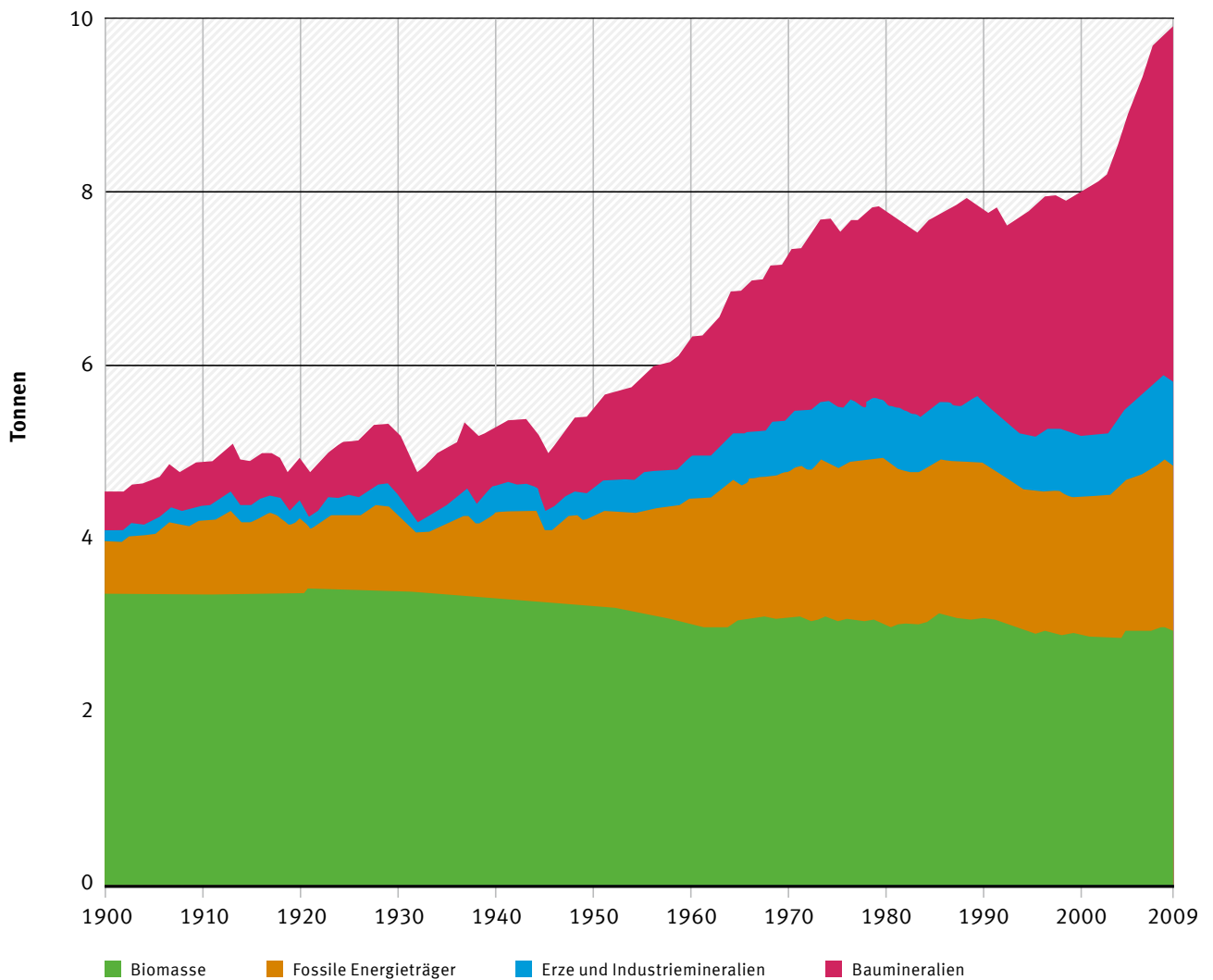
Der Anstieg des anthropogenen Materiallagers

Die beschriebene Intensivierung des anthropogenen Metabolismus ließ die globale Rohstoffentnahme binnen des 20. Jahrhunderts um ein Achtfaches steigen (s. Abbildung 3). Bei einer gleichzeitigen Vervielfachung der Bevölkerungszahl hat sich der Rohstoffbedarf pro Kopf also verdoppelt, allein der Biomassebedarf pro Kopf ist trotz absolutem Anstieg nahezu unverändert geblieben (s. Abbildung 4). Die Nutzung fossiler Energieträger, deren mittelbare Auswirkungen auf den anthropogenen Klimawandel als eine der offenkundigsten „Stoffwechselstörungen“ spürbar sind, hat sich dagegen verdreifacht. Nicht zuletzt mit diesem Energieeinsatz hat sich

die Gewinnung und Verarbeitung von Erzen, Industriemineralien und Baumineralien um ein Sechs- bis Achtfaches erhöht [20].

Die anthropogenen Stoffflüsse zahlreicher Metalle durch Bergbau, Produktion und Konsum liegen mittlerweile in der gleichen Größenordnung wie deren natürliche, geologische Flüsse durch Sedimentation, Abtragung oder Tektonik [21]. Für Kupfer übersteigen die anthropogenen Flüsse die natürlichen (mit jährlich ca. 15 Mio. Tonnen) schon um ein Dreifaches. Eine rasante Entwicklung, denn von den schätzungsweise 400 Mio. Tonnen Kupfer, die durch Menschenhand gewonnen wurden, stammen mehr als 97 Prozent aus dem 20. Jahrhundert [22].

Abbildung 4

Globale Rohstoffgewinnung pro Kopf [1900 – 2009]

Quelle: [20]

Die Qualität der Verlagerung zeigt sich unterdessen in der Diversität an Stoffen, die unter anderem durch die Entwicklung neuer Technologien ausgelöst wurde. Wurden zu Beginn des 18. Jahrhunderts nur 14 chemische Elemente in irgendeiner Form wirtschaftlich genutzt, waren es um 1900 schon 32 der zu diesem Zeitpunkt bekannten 83 Elemente. Im Jahr 2000 wurden alle 80 natürlichen, stabilen Elemente des Periodensystems sowie sieben weitere radioaktive Elemente wirtschaftlich genutzt [23]. Allein auf einer PC-Leiterplatte befinden sich 44 unterschiedliche Elemente [24] (s. Abbildung 5, S. 14)

Die systematische und großskalige Verlagerung vieler Metalle und Mineralien aus der Geosphäre in die Anthroposphäre und der dortigen

Transformation hat in menschlichen Zeiträumen von nur wenigen Generationen stattgefunden [25]. Und sie ist vor allem eine Entwicklung der Industrieländer, die zwar nur 15 Prozent der Bevölkerung stellen, aber rund ein Drittel des globalen Rohstoffverbrauchs haben. Auf Deutschland bezogen bedeutet das, dass rund ein Prozent der Weltbevölkerung vier Prozent der Rohstoffe für sich beansprucht.

Angetrieben von dem immensen Rohstoffzugriff und Bevölkerungswachstum stieg die globale Wirtschaftsleistung im vergangenen Jahrhundert um den Faktor 24. Dabei hat die Volkswirtschaft auch stofflich – physisch – erheblich „zugelegt“, vor allem durch die Ansammlung von Metallen und Baumineralien. Sie sind zum Großteil,

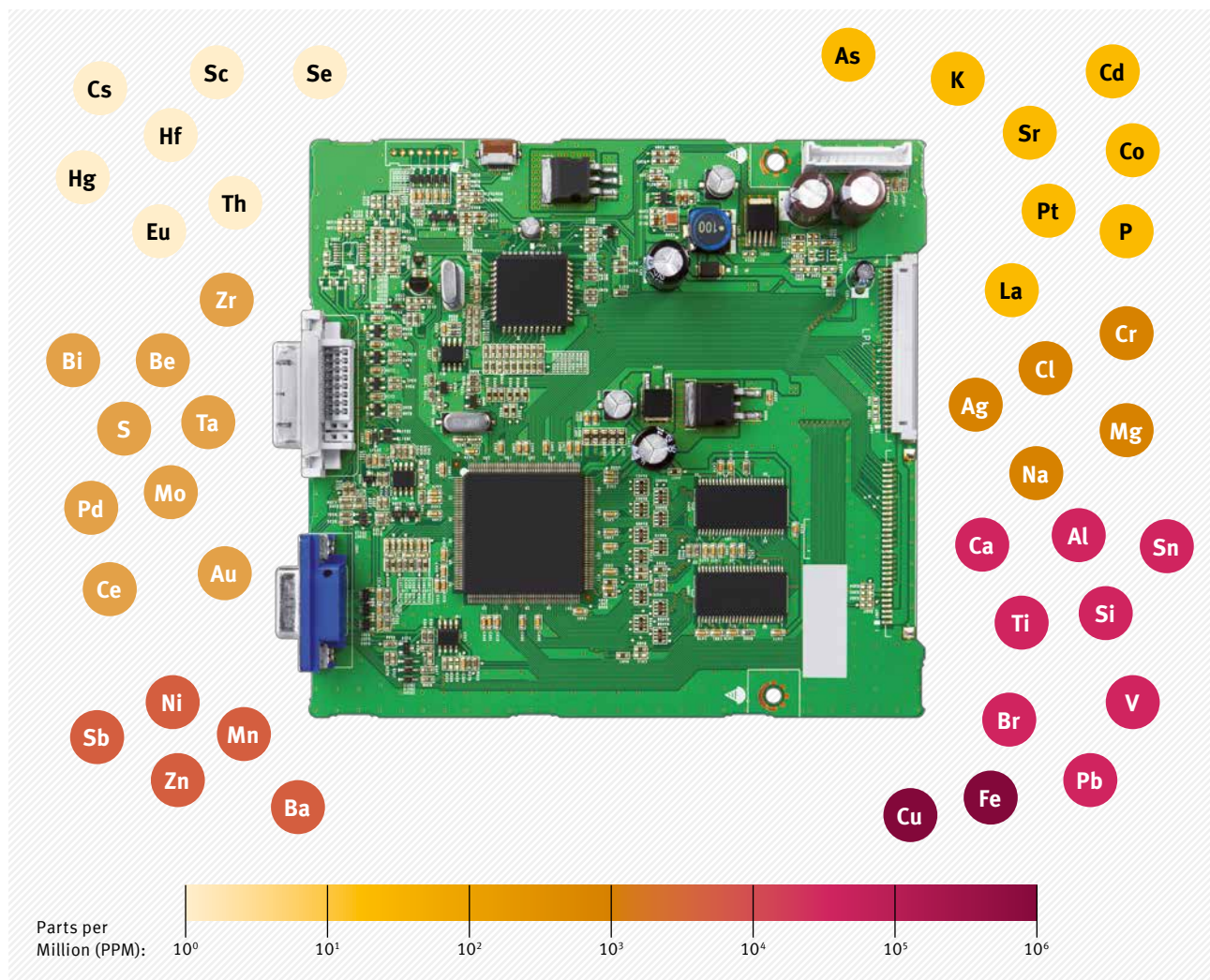
im Gegensatz zu den biotischen und fossilen Materialien, die überwiegend als Nahrungs- bzw. Futtermittel oder Brennstoff verbraucht werden, noch nach vielen Jahrzehnten in der Atmosphäre vorhanden und bilden ein enormes Materialreservoir.

Das Gros an Metallen und Baumineralien wandert in langlebige Investitionsgüter hochvernetzter städtischer Siedlungen, die dank komplexer Infrastrukturen und Logistiksysteme als kulturelle und wirtschaftliche Zentren fungieren. Die anhaltende Urbanisierung seit Mitte des 20. Jahrhunderts hat urbane Kulturlandschaften geschaffen, in denen 2015 rund 55 Prozent der Weltbevölkerung lebten [26], mit steigender Tendenz. Typische urbane Räume mit Bevölke-

rungszuwachs üben einen regelrechten Sog auf Rohstoffe aus. Mehr als 80 Prozent der eingehenden Güterströme verbleiben in diesen und bilden auf unbestimmte Zeit Lagerstätten [27]. Welche Bedeutung Städte und Siedlungen als Rohstofflager haben, hängt außerdem von strukturellen Erneuerungs- und Änderungsprozessen ab, denen sie unterliegen. Dichte, Größe und Altersverteilung ihrer Bevölkerung schwanken, die demografische Entwicklung und Migrationstrends erzeugen eine Pfadabhängigkeit, die über das Schicksal von Städten und Siedlungen entscheidet. Bevölkerungsanstieg oder -schwund ist wegweisend dafür, ob Städte und Siedlungen weiterhin ein starkes physisches Wachstum erfahren oder ihr Materialhaushalt stagniert. Tatsächliche Schrumpfungen sind bislang nur

Abbildung 5

Vielfalt von Elementen auf einer Leiterplatte





in Ausnahmefällen zu beobachten, werden aber zukünftig zunehmen. Zwei Entwicklungslinien lassen sich daraus ableiten, die auf sehr unterschiedliche Auffassungen verweisen [28]:

1. Anthropogene Lager als Rohstoffquelle

Die anthropogenen Materiallager, die innerhalb des vergangenen Jahrhunderts in der gesamten Volkswirtschaft aufgebaut worden sind und noch immer bedeutend anwachsen, können erhebliche positive Rückwirkungen auf die zukünftige Verfügbarkeit von Rohstoffen haben, indem aus diesen in großem Umfang Sekundärrohstoffe erschlossen werden.

2. Anthropogene Lager als „Abfalllast“

Je stärker die Anthroposphäre wächst, desto mehr verlagern sich auch Abfall- und Emissionspotenziale aus der Rohstoffgewinnung und Verarbeitung

in den Konsumbereich und Güterbestand. Ein weit verbreitetes Diktum lautet: „Abfall ist Materie am falschen Ort“. Wird dem nicht Rechnung getragen, könnten sich regional schon bald sehr große Abfallströme als Materie am falschen Ort erweisen, mit allen wirtschaftlichen und ökologischen Konsequenzen.

Welche Haltung das gesellschaftliche Bewusstsein dominieren wird, ob die anthropogenen Lager als Vermögen oder Last empfunden werden, entscheidet sich weniger im globalen Metabolismus zwischen Anthroposphäre und Ökosphäre. Den Ausschlag wird vielmehr der Stoffwechsel innerhalb unserer anthropogenen Welt geben. Urban Mining kann hierzu als Strategie und Denkausrichtung einen erheblichen Beitrag leisten.

^
Allein in deutschen Bahnhöfen sind rund 32 Mio. Tonnen an Materialien langfristig gebunden.



Urban Mining ist eine
aktive, gestalterische
Strategie.

URBAN MINING ALS BEWIRTSCHAFTUNGS KONZEPT



Was ist Urban Mining?

Aus Sicht des Umweltbundesamtes ist Urban Mining die integrale Bewirtschaftung des anthropogenen Lagers mit dem Ziel, aus langlebigen Produkten, Gebäuden, Infrastrukturen und Ablagerungen Sekundärrohstoffe zu gewinnen. Als langlebig werden all jene Güter bezeichnet, die durchschnittlich ein Jahr oder länger im Nutzungsraum verbleiben und Lager relevanter Größe bilden. Auch wenn die wörtliche Übersetzung von Urban Mining „städtischer Bergbau“ lautet, geht es nicht allein um innerstädtische Lager, sondern vielmehr um alle genannten Güter. Dabei ist es unerheblich, ob die Güter noch aktiv genutzt und erst in absehbarer Zukunft freigesetzt werden, wie im Fall industrieller und kommunaler Bauwerke sowie Elektrogeräten in Haushalten, oder nicht mehr in Verwendung sind, wie etwa stillgelegte Bahntrassen, Abfalldeponien und Halden. Auch spielt es keine Rolle, ob die Güter ortsfest sind (z. B. Windkraftanlagen) oder mobil (z. B. Fahrzeuge). Sie alle sind Teil der Betrachtung.

Die strategische Ausrichtung ist langfristig. Sie orientiert sich an den Lebensdauern und Lagerdynamiken der betrachteten langlebigen Güter und versucht qualitativ hochwertige Stoffkreisläufe zu etablieren. Urban Mining zielt auf ein Stoffstrommanagement ab, das vom Aufsuchen (Prospektion), der Erkundung (Exploration), der Erschließung und der Ausbeutung anthropogener Lagerstätten bis zur Aufbereitung der gewonnenen Sekundärrohstoffe reicht.

Urban Mining ist kein gänzlich von der Abfallwirtschaft losgelöster Ansatz. Es ersetzt auch keineswegs regulierte abfallwirtschaftliche Bereiche, beispielsweise zur Verwertung von Altfahrzeugen oder zur Reduktion der zunehmenden Menge an Elektronikschrott aus nicht mehr

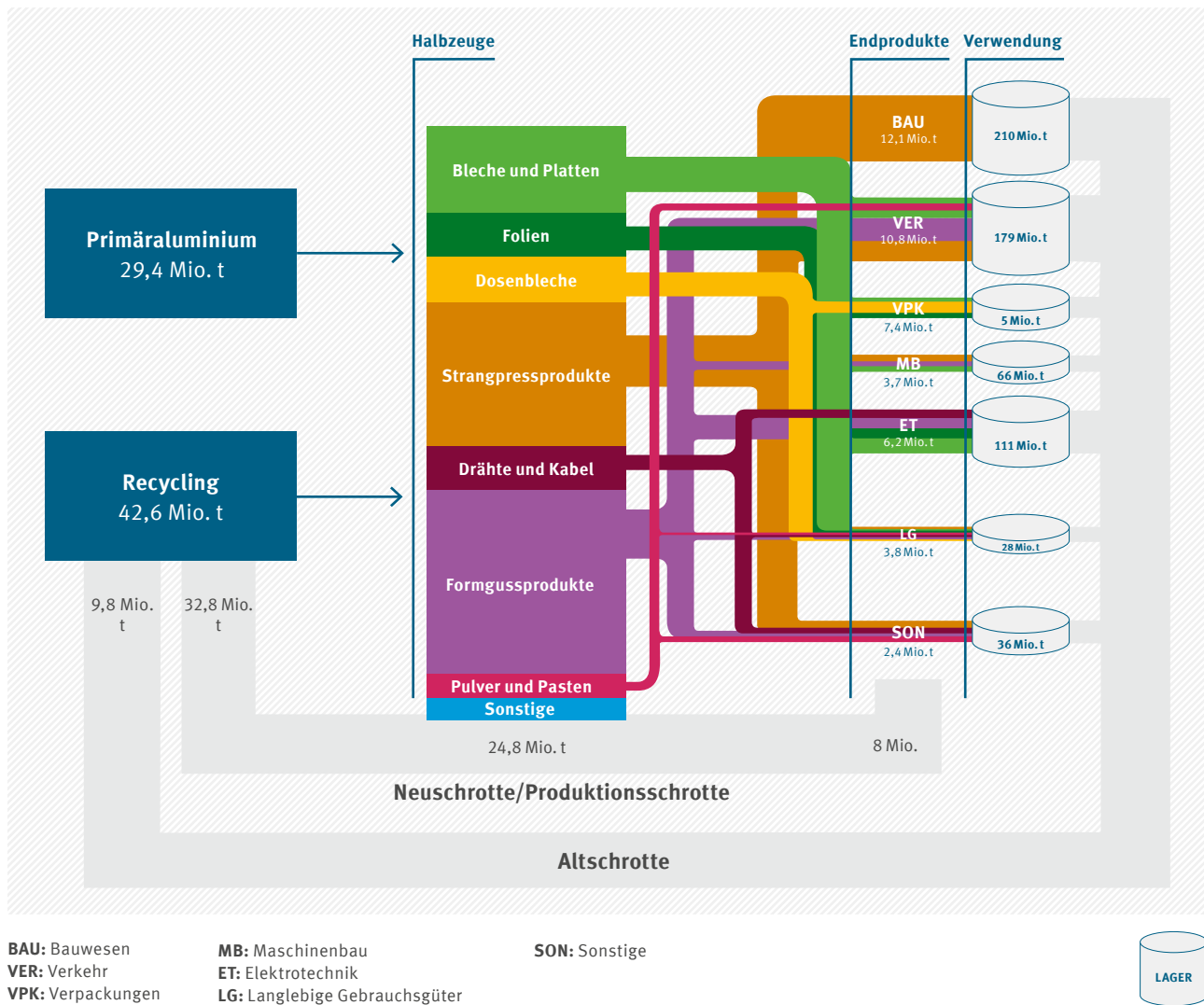
benutzten Elektro- und Elektronikgeräten. Vielmehr ergänzt und unterstützt es diese methodisch und konzeptionell.

Worin sich Urban Mining von der Abfallwirtschaft unterscheidet, sind die Systemgrenzen der Betrachtung. Die Abfallwirtschaft beschäftigt sich im Kern mit dem Abfallaufkommen an sich, dessen Menge, Zusammensetzung und einer bestmöglichen und schadlosen Rückführung der Materialien in den Stoffkreislauf. Urban Mining bezieht dagegen den Gesamtbestand an langlebigen Gütern, deren Lagerbildung sich schwerer erfassen lässt, mit ein, um möglichst früh künftige Stoffströme prognostizieren zu können und bestmögliche Verwertungswege abzuleiten und zu etablieren, noch bevor die Materialien als Abfall anfallen.

Informatorische und prognostische Instrumente setzen bereits dann an, wenn Produkte in Verkehr gebracht werden. Damit werden Bindeglieder zum Produktions- und Konsumbereich geschaffen. Der überwiegende Teil der aktiven Siedlungsabfallwirtschaft, der sich maßgeblich der Bewirtschaftung von Abfällen kurzlebiger Güter widmet (Biomüll, Leichtverpackungen, Altglas, Hausmüll), gehört aus Sicht des Umweltbundesamtes nicht in den Betrachtungsbereich des Urban Mining.

Abbildung 6

Globale Aluminiumflüsse und -bestände [2009]



Eigene Darstellung nach [29]

Lagerbildung langlebiger Güter

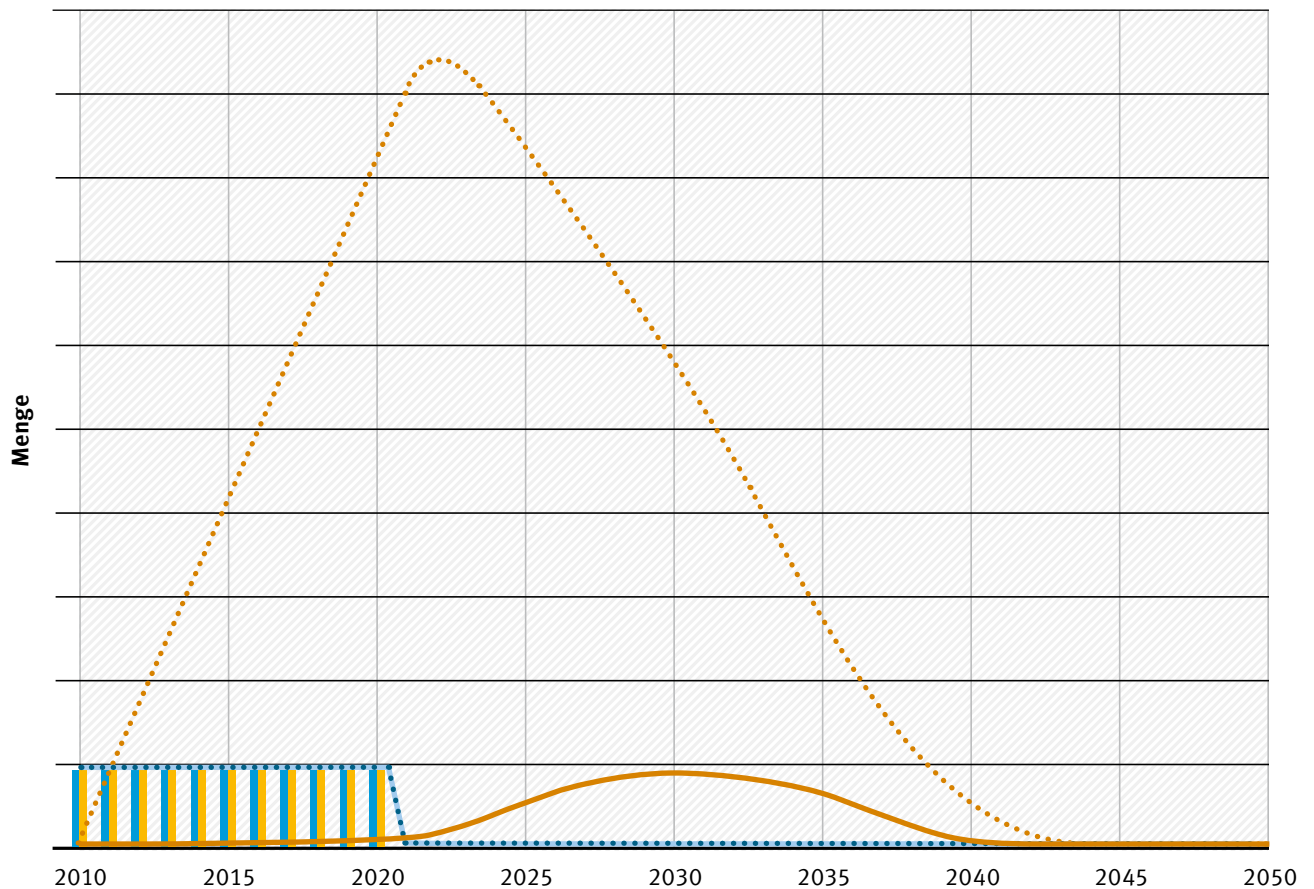
Die Fokussierung auf langlebige Güter im Urban Mining ist notwendig, weil diese ein signifikant anderes Verhalten in den urbanen Lagern aufweisen als kurzlebige Güter. Hinzu kommt, dass die von ihnen gebildeten Materiallager um mehrere Größenordnungen umfangreicher sind. Deutlich wird diese Problematik am globalen Aluminiemeinsatz (s. Abbildung 6). Lediglich ein Sechstel davon kommt in kurzlebigen Gütern zum Einsatz, überwiegend in Verpackungen. Während jährlich weltweit rund 80 Prozent des in Verpackungen eingesetzten Aluminiums wieder als Abfall erfasst und recycelbar ist, sind es im Gebäudebereich, in Maschinen und

Industrieanlagen derzeit lediglich zehn bis 25 Prozent [29]. Das Materiallager an Aluminium in Verpackungsmaterialien im Konsumbereich bildet ein geringes Plateau von fünf Mio. Tonnen. Hingegen sind es für die Aluminiumanteile in sämtlichen langlebigen Anwendungen bereits rund 600 Mio. Tonnen.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für Kunststoffe. In der Bundesrepublik werden ca. 150 Kilogramm Kunststoffe pro Jahr und Einwohner verarbeitet. Hiervon findet sich ca. ein Drittel in kurzlebigen Gütern wie Verpackungen wieder. Abfallseitig sind die Verhältnisse deutlich verschieden: Bei Kunststoff liegt die Recyclingrate niedriger als bei Aluminium. Von den ca. 60 Kilogramm an

Abbildung 7

Lagerdynamik kurz- und langlebiger Güter im Vergleich am Beispiel von Aluminium in Verpackungen und PKW *



* Zur Veranschaulichung wird in der Abbildung davon ausgegangen, dass von 2010 bis 2020 die gleiche Menge an Aluminium in Verpackungen und PKW in Verkehr gebracht wird.

- Inverkehrbringung – Aluminium in Verpackungen
- Abfall-Aluminium in Verpackungen
- ... Anthropogenes Lager – Aluminium in Verpackungen
- Inverkehrbringung – Aluminium in PKW
- Abfall-Aluminium in PKW
- ... Anthropogenes Lager – Aluminium in PKW

Eigene Darstellung



Bis zu 30 Jahre können vergehen, bis diese Alufelgen wieder aus dem anthropogenen Lager freigesetzt werden.

Verbraucher-Kunststoffabfällen pro Jahr und Einwohner sind 60 Prozent Verpackungskunststoffabfälle [30, 31]. Auch wenn die Verpackungskunststoffe abfallwirtschaftlich am relevantesten erscheinen, haben sie im anthropogenen Lager, das sich für Kunststoffe schätzungsweise auf drei Tonnen pro Einwohner bemisst, nur eine sehr geringe Bedeutung.

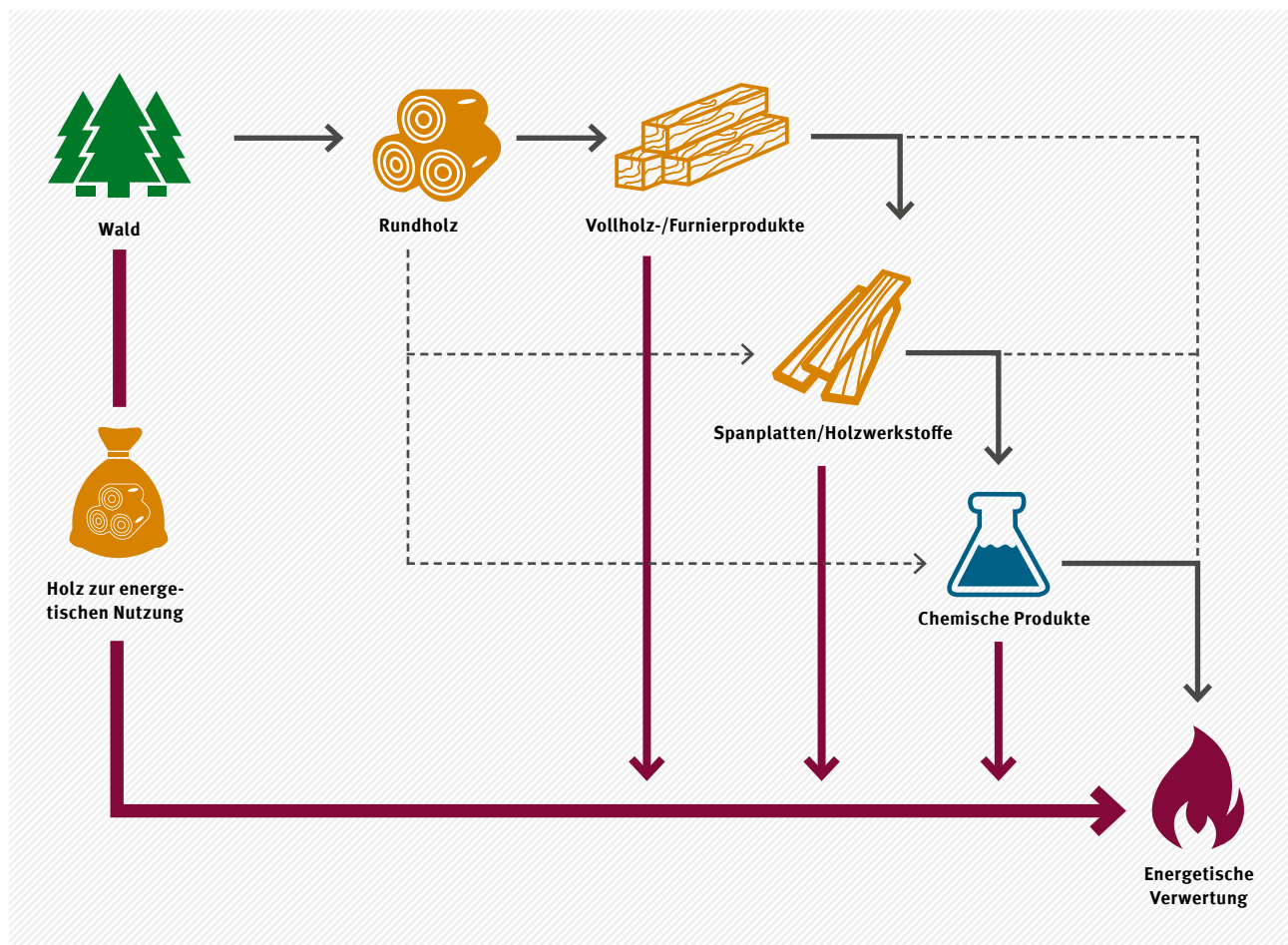
Wie die beiden Beispiele für Aluminium und Kunststoffe zeigen, stellen kurzlebige Güter zwar von ihrer Menge her relevante Materialströme dar, erreichen aber im Umlauf zumeist schnell stabile Sättigungen. Lebensmittel, Kosmetik oder Reinigungsmittel etwa werden ganz überwiegend nur in einem Maße produziert und gekauft, wie sie auch verbraucht oder entsorgt werden. Werden technologische Neuerungen eingeführt, beispielsweise hinsichtlich der Materialauswahl bei Verpackungen, so werden vorherige Plateaus

schnell abgebaut und es etablieren sich neue auf Basis der geänderten Produktbeschaffenheiten. Die aktiven Gesamtlager in Haushalten nehmen nicht merklich zu und verbleiben auf verhältnismäßig niedrigen Mengenplateaus. Das hat den Vorteil, dass nicht nur die Produktionsmengen, sondern auch die Abfallaufkommen aus Haushalten und Gewerbe planbar sind. Dies ist der wesentliche Aktionsradius von siedlungsabfallwirtschaftlichen Maßnahmen.

Eine solch verlässliche Planbarkeit ist im Fall von langlebigen Gütern nicht ohne weiteres gegeben. Es dauert sehr viel länger, bis sich Materialplateaus herausbilden. Je länger die erwarteten Nutzungsdauern ausfallen, je unspezifischer die Lebensdauer der Güter ist, desto dynamischer gestaltet sich die Lagerbildung. Dies zeigt sich in sogenannten logistischen Wachstumskurven mit einem großen zeitlichen Versatz zwischen Input-

Abbildung 8

Modellhafte Kaskadennutzung für Holz



und Outputflüssen (s. Abbildung 7). Mobile Güter und Komponenten zunächst immobiler Güter können durch eine Vielzahl von Lagern in der Konsumsphäre wandern. So lange diese aktiv genutzt werden, ist dies auch im Sinne einer Kaskadennutzung erstrebenswert (s. Abbildung 8). Unter Kaskadennutzung wird die stoffliche Mehrfachnutzung von Produkten und ihrer Komponenten verstanden, bevor diese einer abschließenden energetischen Nutzung oder Beseitigung zugeführt werden. So kann beispielsweise Holz, das als hochwertiges Massivholz im Baubereich genutzt wurde, nach Ablauf der Nutzung entweder als solches wiederverwendet oder aber zu Spanplatten verarbeitet werden, die sich theoretisch auch mehrfach rezyklieren lassen. Eine weitere Stufe innerhalb einer Kaskade wäre ein (bio-)chemischer Aufschluss oder eine Vergasung zu Synthesegas (Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid), um daraus

wieder komplexere Plattformchemikalien, z. B. zur Kunststoffproduktion, herzustellen. Als finale Stufe erfolgt die energetische Verwertung, aus der allenfalls noch eine Nutzung der verbleibenden Asche als Düngeschlagstoff möglich ist.

Doch für viele Gütergruppen verliert sich die Spur. Und das nicht nur im Falle einer technisch-stofflichen Dissipation, d. h. einer produktions- oder nutzungsbedingten Feinverteilung von Stoffen, etwa in Folge korrosions- oder abriebsbedingter Abnutzung. Diese Spur tritt häufig erst dann wieder zu Tage, wenn die Güter als Abfall anfallen, mit mehrjährigem bis hin zu jahrzehntelangem Verzug. Obgleich Zeitpunkt und Menge noch nicht genau vorherzusehen sind, ist absehbar – so lange das Gesamtmateriallager anwächst –, dass langfristig auch der Output, überwiegend in Form eines behandlungswürdigen Abfallaufkommens, steigen wird.

Bevor es energetisch verwertet wird, kann Holz über mehrere Stufen stofflich genutzt werden.



Städtischer und konventioneller Bergbau im Vergleich

Auch wenn die Gewinnung von Sekundärrohstoffen gemeinhin nicht mit konventionellem Bergbau in Verbindung gebracht wird, lohnt ein Vergleich der beiden Methoden zur Rohstoffgewinnung. Der konventionelle Bergbau widmet sich laut Bundesberggesetz der Sicherung der Rohstoffversorgung durch das Aufsuchen, Gewinnen und Aufbereiten von Bodenschätzen. Im Grunde passt diese Beschreibung genauso auf die Gewinnung von Sekundärrohstoffen im Kontext des Urban Mining.

Wie im konventionellen Bergbau wird auch im städtischen Bergbau zwischen Lagerstätten und Vorkommen differenziert. Diese Differenzierung erscheint wichtig, da ja anthropogene Lager bzw. geologische Ressourcen zu einem bestimmten Zeitpunkt nur teilweise abbauwürdig sind. Eine (natürliche) Anhäufung nutzbarer Minerale und Gesteine wird als „Lagerstätte“ bezeichnet, wenn eine wirtschaftliche Gewinnung in Betracht kommt, als „Vorkommen“, wenn sich der Abbau wirtschaftlich nicht lohnt. Die Summe der in den Lagerstätten enthaltenen Rohstoffmengen in einer Region bilden die Reserven; die summierten Rohstoffmengen aller Lagerstätten und Vorkommen bilden die geologischen bzw. anthropogenen Ressourcen.

Trotz offensichtlicher Unterschiede lassen sich zwischen konventionellem und städtischem Bergbau viele Gemeinsamkeiten entdecken, und beide Verfahren haben, je nach Rohstoff- bzw. Gütergruppe, ihre Stärken und Schwächen in den folgenden zehn Kategorien (s. Tabelle 1):

Ein Blick auf die *Größe der Lagerstätten* offenbart, dass gerade auf nationaler Ebene die anthropogenen Lager die geologischen Ressourcen für einige bedeutsame Rohstoffe vom Umfang her teils deutlich übersteigen. In Japan etwa wird das anthropogene Lager an Gold und Silber auf 16 Prozent bzw. 24 Prozent der weltweiten Reserven geschätzt, während das Land über keine geologischen Ressourcen dieser beiden Metalle verfügt [32, 33]. Die weltweiten anthropogenen Ressourcen von Kupfer werden auf bis zu 400 Mio. Tonnen angenommen, knapp 60 Prozent der derzeitigen geologischen Kupferreserven bzw. knapp 20 Prozent der derzeitigen Kupferressourcen [34, 35]. Während die gegenwärtig bekannten geologischen Lagerstätten durch die Rohstoffgewinnung zunehmend schrumpfen, wachsen jene in der Anthroposphäre weiterhin stark an. Sobald nicht mehr in gleichem Maße neue geologische Lagerstätten exploriert werden, wird der relative Anteil der anthropogenen Ressourcen ansteigen. Werden allerdings die geologischen Ressourcen einzelner Materialien global verglichen, aus denen sich zukünftige

Tabelle 1

Vergleich von Primärbergbau mit Urban Mining

	Primärbergbau	Urban Mining
1. Größe der Lagerstätten	0	0
2. Prospektionsaufwand		+
3. Explorationsgrad	+	
4. Wertstoffgehalt		+
5. Transportentfernung		+
6. Nachfrageorientierung	+	
7. Aufbereitungsaufwand	+	
8. Umweltauswirkungen		+
9. Gesellschaftliche Akzeptanz		+
10. Renaturierung		+

+ vorteilhaft

0 ausgeglichen

Reserven entwickeln können, so haben diese einen deutlich größeren Umfang als die Lager der Anthroposphäre.

Auch beim *Prospektionsaufwand* spricht einiges für das Urban Mining: Das Auffinden von geologischen Lagerstätten ist neben der Fernerkundung auch mit vielen bodengeophysikalischen Methoden (u. a. aus der Magnetik, Seismik, Geoelektrik und Gravimetrie) verbunden. Diese müssen vor Ort stattfinden und erfordern bereits erhebliche finanzielle Aufwendungen. Dagegen lassen sich anthropogene Lager auch „vom Schreibtisch“ durch die Auswertung von Bebauungsplänen, Satellitendaten, Katastern, Normen und Produktions-, Abfall- und Außenhandelsstatistiken ermitteln.

Allerdings ist der *Explorationsgrad* im konventionellen Bergbau deutlich höher. Denn getrieben von wirtschaftlichen Interessen sind geologische Lagerstätten im Vergleich zu anthropogenen gut dokumentiert. Dies hängt auch damit zusammen, dass die Erschließung von natürlichen Lagerstätten nicht nur immens kapitalintensiv und risikoreich ist – rein statistisch führen nur zwei Prozent der Explorationstätigkeit zur Bergwerksproduktion –, sondern eine Vorlaufzeit, die sogenannte „lead time“, von ca. fünf Jahren mit Beginn der Planung erforderlich ist. Im Jahr 2012 wurden weltweit 22,5 Mrd. Dollar in die Exploration von Nichteisenmetallagerstätten investiert [36]. Die gezielte Exploration insbesondere nicht mehr genutzter anthropogener Lager ist dagegen noch eine Orchideendisziplin.

Was den *Wertstoffgehalt* der Lager betrifft, steht das Urban Mining gut da: Viele Metalle kommen in ihren natürlichen Erzlagerstätten in geringen Konzentrationen vor. Für Buntmetalle wie Nickel, Kupfer und Blei betragen diese zwischen 0,3 und zehn Prozent. Dagegen liegen dieselben Stoffe in anthropogenen Güterlagern wie Bauteilen, Gusselementen oder Maschinen überwiegend in Reinform oder hochlegiert vor. Ein Meter einer Kupferleitung aus dem Informations- und Kommunikationsbereich enthält genauso viel Metall wie 2,5 Tonnen Erz [37]. Der Goldanteil eines durchschnittlichen Mobiltelefons entspricht dem von 16 Kilogramm Golderz.

Ein anderer wichtiger Punkt ist die *Transportentfernung* von den Lagerstätten, die den Vermarktungsaufwand bestimmt. Geologische

Lagerstätten befinden sich vielfach weit entfernt von den Wirtschaftszentren, in denen die dort gewonnenen Stoffe nachgefragt und zu höherwertigen Produkten verarbeitet werden. Zudem liegen viele geologische Vorkommen in Gegenden mit extremen Klimabedingungen oder mangelhafter bzw. nicht vorhandener Infrastruktur. Dagegen befinden sich urbane Minen im Prinzip ganz nah am Ort des Geschehens. Dies gilt auch für sogenannte Massenrohstoffe: So liegen etwa Sekundärgesteinskörnungen aus dem Rückbau von Bauwerken meist im innerstädtischen Bereich, während im Vergleich dazu Primärkies aus Steinbrüchen stammt, die mitunter mehr als 30 bis 50 Kilometer entfernt sein können.

Die *Nachfrageorientierung* gestaltet sich im Urban Mining als schwierig. Sind Reserven einmal exploriert und die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen gegeben, so lässt sich die Primärproduktion von Rohstoffen in gewissem Umfang einer gesteigerten Nachfrage anpassen – sei es durch Ausdehnung der Gewinnung oder der effizienteren Aufbereitung. So wurde die weltweite Cobaltgewinnung, getrieben durch die boomenden Anwendungen als Elektrodenmaterial in Hochleistungsakkus, von 2009 bis 2010 um



61 Prozent gesteigert [38]. Und das obwohl Cobalt zu 80 bis 90 Prozent als Koppelprodukt im Nickel- und Kupferbergbau gewonnen wird [39]. Im Urban Mining lässt sich dagegen zwar erkennen, wann mit bestimmten Sekundärrohstoffen zu rechnen ist, jedoch ist deren Menge nicht flexibel regulierbar.

Problematischer im Vergleich zum konventionellen Bergbau ist beim Urban Mining die Gewinnung der Rohstoffe aus Materialverbünden, also der *Aufbereitungsaufwand*. Zwar findet im konventionellen Bergbau auch in großem Maße eine Koppelproduktion statt. 38 von 62 Metallen und Halbmetallen werden zu mehr als 50 Prozent als Koppelprodukt mit anderen Metallen gewonnen [39]. Und tendenziell steigt der Aufbereitungsaufwand im konventionellen Bergbau an, da aufgrund stark steigender Nachfrage und hohem Explorationsgrad zunehmend komplexere Lagerstätten erschlossen werden [40]. Allerdings ist die Ansammlung von bestimmten Stoffen, die sogenannte Vergesellschaftung in geologischen Formationen und Mineralien durch geochemisch-physikalische Modelle recht gut erforscht. Die Aufbereitungstechnologien sind nach Stand der Technik bereits weit optimiert. Hochtechnisierte und effiziente Flotations-, Suspensions-, Laugungs- und Extraktions- sowie Elektrolyseverfahren werden angewandt und stetig weiterentwickelt. Doch das gilt nicht für bereits in Nutzung befindliche, hochgradig verarbeitete Stoffverbünde. Denn diese Stoffe werden hier in technischen Anwendungen in völlig neue, natürlich nicht vorkommende und sich ständig wandelnde Materialverbünde überführt. Teils werden sie dabei dissipiert, d. h. fein verteilt: weiße LEDs bestehen z. B. aus über zehn Metallen, darunter Germanium, Cer, Gold und Indium. Der Technisierungsgrad im Urban Mining steht noch weiter hinter dem im Primärbergbau zurück.

Was die jeweiligen *Umweltauswirkungen* betrifft, ist die Gewinnung von Primärrohstoffen mit empfindlichen Eingriffen in Ökosysteme, teils sogar der Freisetzung toxischer Substanzen verbunden. Die Aufbereitung von Erzen erfordert viel Energie und Wasser. Metalle müssen darüber hinaus mit hohem energetischen und prozesstechnischen Verhüttungs- und Raffinationsaufwand meist in ihre reduzierte, wirtschaftlich bedeutendste Reinform überführt werden. Die Erschließung und Bereitstellung von Sekundärrohstoffen hat demgegenüber zumeist deutliche Vorteile. Beispielsweise erfordert die Aluminiumproduktion aus Schrotten auch unter Berücksichtigung der Sammlung nur elf bis zwölf Prozent des Primärrohstoff- und Energieaufwandes der Primäraluminiumproduktion aus der Bauxitverhüttung. Treibhausgaseffekte, Versauerung, bodennahe Ozonbildung und Eutrophierungseffekte sind dabei 90 bis 95 Prozent niedriger [41, 42]. Darüber hinaus unterliegen die Recyclingprozesse hierzulande deutlich höheren immissionsschutzrechtlichen Auflagen, die auch vom Gesetzgeber



angepasst werden können, um ein höchstmögliches Schutzniveau für Mensch und Umwelt zu garantieren. Akzeptable Umweltstandards in den Gewinnungsländern durchzusetzen, entzieht sich leider oftmals den wirtschaftlichen, rechtlichen und politischen Einflussphären.

Bei der Gewinnung von Rohstoffen kommt es häufig zu Nutzungskonkurrenzen um natürliche Ressourcen wie Wasser und Land. Bei mangelnder Beteiligung der lokalen Bevölkerung führen die Umweltauswirkungen und Nutzungskonkurrenzen nicht selten zu gewaltsamen Auseinandersetzungen [43]. Die *gesellschaftliche Akzeptanz*, die sogenannte „social license to operate“ wird als eines der wichtigsten Geschäftsrisiken im

Bergbausektor gewertet [44]. Urban Mining bietet hierbei Vorteile. Da es eher der Schonung natürlicher Ressourcen dient und Nutzungskonkurrenzen entschärfen kann, ist von einer breiten gesellschaftlichen Akzeptanz auszugehen.

Ist eine Primärrohstoff-Lagerstätte vollständig ausgebeutet, muss das Bergbaugelände eine *Renaturierung* erfahren und bei Kontamination ggf. saniert werden. Eine Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Nachsorge ist eine effektive Gesetzgebung, vor allem aber ein effektiver Gesetzesvollzug, der in vielen Rohstoffförderländern leider nicht gegeben ist. Dort hinterlässt der Bergbau nicht selten dauerhaft kontaminierte und nicht nachnutzbare Flächen. Werden anthropogene Lagerstätten ausgebeutet, so kann dies hingegen unmittelbar auch der Nachsorge dienen, indem neben der Gewinnung von Sekundärrohstoffen Schadstoffe erfasst und schadlos beseitigt werden, noch bevor diese ungewollt aus Gütern in die natürliche Umwelt gelangen. Darüber hinaus lassen sich bebaute Flächen für andere Nutzungsformen zurückgewinnen.

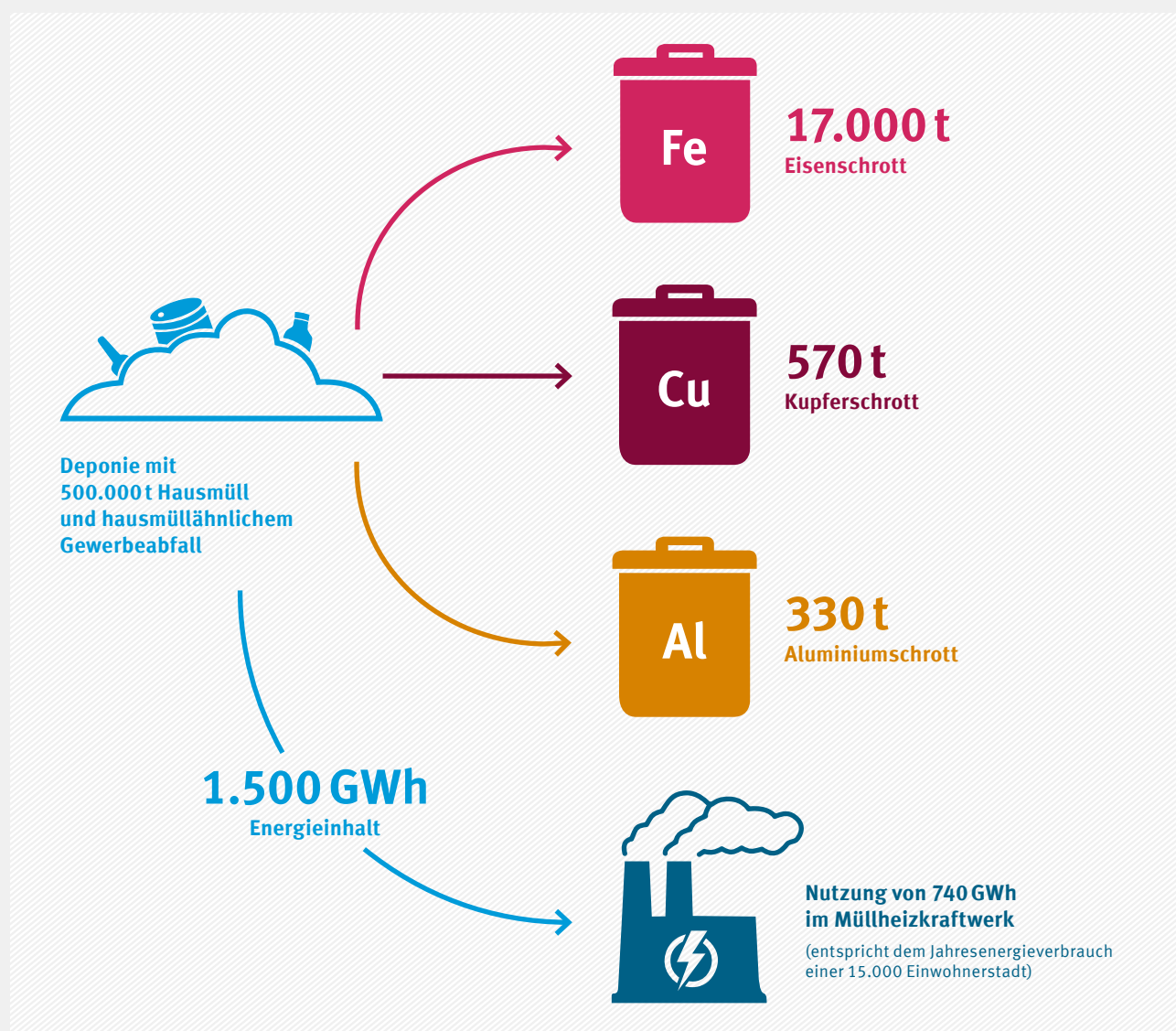


Rohstoffpotenzial auf Altdeponien

Bezogen auf den Rückbau einer mittleren Deponie für Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfall mit 500.000 Tonnen Deponiegut lassen sich Schätzungen zufolge 17.000 Tonnen Eisenschrott, 570 Tonnen Kupferschrott und 330 Tonnen Aluminiumschrott gewinnen. Eine solche Deponie verfügt darüber hinaus über einen geschätzten Energiegehalt von 1.500 Gigawattstunden. Daraus lassen sich in einem Müllheizkraftwerk 740 Gigawattstunden gewinnen, dies entspricht dem Jahresenergieverbrauch einer Stadt mit 15.000 Einwohnern [46].

Abbildung 9

Rohstoffpotenzial einer Hausmülldeponie



Eigene Darstellung nach [46]

Praktische Erfahrungen konnten mit Schlackedeponien gesammelt werden, in denen die bei der Abfallverbrennung anfallenden Schlacken abgelagert werden. Sie weisen ein hohes Potenzial für die Sekundärrohstoffgewinnung auf, da Nichteisenmetalle erst seit jüngster Zeit separiert werden. So wurden 2005 bei einem Rückbau in der Schweiz aus 200.000 Tonnen Material rund 4.270 Tonnen Eisen, Aluminium, Kupfer und Messing gewonnen [45].

Landfill Mining

Eine Sonderdisziplin des Urban Mining ist das sogenannte Landfill Mining – der gezielte Rückbau von Altdeponien und die Gewinnung von Wertstoffen aus Altdeponien und Halden. Vor dem Hintergrund hochvolatiler und langfristig steigender Rohstoffpreise nimmt dabei die Sekundärrohstoffgewinnung an Bedeutung zu. Allerdings sind die Sekundärrohstoffpotenziale ungleich kleiner als in aktiven Lagern.

Schätzungen zufolge wurden in Deutschland seit 1975 rund 2,5 Mrd. Tonnen an Siedlungsabfällen, Bauschutt und gewerblichen Abfällen deponiert. Unter anderem machen Ersatzbrennstoffe, Metalle und Mineralien den Rückbau bestehender Deponien erwägenswert. Da es vor 1972 kaum geordnete Deponien gab und die flächendeckende Verwertung von Abfällen in Deutschland erst seit 1986 erfolgt, sind insbesondere in alten Deponien viele interessante Materialien zu finden. Nach vorsichtigen Schätzungen, die auf Abfallanalysen und Stoffanalysen aus Rückbauprojekten zurückgehen, sind in den Jahren 1975 bis 2005 folgende Mengen an verwertbaren Materialien deponiert worden [45]:

- 250 Mio. Tonnen Papier, Kunststoffe, Textilien und Holz. Der resultierende Heizwert entspricht einem Materialwert von schätzungsweise 60 Mrd. Euro.
- 26 Mio. Tonnen Eisenschrott, 1,2 Mio. Tonnen Kupferschrott, 0,5 Mio. Tonnen Aluminiumschrott sowie 0,65 Mio. Tonnen Phosphor mit einem Materialwert von rund 14 Mrd. Euro.

Neben dem Aspekt der Sekundärrohstoffgewinnung gibt es noch weitere Motivationsgründe für den Rückbau von Deponien. Standen in Deutschland in den 1980er-Jahren beim Landfill Mining besonders die Aspekte der Gewinnung an Deponievolumen und der Deponiesanierung im Vordergrund, so spielen heute vermehrt auch die Verringerung der Umweltbelastungen, die Reduktion der Nachsorgekosten und die Freigabe der Standortflächen eine wichtige Rolle. Letzteres ist besonders im Fall von Deponien am Rand von Ballungsräumen interessant, bei denen der Deponiestandort mit fortschreitendem Wachstum der Wohnsiedlungen als Bauland attraktiver geworden ist. In Deutschland gibt es rund 100.000 registrierte Altablagerungen. Die Fläche, die allein aufgrund der Stilllegung von Siedlungsdeponien



im Zeitraum von 1995 bis 2009 für das sogenannte Flächenrecycling zur Verfügung stünde, beträgt rund 15.000 Hektar [47].

Stillgelegte Deponien bedürfen in der Regel einer kostenintensiven Nachsorge, da sie ein erhebliches Umweltgefährdungspotenzial darstellen, etwa in Form klimaschädlicher Emissionen (z. B. Methan) oder durch belastetes Sickerwasser. Die Nachsorge kann bis zu 200 Jahren dauern. Allein für die ca. 400 bis 2009 stillgelegten Abfalldeponien liegen die Kosten der Stilllegung und Nachsorge Schätzungen zufolge bei 17 bis 36 Mrd. Euro [47]. Rückstellungen sollen diese Nachsorgekosten decken, doch wird dies nicht immer der Fall sein. Landfill Mining kann dazu beitragen, zukünftige kommunale Haushalte zu entlasten. Im Ergebnis eines interdisziplinären Projekts aus Unternehmen, Forschungsinstituten und Verwaltung wurde 2016 ein Leitfaden veröffentlicht, der die vielschichtigen ökonomischen, rechtlichen, technischen und ökologischen Aspekte des Landfill Minings für Entscheidungsträger aufbereitet [48].

Trotz der Abwägungen zum Landfill Mining werden Deponien auch weiterhin Bestandteil einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft sein, um vorbehandelte Abfälle umweltverträglich entsorgen zu können. Denn es ist nicht immer möglich, eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung von Abfällen zu gewährleisten, wie diese der Gesetzgeber mit dem Kreislaufwirtschaftsgesetz als Grundpflicht (§ 7 (3) KrWG) fordert, da dies die technische Machbarkeit und die wirtschaftliche Zumutbarkeit voraussetzt. In diesem Fall können Deponien auch als Langzeitlager für Abfälle betrachtet werden – so z. B. für Aschen aus der Monoklärschlammverbrennung mit dem Ziel einer späteren Phosphorrückgewinnung.

^
Mithilfe von
Probebohrungen
wird der Wertstoff-
gehalt einer still-
gelegten Deponie
untersucht.

03

ROHSTOFFPOTENZIALE IM ANTHROPOGENEN LAGER

Aus einem durchschnittlichen Altbau mit zehn Wohneinheiten fallen im Abbruch rund 1.500 Tonnen an Material zur Verwertung an, darunter 70 Tonnen Metalle und 30 Tonnen Kunststoffe, Bitumen und Holz.



Wie gut kennen wir das anthropogene Lager? Welche Materialmengen wurden mittlerweile tatsächlich im anthropogenen Lager der Bundesrepublik angehäuft und wie viel davon wird zukünftig wieder freigesetzt werden? Wie gut lässt sich der gesamtwirtschaftliche Stoffwechsel nachvollziehen? Allein dies zu ergründen, ist eine anspruchsvolle Aufgabe, für die im Umweltbundesamt eine eigene Forschungsreihe initiiert worden ist – die Kartierung des anthropogenen Lagers. In einem ersten Schritt geht es darum, die Bestände zu erfassen, sowie die jährlichen Input- und Outputflüsse nachzuvollziehen. Erst auf dieser Grundlage kommen prognostische Instrumente hinzu, die zur Etablierung des Urban Minings unerlässlich sind.

Der Gesamtbestand

Der Gesamtbestand des anthropogenen Lagers in Deutschland lässt sich nur indirekt bestimmen. Grundlage bilden die umweltökonomischen Gesamtrechnungen des Statistischen Bundesamtes. Während im sogenannten Materialkonto über volkswirtschaftliche Materialflussrechnungen die Stoffflüsse an den Grenzen der Volkswirtschaft, d. h. der inländischen Entnahmen und Importe sowie der Exporte und Abgaben an die Umwelt, gut bilanzierbar und differenzierbar sind, resultiert der Verbleib innerhalb des Wirtschaftssystems nur als bilanzielle Restgröße [1]. Dieser so ermittelte Nettobestandszuwachs (NAS, engl. Net-additions-to-stock) kann in ganz grober Näherung als Bestandszuwachs des anthropogenen Lagers durch langlebige Güter interpretiert werden, denn die Inventare kurzlebiger Verbrauchsgüter, darunter Kraftstoffe und Lebensmittel, finden sich ganz überwiegend noch im selben Jahr in den Emissionen wieder. Für das Jahr 2010 ergab sich so ein Nettobestandszuwachs in Höhe von ca. 820 Mio. Tonnen an Material. Dies entspricht einem Anstieg des anthropogenen Lagers um ca.

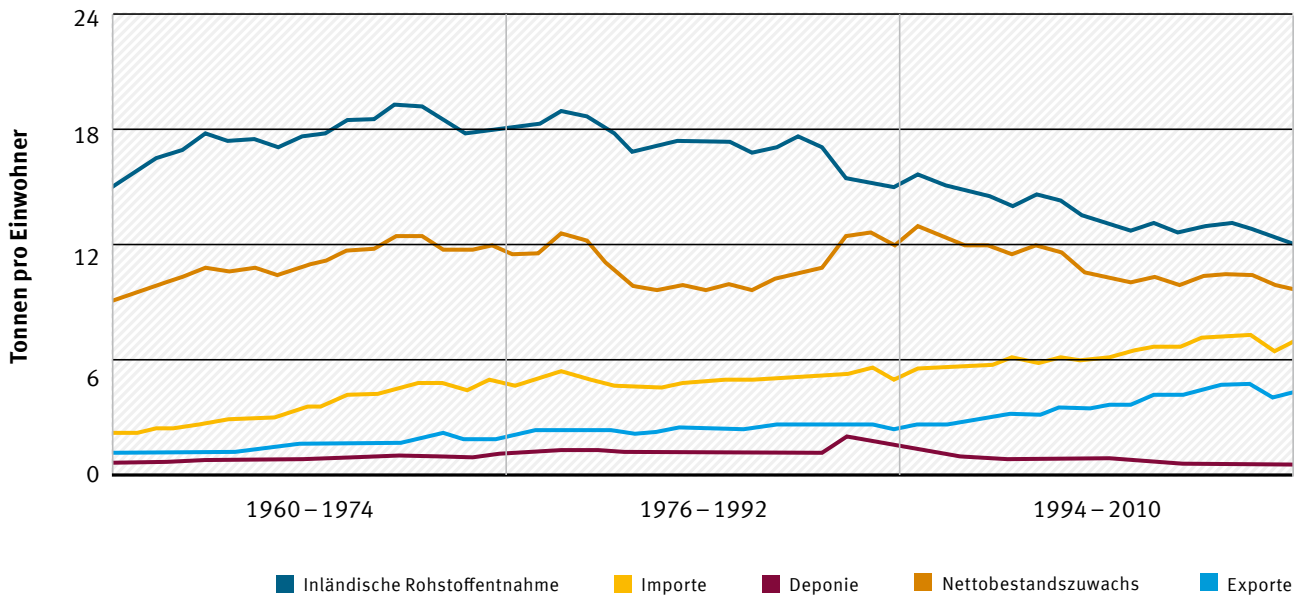
zehn Tonnen pro Jahr und Einwohner. Seit Dekaden liegt der jährliche Nettobestandszuwachs in etwa in dieser Größenordnung (s. Abbildung 10, S. 30).

Die Zuflüsse aus Importen und inländisch extrahierten Rohstoffen, insbesondere Baumineralien wie Kies, Sand, Natursteinen und Kalkstein übersteigen also im langfristigen Trend in großem Maße die Abflüsse aus Exporten, Emissionen und Ablagerungen. Während die inländische Rohstoffgewinnung sich deutlich reduzierte, sind die Importe und Exporte mit ähnlicher Steigung angewachsen. Der Gesamtbestand im anthropogenen Lager der Bundesrepublik lässt sich für das Jahr 2010 auf 51,7 Mrd. Tonnen Material schätzen, davon mehr als 80 Prozent als Zuwachs seit 1960, d. h. in 50 Jahren haben sich rund 42 Mrd. Tonnen angesammelt [31]. Dies entspricht ungefähr der Summe aller im Jahr 2000 weltweit gewonnenen Rohstoffe.

Nicht alles im Gesamtbestand lässt sich in bekannten Gütergruppen verorten. Nicht alles davon wird für die Sekundärrohstoffwirtschaft jemals relevant, beispielsweise Materialien, die in landschaftsgestaltende Erdbaumaßnahmen gehen. Die jährlichen Güterflüsse in das anthropogene Lager und die enthaltenen Materialien lassen sich durch die Auswertung von gesamtwirtschaftlichen Produktions-, Außenhandels-, Abfall- und nichtamtlichen Verbandsstatistiken noch etwas präziser beschreiben (s. Abbildung 13, S. 33). So flossen beispielsweise im Jahr 2010 rund 666 Mio. Tonnen Material in Bauwerke sowie langlebige Konsum- und Kapitalgüter. Davon stammen etwa 20 Prozent aus Sekundärmaterialien, vorwiegend aus Baurestmassen, aber auch industriellen Abfällen und Nebenprodukten wie Aschen, Schlacken und REA-Gips. Abgelagert wurden 29 Mio. Tonnen, davon mehr als die Hälfte (16 Mio. Tonnen) auf abfallwirtschaft-

Abbildung 10

Volkswirtschaftliche Materialflüsse in Deutschland [1960 bis 2010]



Eigene Darstellung nach [31]

lichen Deponien beseitigt, der Rest (13 Mio. Tonnen) verfüllt [31].

Die Materialflüsse im anthropogenen Lager werden über ein Top-down-Modell bestimmt. Derartige Modelle geben ein gesamtwirtschaftliches Abbild. Aus wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten ist allerdings eine wesentlich tiefergehende Gliederung der Güterstruktur und der Materialien notwendig. Dies erfordert einen Perspektivwechsel. Mithilfe sogenannter Bottom-up-Analysen nähert man sich Lagern und Flüssen über Hochrechnungen für einzelne Güter und Gütergruppen. Eine große Herausforderung besteht darin, die wesentlichen Güterkategorien möglichst umfassend abzuschätzen, deren Anzahl, Länge, Fläche o.a. zu ermitteln und diese dann mit repräsentativen Materialkoeffizienten zu verrechnen. Nicht immer und nicht für alle Güter lassen sich solche Hochrechnungen anstellen. So bleibt es nicht aus, dass Bottom-up-Analysen im Ergebnis meist niedriger ausfallen als Top-down-Analysen [49]. Für das Jahr 2010 ergab eine Untersuchung der fünf langlebigen

Gütergruppen Gebäude, leitungsgebundene Infrastrukturen, Haustechnik sowie langlebige Kapital- und Konsumgüter, dass mindestens 28 Mrd. Tonnen Material in jenen Gütern gebunden waren. Die Bottom-up-Analyse liegt damit um mehr als 20 Mrd. Tonnen niedriger als die Top-down-Analyse des Gesamtbestands.

Das Lager über die fünf genannten Gütergruppen besteht pro Kopf betrachtet aus einer enormen Menge von 341 Tonnen Material (s. Abbildung 11, S. 31), darunter 317 Mio. Tonnen mineralische Materialien, im Wesentlichen ungebundene Gesteine und Sande, Beton- und Mauersteine. Es folgen Metalle mit 14 Tonnen, vorrangig Stahl aber auch fast 100 Kilogramm Kupfer.* Weiterhin beläuft sich das Lager auf vier Tonnen Holz, drei Tonnen Kunststoffe sowie weiteren zwei Tonnen an sonstigen Materialien, die sich nicht eindeutig zuordnen lassen.

Der weitaus größte Teil des Lagers entfällt auf den Bausektor (s. Abbildung 12, S.32). Allein 55 Prozent der Lagermassen sind in Wohn- und

* Der gesamte Anteil an Nichteisenmetallen wurde auf 212 Kilogramm pro Kopf taxiert. In einer Studie im Auftrag von Metalle pro Klima, einer Unternehmensinitiative in der VVMetalle wurden hingegen 950 Kilogramm Nichteisenmetalle pro Einwohner (2014) ermittelt [107]. Die deutlichen Unterschiede lassen sich damit begründen, dass im ersten Fall eine güterbasierte Bottom-up-Methode zugrunde liegt, die per se nicht vollständig ist und von der Repräsentativität der angenommenen Materialkoeffizienten abhängt, während im zweiten Falle eine Materialstrombilanzierung, ausgehend von Produktionsmengen zugrunde liegt, die somit eher einer Top-down-Logik folgt.

Abbildung 11

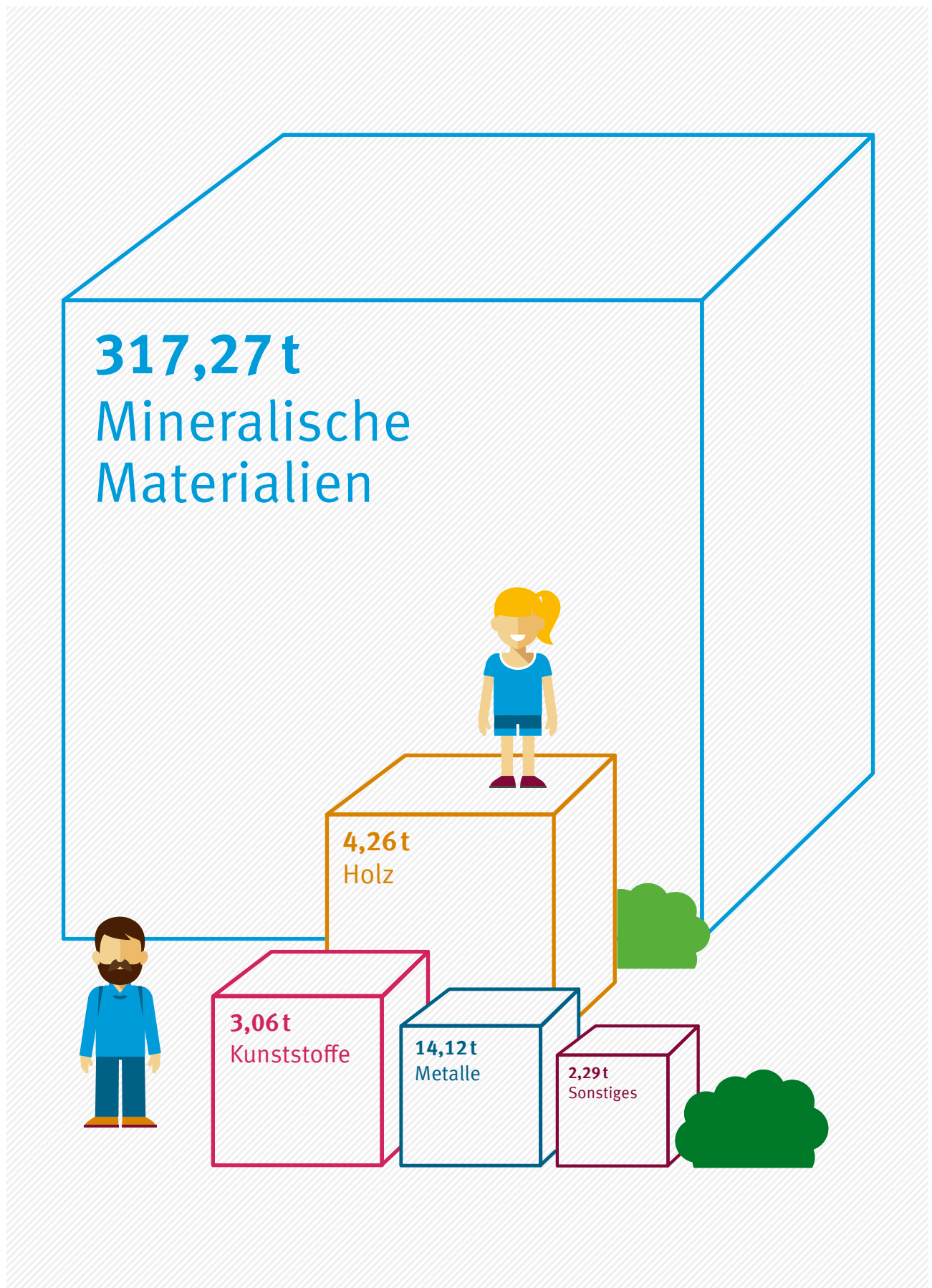
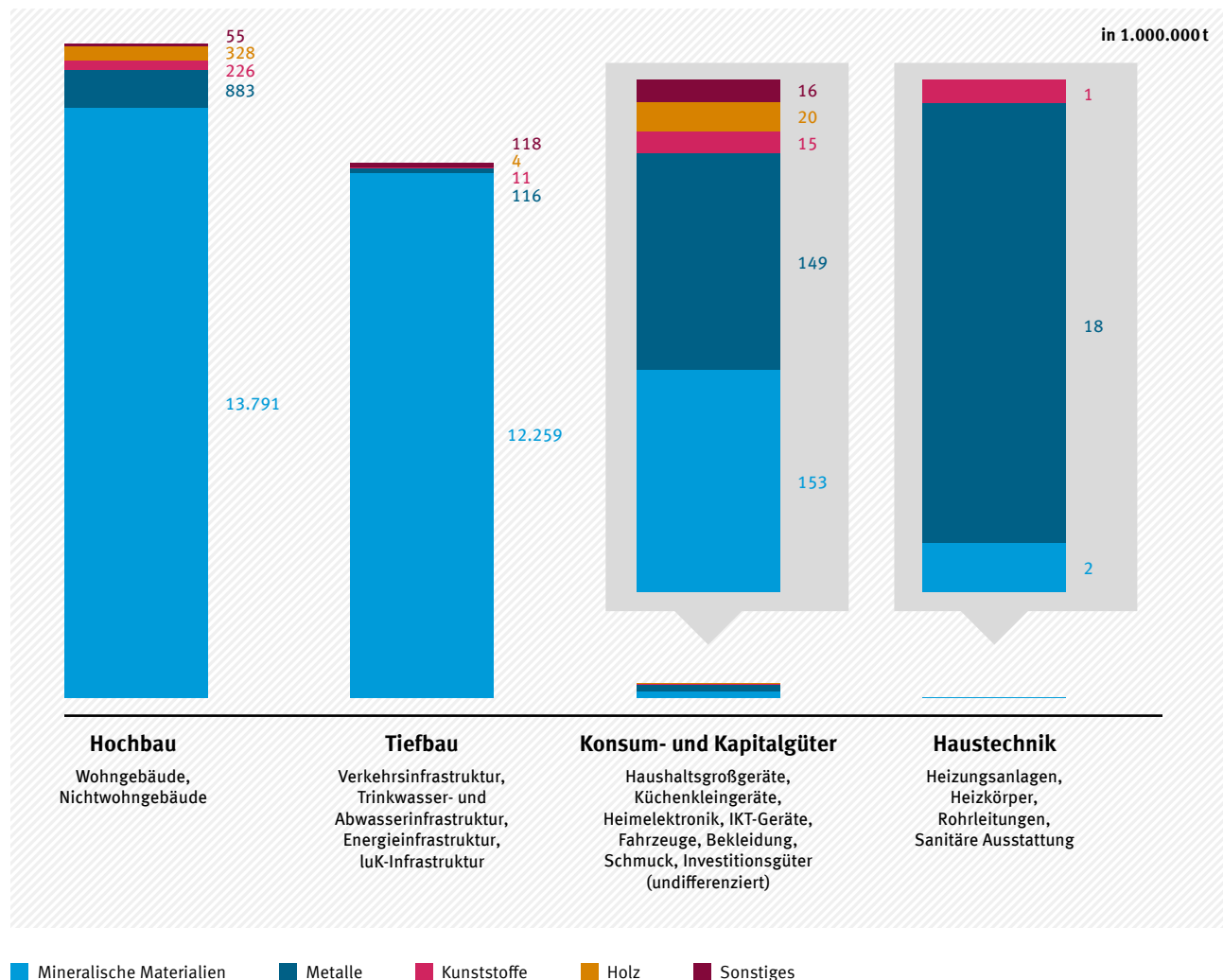
Bekanntes Pro-Kopf-Materiallager in Deutschland [2010]

Abbildung 12

Anthropogenes Materiallager nach Gütergruppen und Materialien in Deutschland [2010]



Quelle: [23]



Der Materialwert der Metalle im anthropogenen Lager Deutschlands lässt sich auf circa 650 Mrd. Euro beziffern.

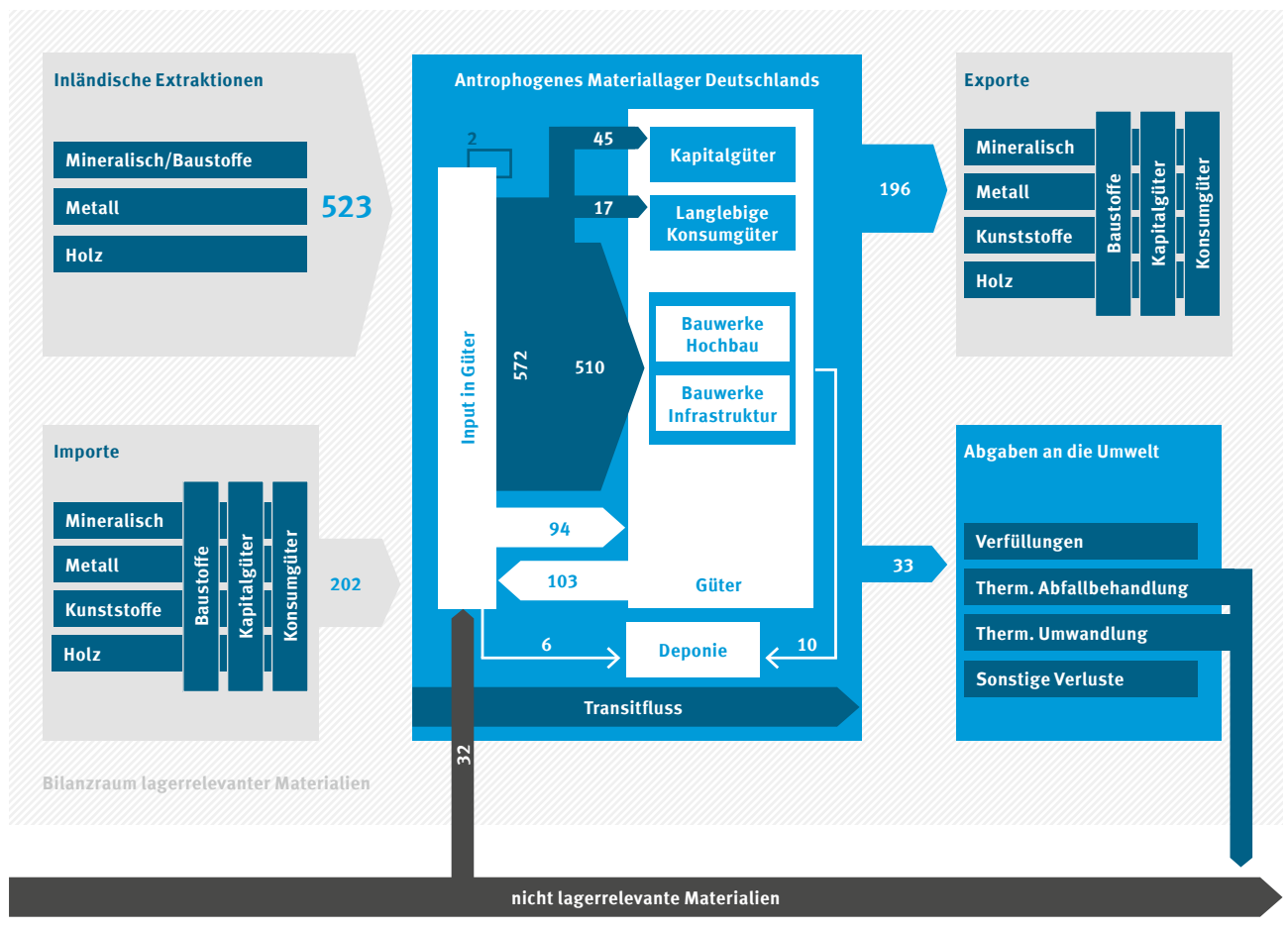
Nichtwohngebäuden gebunden. Der Tiefbau, der die Infrastrukturen für Verkehr, Trink- und Abwasser, Energie sowie Informations- und Kommunikationsnetze umfasst, deckt 44 Prozent ab. Das Lager, das in der Haustechnik wie Rohrleitungen und Heizungsanlagen sowie in langlebigen Konsum- und Kapitalgütern gebunden ist, ist mit weniger als einem Prozent des gesamten Materiallagers deutlich kleiner. Allerdings sind die Lager dieser Gütergruppen von besonderem Interesse. Während das Lager in Bauwerken von mineralischen Materialien dominiert wird, haben in der Haustechnik, sowie in den Kapital- und Konsumgütern metallische Materialien einen weitaus größeren Massenanteil. Dieser reicht von knapp 40 Prozent in Kapitalgütern, über ca. 60 Prozent in Konsumgütern bis hin zu fast 90 Prozent in der Haustechnik.

Neben den Eisenmetallen umfassen die Lager dieser Gütergruppen vor allem die Buntmetalle, wie z. B. Kupfer und Aluminium, in kleineren Mengen auch Edel- und Sondermetalle, deren Rückgewinnung von besonderem ökologischen und wirtschaftlichen Interesse ist (s. Kasten, S. 34). Die Bedeutung dieser mengenmäßig kleineren Fraktionen im Lager zeigt sich auch bei Betrachtung der mit ihnen verbundenen Rohmaterialwerte: Der reine Materialwert des anthropogenen Lagers beläuft sich auf schätzungsweise 1.300 Mrd. Euro – ohne die tatsächlichen, weitaus höheren aktuellen Güterwerte – das Anlagevermögen – zu berücksichtigen. Allein 650 Mrd. Euro davon entfallen auf Metalle, jeweils ca. 150 Mrd. Euro auf Kunststoffe und Holz sowie ca. 350 Mrd. Euro auf mineralische und sonstige Materialien.

Abbildung 13

Flüsse im anthropogenen Materiallager Deutschlands in Mio Tonnen [2010]

33



Edel- und Sondermetalle

Metalle, die besonders korrosionsbeständig sind, werden nicht zuletzt wegen ihres hohen Werts Edelmetalle genannt. Zu diesen zählen insbesondere Gold und Silber sowie die Platinmetalle.

Abweichend von den in großer Menge eingesetzten Massenmetallen wie Aluminium, Eisen und Kupfer gibt es Metalle, die zwar in weitaus geringeren Mengen in Produkten ein- und zugesetzt sind, deren relativer Gewinnungsaufwand und Versorgungsrisiko aber teilweise ungleich höher sind. Diese werden unter dem Begriff Sondermetalle subsumiert, beispielsweise Indium, Gallium, Tantal, Neodym oder Cobalt.

Unter den Edel- und Sondermetallen finden sich auch sogenannte Konfliktrohstoffe wie Tantal, Gold, Zinn und Wolfram. Die Hoheit über deren Minen in Zentralafrika und Lateinamerika ist nicht nur das Ziel von kriegerischen Auseinandersetzungen. Aus den Erlösen der Gewinnung und des Handels finanzieren sich auch militante Rebellen Gruppen, die für schwerwiegende Menschenrechtsverletzungen verantwortlich sind. Um dies zukünftig nicht mehr als Nachfrager zu unterstützen, strebt nun nach den USA auch die Europäische Kommission eine rechtliche Regelung für einen transparenten und zertifizierten Handel dieser Rohstoffe an [51]. Aber auch deren Rückgewinnung aus dem anthropogenen Lager stellt eine wichtige Vermeidungsstrategie dar.



Dynamische Lager

Mit rund 28 Mrd. Tonnen entspricht die Höhe des Gesamtbestandes des anthropogenen Lagers über die ermittelten Gütergruppen ca. dem 75-fachen dessen, was jährlich für ebenjene Güter neu aufgewendet wird (ca. 372 Mio. Tonnen).

Dabei entwickeln sich die jährlichen neuen Materialflüsse in die betrachteten Gütergruppen nicht per se proportional zu den Beständen. Neue Gütergruppen wachsen rasant an, andere verschwinden langsam oder auch relativ zügig. Der Grund dafür sind einerseits technologische Entwicklungen und politisch motivierte Trends, beispielsweise zur Energieeinsparung durch eine verstärkte Gebäudedämmung, andererseits aber auch veränderte Konsummuster, Konsumpräferenzen und funktionelle Obsoleszenzen. Zudem unterliegen die enthaltenen Materialien qualitativ und quantitativ einem steten Wandel. Es bilden sich für Material und Gütergruppen spezifische Dynamiken heraus, wie das Beispiel Tiefbau zeigt.

Im Tiefbau zeichnet sich ein relativ großer Zuwachs ab: Im Vergleich zu den Beständen ist die Verwendung an mineralischen Materialien im Tiefbau in etwa um den Faktor 2 größer als im Hochbau. Während sich nur ca. ein Zehntel der in Bauwerken gebundenen Metalle in Tiefbauinfrastrukturen befindet, fließt dort mittlerweile ein Drittel der im gesamten Bauwesen eingesetzten Mengen ein [31]. Eine maßgebliche Triebkraft hierfür ist die Energiewende. Im Jahr 2010 gingen fast 30 Prozent der Materialaufwendungen für Neubau und Instandsetzung der Energieerzeugungs- und -verteilungsinfrastrukturen in den Bau neuer Windkraft-, Biogas- und Photovoltaikanlagen. Im Gesamtmaterialbestand aller Energieinfrastrukturen repräsentieren diese bislang jedoch nur fünf Prozent. Dies wird sich in Anbetracht der enormen Wachstumsdynamik in den kommenden Jahrzehnten fundamental ändern. Für eine spätere Rückgewinnung von Interesse ist besonders, was verbaut wird: Neben den Massenmetallen wie Stahl, Aluminium und Kupfer werden auch relevante Mengen an faserverstärkten Kunststoffen und wirtschaftsstrategischen Technologiemetallen sowie Sonder- und Edelmetallen wie Silber, Zinn, Neodym und Gallium in diesen Infrastrukturen angereichert. In anderen Bereichen, wie den Verkehrswegeinfrastrukturen, ist der Zubau hingegen relativ gering, der Bestand offenbar nahe an einer Sättigung. Dort entfallen bereits rund 80 Prozent der jährlichen Materialaufwendungen auf die Instandhaltung, Ertüchtigung und Sanierung. Ähnlich ist es im Gebäudebestand und der darin gebundenen Haustechnik.

Besondere Aufmerksamkeit für kritische Rohstoffe

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts wurde von führenden geowissenschaftlichen Einrichtungen postuliert, dass die Rohstoffversorgung sicher und eine ernstzunehmende Beschränkung des Wachstums durch Rohstoffknappheiten nicht zu befürchten sei [52, 53]. Damit reagierte man auch auf das noch immer weit verbreitete Missverständnis, die sogenannten statischen Reichweiten von Rohstoffen als Verfügbarkeitslebensdauern zu interpretieren (s. Kasten).

Gleichwohl avancierten Rohstoffknappheiten, vor allem die Rohstoffkritikalität, in den letzten Jahren zu einem viel diskutierten Thema in der Rohstoffpolitik und -wirtschaft. Nicht zuletzt aus der Erfahrung von außergewöhnlichen Preisschocks und hohen Preisvolatilitäten wurde zunehmend anerkannt, dass eine eingeschränkte Verfügbarkeit zukünftig aus einer größeren Vielzahl an Versorgungsrisiken begründet sein wird. Diese erstrecken sich von geologischen, technischen, strukturellen bis auf geopolitische, sozioökonomische und ökologische Kriterien. Auch die Nachfrageseite rückte in den Fokus. Denn inwiefern eine Rohstoffknappheit besteht, hängt neben dem Angebot auch davon ab, wie stark ein Nachfrager, z. B. ein Staat, eine Region oder ein Unternehmen, auf eine stabile Versorgung angewiesen ist. Hierfür wird die Bedeutung und Anpassungsfähigkeit (Vulnerabilität) im Falle einer Versorgungsunterbrechung betrachtet.

Auf den Listen kritischer Rohstoffe für Deutschland und der EU finden sich vor allem sogenannte

Technologierohstoffe [55]. Innerhalb von wenigen Jahren und Jahrzehnten haben sich neue, teils disruptive innovative Technologien entwickelt, die – obgleich zumeist in kleinsten Mengen – funktionell auf eine Vielzahl von Elementen angewiesen sind, denen zuvor oft nur eine untergeordnete wirtschaftliche Bedeutung zukam. Aufgrund ihrer interessanten chemischen und physikalischen Eigenschaften sind diese Technologierohstoffe – überwiegend Edel- und Sondermetalle – in vielfältigen langlebigen Anwendungsfeldern wie Umwelttechniken oder Informations- und Kommunikationstechniken kaum zu ersetzen (s. Abbildung 14, S. 36). Sie haben binnen kürzester Zeit einen rasanten Nachfrageschub erfahren. Nicht nur in Deutschland, sondern weltweit.

Mehr als zwei Drittel der globalen Gewinnung an Platingruppenmetallen (z. B. in Katalysatoren, Legierungen), aber auch von Indium und Gallium (z. B. in Elektronik, Optoelektronik, Photovoltaik), Tantal (z. B. in Elektronik, Kondensatoren) sowie Seltenen Erden (z. B. in Permanentmagneten, Optoelektronik, Elektrochemische Speicher) erfolgte nach 1988 [57]. Problematisch für deren Verfügbarkeit sind neben politisch instabilen Förderländern, hohen Marktkonzentrationen, restriktiven Export- und Handelspolitiken und strukturellen Koppelproduktionen auch noch die teils sehr geringen Recyclingraten aus Altprodukten. Während für die großen Mengenströme an Eisen- und Nichteisenmetallen sowie die Edelmetalle funktionierende Recyclingsysteme etabliert sind, findet ein Recycling für viele weitere Technologiemetalle noch nicht oder nur in marginalem Umfang statt [58] (s. Abbildung 15, S. 37).

„Statische Reichweiten“ sind kein Knappheitsmaß

Statische Reichweiten bilden das Verhältnis der vorhandenen Reserven bzw. Ressourcen eines Rohstoffes zur aktuellen jährlichen, weltweiten Fördermenge ab. Rückblickend zeigt sich, dass sowohl für fossile Energierohstoffe als auch für Erze die statischen Reichweiten trotz eminent gestiegener Verbrauchsentwicklung in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts nahezu konstant geblieben sind, oder sich sogar erhöht haben. Technologischer Fortschritt und die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ermöglichten eine deutliche Steigerung der Exploration und damit die Ausdehnung der Reserven [54]. Statische Reichweiten sagen eher etwas über die Charakteristik der Bergbauexplorationszyklen denn die physische Verfügbarkeit von Rohstoffen aus.

Abbildung 14

Technologiemetalle nach Anwendungsfeldern

	Bi	Co	Ga	Ge	In	Li	REE	Re	Se	Si	Ta	Te	Ag	Au	Ir	Pd	Pt	Rh	Ru
Pharma																			
Medizintechnik/Dental																			
Superlegierungen																			
Magnete																			
Hartlegierungen																			
Andere Legierungen																			
Metallurgie																			
Glas, Keramik, Pigmente																			
Photovoltaik																			
Batterien																			
Brennstoffzellen																			
Katalysatoren																			
Nuklear																			
Lote																			
Elektronik																			
Optoelektronik																			
Schmierstoffe																			

Quelle: [56]

Vor allem in jüngster Zeit wurden die anthropogenen Lager also mit einer großen Vielzahl und nennenswerten Mengen sehr bedeutsamer Stoffe angereichert. Bei den besonders werthaltigen Edelmetallen der Platingruppe wird allein die im Jahr 2020 in Deutschland aus Altprodukten anfallende, für eine Rückgewinnung zur Verfügung stehende Menge schätzungsweise zwischen vier und zwölf Prozent der derzeitigen Weltjahresproduktion dieser Metalle betragen [59, 60]. In diesen Hochrechnungen sind noch nicht die Mengen aus Altfahrzeugen und haushaltsnahen Elektro- und Elektronikaltgeräten enthalten, die das Aufkommen voraussichtlich noch einmal um ca. ein Drittel steigern werden.

Es ist absehbar, dass sich die Rohstoffkritikalität für viele derzeit kritisch eingestufte Rohstoffe

in Deutschland und der EU zukünftig noch steigern wird. Denn allein durch wachstumsstarke Schlüsseltechnologien wie Mikrokondensatoren, Akkumulatoren und Brennstoffzellen wird eine Verdopplung bis Vervielfachung des Rohstoffbedarfs, z. B. für Tantal, schwere Seltene Erden sowie Rhenium, in den kommenden 20 Jahren prognostiziert [61]. Folglich sind diese Stoffe von einem immensen wirtschaftsstrategischen Rückgewinnungsinteresse. Mittel- bis langfristig kann die Rohstoffbasis durch Recyclingsysteme geweitet und damit die Rohstoffkritikalität vieler so wichtiger Rohstoffe abgemildert werden. Allerdings besteht aufgrund der teils sehr geringen Einsatzkonzentrationen von Technologiemetallen die Gefahr eines dissipativen, d. h. eines unwiederbringlichen Verlusts durch Feinverteilung in größeren Stoffströmen bzw. der Umwelt. Selbst

Abbildung 15

End-of-life-Recyclingraten im globalen Durchschnitt

	I	II	GRUPPE										III	IV	V	VI	VII	VIII	
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 s	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ce	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Be	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 HS	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo	
* LANTHANOIDE			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
** ACTINOIDE			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

< 1%

1 – 10%

> 10 – 25%

> 25 – 50 %

> 50 %

Quelle: [58]

wenn größere Mengen an End-of-life-Abfällen anfallen werden, stellt eine Rückgewinnung und erforderliche Aufkonzentrierung, insbesondere der heute kritischen Elemente eine außerordentliche Herausforderung dar. Zur Rückgewinnung von Edel- und Sondermetallen bedarf es neuer Erfassungs- und Logistikkonzepte sowie Behandlungsverfahren für die betreffenden Altprodukte. Das sogenannte „Pooling“, das Zusammenführen branchenbedingt getrennter Abfallströme mit ähnlichen Wertstoffinhalten, muss umfassend ausgebaut werden, um dieses Hemmnis zu überwinden. Dies neben vielen Massenmaterialien aus sehr komplexen Stoffverbünden zu realisieren, ist eine weitere Aufgabe für das Urban Mining.





Ein systematisches Wissensmanagement und zielgerichtete Planungsgrundlagen sind unabdingbar.

Potenziale: Von Ressourcen zu Reserven

Die Bewirtschaftung des anthropogenen Lagers zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus langlebigen Produkten, Gebäuden, Infrastrukturen und Ablagerungen kann durch Bewertungsmethoden unterstützt werden, wie sie im Primärbergbau und auch in anderen Wirtschaftsbereichen routinemäßig zum Einsatz kommen. Zur Systematisierung urbaner Minen müssen Bewertungsschemata etabliert und mit Daten unterlegt werden. Erste methodische und exemplarische Vorschläge liegen bereits vor [62, 63].

Im Primärbergbau wurden Klassifikationen wie das McKelvey-Schema entwickelt, um Ressourcen und Reserven in einen Zusammenhang zu stellen [64]. Mit diesem Schema wird auch verdeutlicht, dass die Verfügbarkeit nicht absolut ist. Es ändern sich sowohl die absoluten Größenordnungen geologischer Potenziale, von Ressourcen und Reserven, als auch deren Verhältnisse zueinander. Steigende Explorationstätigkeiten – getrieben durch zukünftige Gewinnerwartungen – überführen bislang nicht erfasste Geopotenziale in Ressourcen und Reserven. Auch technischer Fortschritt spielt eine Rolle.

Betrachten wir die gesamte Erdkruste als das geologische Potenzial, so handelt es sich bei den geologischen Ressourcen um die Rohstoffmengen aller Vorkommen von wirtschaftlichem Interesse, die nachweislich vorhanden oder aus geologischen Gründen zu vermuten sind. Als Reserve werden hingegen nur die Rohstoffmengen in Lagerstätten verstanden, d. h. die Vorräte die zu dem derzeitigen Zeitpunkt zu derzeitigen Preisen und mit vorhandenen Technologien wirtschaftlich zu gewinnen sind.

Der sogenannte Cut-off-Grade gibt dabei an, wie hoch der Mindestgehalt an Wertstoffen mindestens sein muss. Die Reservenbasis ist derzeit noch nicht wirtschaftlich erschließbar, was langfristig aber denkbar ist [65].

Eine Analogie für anthropogene Lager liegt nahe. Auch anthropogene Lager sind nicht abschließend bestimmbar. Sie sind längst nicht alle gleichermaßen erkundet und aufgrund unterschiedlicher Lagerstättenbeschaffenheit nicht gleichermaßen gut für eine Rückgewinnung von Materialien geeignet.

Erkundung anthropogener Lager

Einige Lagerstätten und Vorkommen sind nachgewiesen und über Statistiken oder Kataster eindeutig belegt. Andere lassen sich z. B. durch Hochrechnungen und Projektionen zumindest ableiten. Vermutete Lagerstätten und Vorkommen können sich durch indirekte, weitergehende Modellierungen und Analogieschlüsse ergeben, beispielsweise mithilfe von sektoralen Top-down-Daten zur Produktion von Gütergruppen, die entsprechende Lagergrößen nahelegen. Schließlich ist ein Teil nicht weiter zu bestimmen und zu den unbekannten Lagern zu zählen, z. B. über Materialflussrechnungen abgeleitete Bilanzgrößen.

Beschaffenheit und Wirtschaftlichkeit

Für die Bewertung der Lagerstätten aus rohstoffwirtschaftlicher Sicht sind der Stand der Technik und die wirtschaftlichen und logistischen Rahmenbedingungen entscheidend. Einen wesentlichen Einfluss darauf haben die Gehalte einzelner Stoffe und deren Reinheit und Einbindung in andere Materialien. In der Regel steigt der Rückgewinnungsaufwand mit zunehmender Dissipation (Feinverteilung). Für Metalle kann z. B. je nach Einsatzweise unterschieden werden, ob sie in gediegener Reinform (z. B. Edelmetalle), in Legierungen (z. B. Messing, Edelstahl), in komplexen Materialverbünden (z. B. elektronische Bauteile, Leiterplatten) und in dissipativen Anwendungen (z. B. Pigmente in Farben) vorliegen [66]. Holz und Kunststoffe werden zwar weitaus häufiger in Reinform eingesetzt, allerdings werden dort auch Additive wie Flammschutzmittel, Biozide und Weichmacher eingesetzt, die besondere Anforderungen an die Verwertung stellen.

Bei der Bewertung, ob sich die Erschließung der Lager lohnt, reicht die Spannbreite von der derzeitigen Wirtschaftlichkeit hin zur technischen Unmöglichkeit, die häufig bei dissipativen Nutzungen vorliegt. Dazwischen gibt es interessante Graustufen: bedingt wirtschaftlicher sowie technisch möglicher, aber unwirtschaftlicher Abbau. Ersteres – eine bedingte Wirtschaftlichkeit – ist gegeben, wenn sich diese bereits durch geringe Preisveränderungen und leichte Anpassungsmaßnahmen der Rahmenbedingungen einstellen kann. Zweiteres meint eine technisch demonstrierte Machbarkeit aus laufenden Forschungsaktivitäten, die noch einer marktgerechten Umsetzung harret.

Arten anthropogener Lager

Von großer Bedeutung sind auch Art und Beschaffenheit der anthropogenen Lager. Im Wesentlichen lassen sich drei Formen unterscheiden [67].

Die meisten Güter des anthropogenen Lagers befinden sich in Verwendung, d. h. in genutzten Lagerstätten und Vorkommen. Ein zugelassener PKW zählt genauso zu den genutzten Lagern wie ein bewohnbares Wohngebäude, Möbel, Elektrogroßgeräte oder ein Kraftwerk, sofern für diese noch eine Nutzungsabsicht besteht. Dabei ist es nicht von Bedeutung ob es sich um Erst-, Mehrfach- oder Kaskadennutzung handelt. Auch die Intensität der Verwendung ist nicht von Belang.

Hiervon abzugrenzen sind ungenutzte anthropogene Lagerstätten und Vorkommen. Darunter sind Güter zu fassen, für die keine Nutzungsabsicht mehr besteht, die aber auch noch nicht entsorgt und ggf. verwertet sind. Dabei liegt meist noch kein Entledigungswille vor, der diese Güter zu Abfällen machen würde. Unter den ungenutzten anthropogenen Lagern sind beispielsweise stillgelegte Bahntrassen zu fassen, Industriebrachen, Erdkabelleitungen und Kanäle, die nicht mehr an einem Netz angeschlossen sind. Depots an ausrangierten und defekten Elektrogeräten, die sich in Privathaushalten ansammeln – darunter das viel zitierte Schubladenhandy – lassen sich als Grenzfall auch darunter fassen. Allerdings ist diese Zuordnung stark von der Werthaltung des Besitzers abhängig und eine theoretische Wiedernutzung denkbar.

Eine dritte Kategorie stellen anthropogene Ablagerungen dar. Hierunter fallen typischerweise alle obertägigen und untertägigen Deponieklassen – interessant für das Landfill Mining. Aber auch Bergbau- und Hüttenhalden vor allem aus der Zeit vor einer hochtechnisierten Bearbeitung sowie sonstige Ablagerungen industrieller Abfälle wie Phosphorgipshalden und Rotschlammseen aus der Aluminiumproduktion zählen hierzu.

Klassifikation

Werden all diese Informationen zusammengeführt, lassen sich auf Materialebene die derzeitigen anthropogenen Reserven, die mittel- und langfristige Reservenbasis sowie die anthropogenen

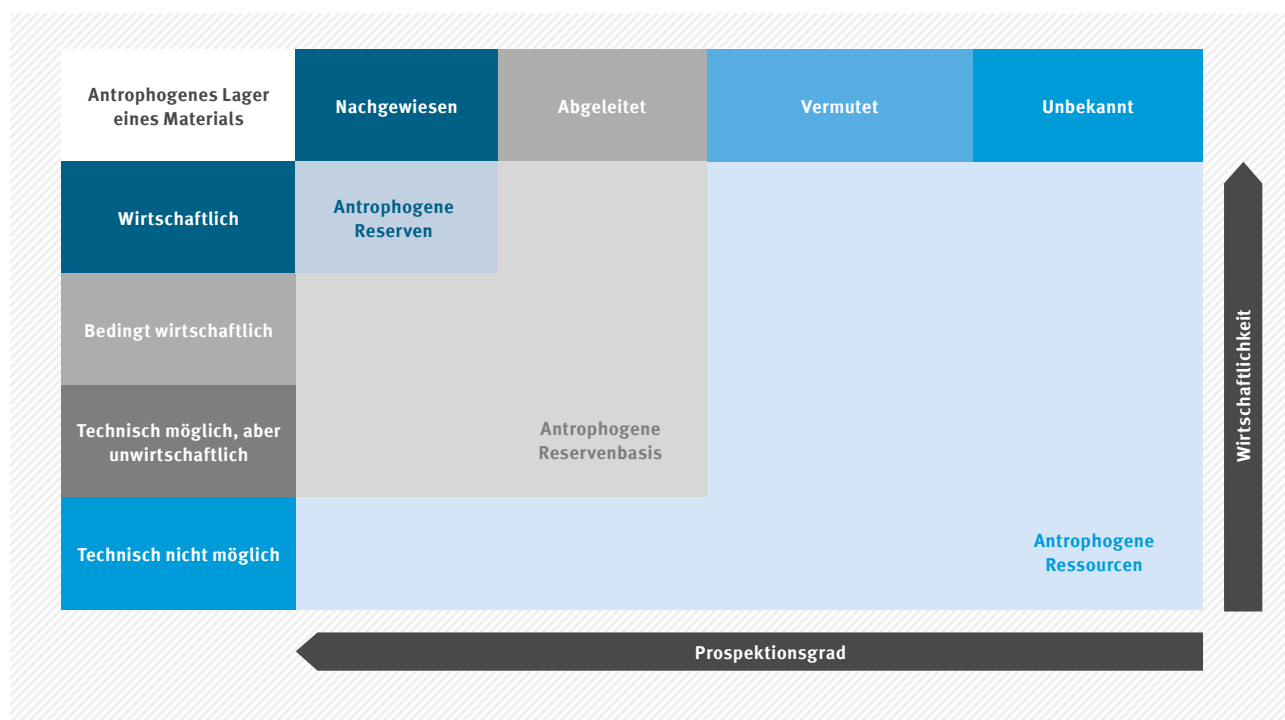
Ressourcen für einzelne Materialien in großer Dichte aufzeigen (s. Abbildungen 16 und 17). Nicht nur im Mengenverhältnis zueinander, sondern auch im Vergleich zu primären Lagerstätten, was für Rohstoffstrategien von großer Bedeutung sein kann.

Hinter der Klassifikation in die verschiedenen Segmente verbirgt sich auch ein anthropogener Cut-off-Grade, der Aufschluss darüber gibt, welche Stoffkonzentration zumindest erforderlich ist, um bei gegebenen technischen Möglichkeiten einen Stoff wiederzugewinnen und wieder bis zum einsetzbaren Rohmaterial anzureichern.

Theoretisch lässt sich aber auch ein ökologischer Cut-off-Grade ausweisen, der aufzeigt, welcher Verwertungsaufwand gegenüber dem Primärbergbau immer noch gerechtfertigt wäre, um keine zusätzlichen negativen Umweltauswirkungen zu erzeugen und auf diese Weise natürliche Ressourcen zu schonen [69]. Der Gestaltungsspielraum ist, wie am Beispiel Aluminium gezeigt, enorm (s. S.24). Voraussetzung ist allerdings auch, dass kein Downcycling praktiziert wird. Denn durch Downcycling muss anschließend wieder mehr Primärmaterial aufgewendet werden, was diese eindeutige Bilanz deutlich verschlechtert.

Abbildung 16

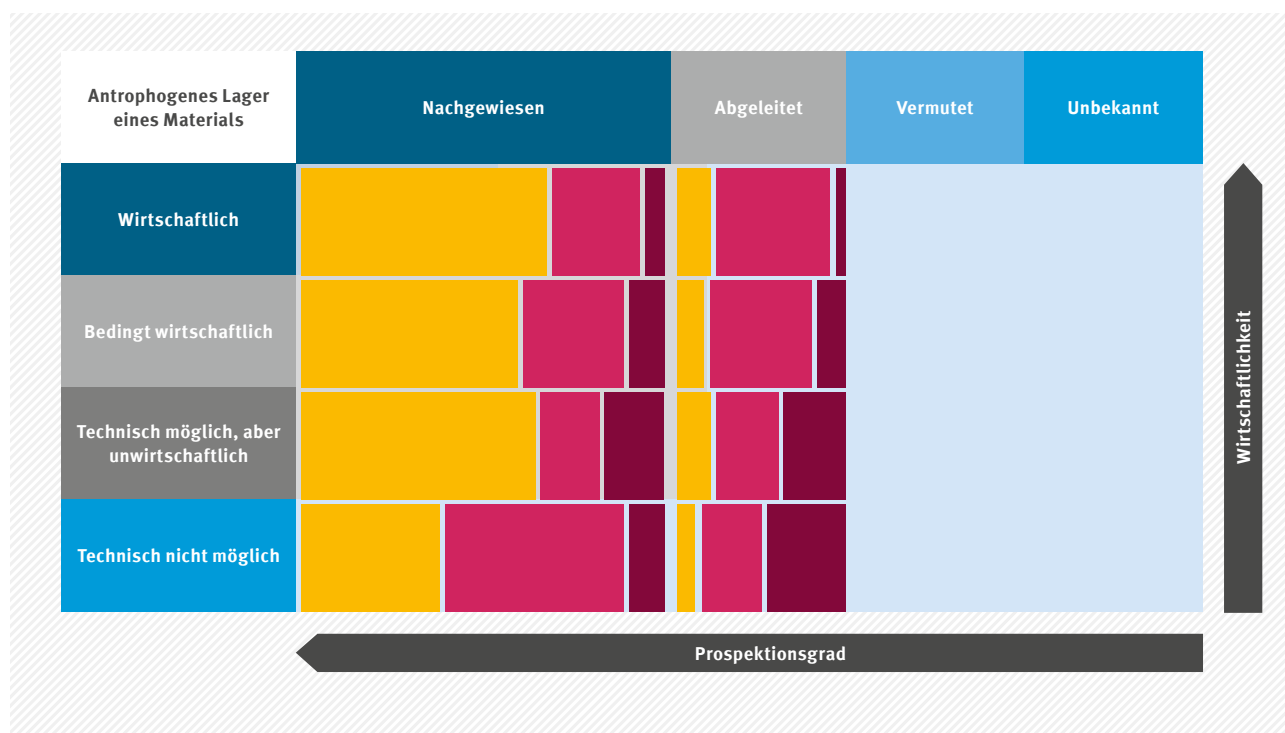
Klassifikation anthropogener Lager



Eigene Darstellung

Abbildung 17

Klassifikation anthropogener Lager nach Art des Lagers



Art des Lagers

genutzt ungenutzt abgelagert

Eigene Darstellung

Beispielexkurs – Sekundärzinkmaterialien in Deutschland

In Deutschland fallen diverse zinkhaltige Sekundärmaterialien an, die in unterschiedlichen Prozessen behandelt und recycelt werden können. Diese liegen einerseits in genutzten und ungenutzten Lagern vor, andererseits aber auch in anthropogenen Ablagerungen. In Abhängigkeit vom technischen, logistischen und energetischen Aufwand ergeben sich unterschiedliche Kosten für die Rückgewinnung des metallischen Zinks. Abbildung 18 gibt einen schematischen Überblick über die in Deutschland anfallenden Zinkmengen in ausgewählten Sekundärmaterialien sowie der jeweiligen spezifischen Aufbereitungskosten zur Rückgewinnung des metallischen Zinks. Güter aus Zink, Messing und verzinkten Stahlprodukten sowie einige zinkreiche Reststoffe können als anthropogene Reserven eingestuft werden.

Das direkte Wiedereinschmelzen von metallischen Schrotten aus Zink oder Messing verursacht den geringsten Kostenaufwand. Ein Teil der anfallenden Messingschrotte wird wegen des hohen Kupferanteils von über 55 Prozent über die Sekundärkupferroute recycelt. Dabei wird das Zink zunächst oxidiert. Die Weiterverarbeitung erfolgt dann meist in einer hydrometallurgischen Zinkraffination, in der elektrolytisch Feinzink gewonnen wird. Diese Aufbereitung ist zwar aufwendiger als das direkte Wiedereinschmelzen, erlaubt aber die getrennte Rückgewinnung sowohl des Kupfers als auch des Zinks.

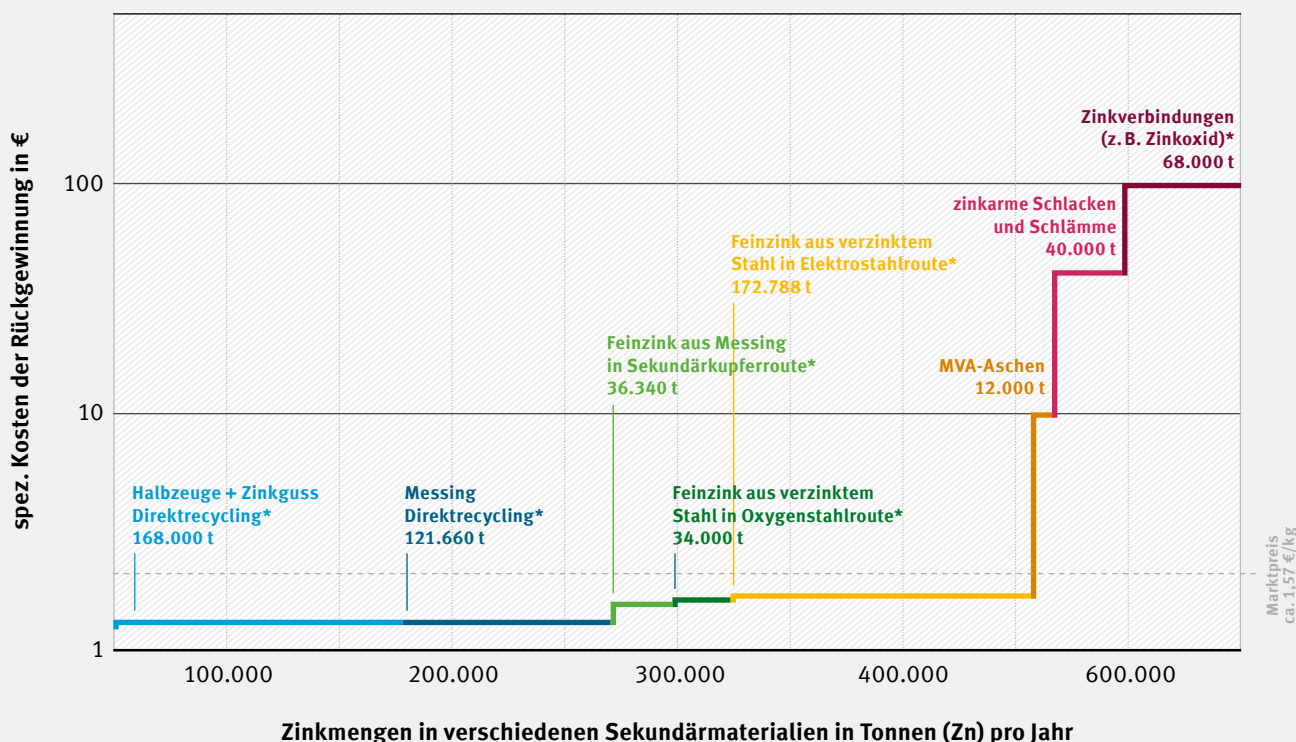
Das Recycling von Zink aus verzinktem Stahl ist ähnlich aufwendig wie das Recycling von Zink in der Sekundärkupferroute. Beim Stahlrecycling wird Zink in oxidiert Form in den Stahlwerksstäuben abgeschieden. Anschließend wird es pyrometallurgisch aufkonzentriert und später in der hydrometallurgischen Route elektrolytisch zu Feinzink reduziert.

Auch einige zinkhaltige Rückstände wie Aschen und Schlämme mit höheren Zinkgehalten können pyro- oder hydrometallurgisch direkt zu Zinkverbindungen verarbeitet werden.

42

Abbildung 18

Zinkmengen in ausgewählten, in Deutschland anfallenden, Sekundärmaterialien und deren mittlere Produktionskosten



Unabhängig von der gewählten Prozessroute liegen die Kosten für das Recycling von Zink- und Messingschrotten sowie zinkhaltigen Stahlwerksstäuben unter dem Marktpreis für Zink von ca. 1,57 Euro pro Kilogramm^a, was eine wirtschaftliche Aufbereitung dieser Sekundärmaterialien ermöglicht.

Hingegen sind zinkarme Aschen, Schlacken und Schlämme^b zu Teilen der Reservenbasis zuzuordnen, vor allem aber den anthropogenen Ressourcen. Zwar gilt für diese ein hoher Prospektionsgrad – die enthaltenen Zinkfrachten sind überwiegend bekannt oder können verlässlich abgeleitet werden – aber die technischen und wirtschaftlichen Restriktionen zur Rückgewinnung lassen ein Recycling überwiegend nicht zu.

So ist beispielsweise das Extrahieren von Zink aus MVA-Aschen zwar technisch möglich (z. B. FLUREC-Verfahren [68]), aufgrund der hohen Aufbereitungskosten derzeit aber nicht wirtschaftlich.

Auch ein Recycling von metallischem Zink aus Zinkverbindungen wie Zinkoxid ist in vielen Fällen aus energetischen Gründen oder aufgrund der dissipativen Verteilung (z. B. in Kosmetika, Pigmenten etc.) unwirtschaftlich. Hinzu kommt ein geringerer Prospektionsgrad, so dass es sich auch hierbei um relativ unbestimmte anthropogene Ressourcen handelt. Die Zinkfrachten liegen aber nicht nur weit unterhalb eines wirtschaftlichen Cut-off-Grades. Ein Recycling entbehrt auch einer ökologischen Motivation zur Ressourcenschonung, da eine erforderliche Aufkonzentration und Reduktion einen unverhältnismäßigen energetischen Aufwand erfordert.



Verzinkte Stahlbleche bieten einen guten Korrosionsschutz. Im Recycling muss das Zink ausgeschleust und aufkonzentriert werden. Innovative hydrometallurgische Verfahren lassen verbesserte Ausbeuten erwarten.

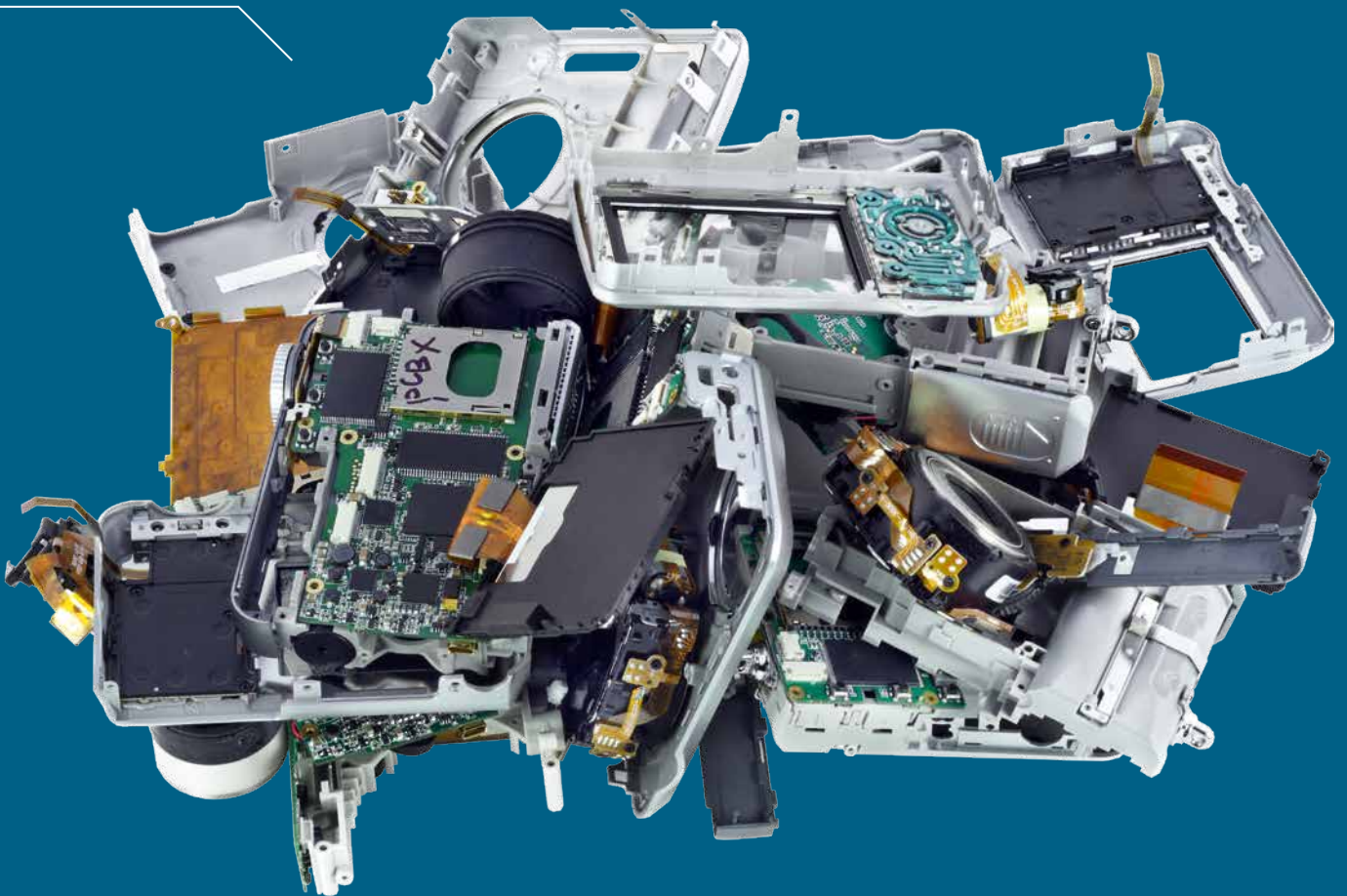
a Mittelwert von 2011 – 2016 (<http://www.finanzen.net/rohstoffe/zinkpreis>)

b z. B. Reststoffe aus der hydrometallurgischen Zinkraffination, Rückstände aus der Verarbeitung zinkhaltiger Stahlwerksstäube

04

STRATEGISCHE LEITFRAGEN

Wie lassen sich in der
Verwertung aus diesem
Elektronikschrott zukünftig
auch unedle kritische Roh-
stoffe zurückgewinnen?



Der Vergleich zwischen Urban Mining und dem konventionellen Bergbau hat bereits die Stärken des Urban Mining bei der Gewinnung von Sekundärrohstoffen und der Schonung von Primärressourcen vor Augen geführt. Es wurde aber auch deutlich, dass noch eine Vielzahl von Anforderungen erfüllt sein muss, damit Urban Mining sich den Herausforderungen einer nachhaltigen, ressourcenschonenden Entwicklung stellen kann. Um die Potenziale von Urban Mining strategisch zu entfalten, müssen im Wesentlichen fünf Leitfragen beantwortet werden:

- 1. Wo sind die Lager?**
- 2. Wie viel und welche Güter und Materialien sind enthalten?**
- 3. Wann werden die Lager für die Rohstoffgewinnung verfügbar?**
- 4. Wer ist an der Gewinnung beteiligt?**
- 5. Wie lassen sich Stoffkreisläufe effektiv schließen?**

Wo?

Die erste Frage zielt auf die Prospektion, also das Auffinden und die Identifikation von langlebigen Gütern und deren Lagern, ab. Ein Teil dieser Lager und Güter ist allgegenwärtig sichtbar, systematisch erfasst sind sie jedoch selten. In Gebäuden, Infrastrukturen, mobilen Gütern und Halden gilt es, die Teillager in genutzte und ungenutzte Lager sowie Ablagerungen zu untergliedern und zu differenzieren. Dafür sind systematische Erfassungsmethoden zu entwickeln, denn bislang sind unsere Güter nur stellvertretend bestens erfasst: über Finanzströme, solange sie einen positiven Marktwert besitzen. Für Urban Mining werden Güter aber gerade dann besonders interessant, wenn ihr Nutzwert in der Konsumsphäre gegen null tendiert, zu diesem Zeitpunkt hat

sich ihre Spur allerdings meist schon im Lager verloren, sind sie nur sehr schlecht inventarisiert und ihr Verbleib unbekannt.

Wie viel?

Sofern wir die Lager identifiziert haben, wissen wir noch längst nichts über deren genaue Beschaffenheit. Viele unserer Güter sind zu einem hohen Grad verarbeitet, sie haben eine Vielzahl von Veredlungs-, Bearbeitungs- und Umwandlungsprozessen hinter sich. Hinzu kommen technologische Entwicklungen, die innerhalb von kurzer Zeit zur Einführung neuer Materialien führen. Das Wissen, welche Wert- und Schadstoffe sich in wie großen Mengen in bestimmten Gütern befinden, verliert sich vielfach schon während der Produktion. Der Inhalt dieser Black Box muss bislang mühsam vom Ende der Wertschöpfungskette, wenn die Güter nach mehrjähriger Nutzung als Abfall anfallen, rekonstruiert werden. Hier gilt es, schon mit dem Materialeinsatz ein Stoffstrommanagement zu etablieren. Dabei ist der Marktwert von Gütern nur eingeschränkt als Indikator brauchbar. Wohl geht ein hoher Marktwert mit einer besseren Inventarisierung einher, aber er sagt eher wenig aus über die materielle Beschaffenheit oder gar den stofflichen Materialwert, die für Urban Mining von größerer Bedeutung sind. Ein Desktop-Computer beispielsweise aus den späten 90ern ist nirgendwo mehr verbucht, aber er weist einen deutlich höheren Materialwert auf, als einer von 2012.

Wann?

Die Frage, wann urbane Lager als Sekundärrohstoffquellen zur Verfügung stehen, ist für langlebige Güter ungleich schwieriger zu beantworten als für kurzlebige, aber für die Rohstoffwirtschaft ist genau das von großem Interesse. Die mittleren Lebens- und Nutzungsdauern variieren zwischen wenigen Jahren für Elektrogeräte,



^
 Perspektivwechsel:
 Sehen Sie noch
 Frankfurt am Main
 oder klassifizieren
 Sie schon mit den
 Augen eines Urban
 Miners die Lager
 und ermitteln Ma-
 terialbestände und
 Verweilzeiten?

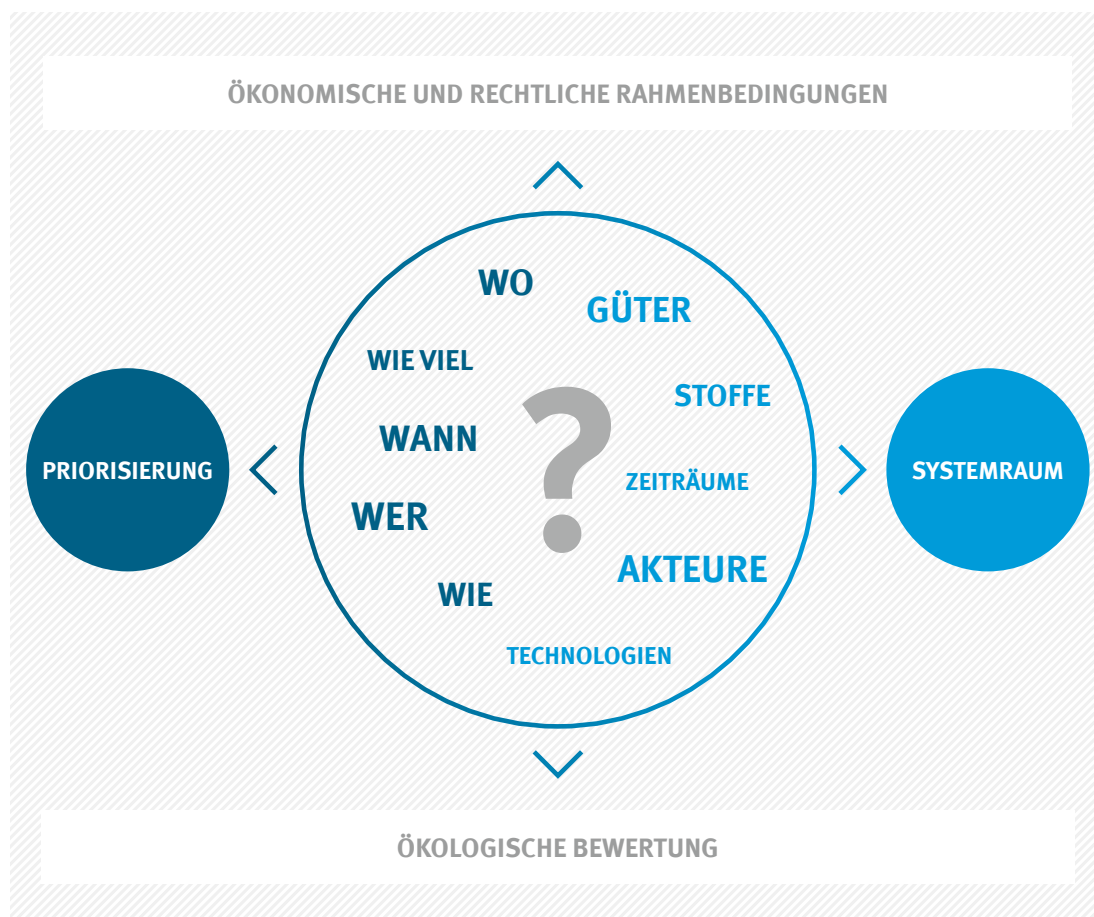
zehn bis 15 Jahren für Automobile und 30 bis 80 Jahren für Bauwerke. Hinzu kommen ganz unterschiedliche Verweilzeitverteilungen infolge unterschiedlicher Nutzungsformen, etwa einer Kaskadennutzung. Die Herausforderung besteht darin, diese Dynamik zu erfassen und zu verstehen, sowohl in Bezug auf derzeitige Lager als auch auf deren prospektiven Zuwachs.

Wer?

Ein Erschließen urbaner Lager mit dem Ziel eines hochwertigen funktionalen Recyclings mit geringstmöglichen Qualitätsminderungen erfordert ein Denken im Systemzusammenhang. Hierbei muss eine Vielzahl von Akteuren eingebunden werden. Von großer Bedeutung ist die Frage, in wessen Besitz sich die Güter eines Lagers befinden und wem diese im Zuge von Nutzungskaskaden oder am Ende des Lebenszyklus obliegen. Beteiligte Akteure entlang der Kette (z. B. Abfallerzeuger, Sammler, Händler, Verwerter, Aufbereiter, Produzenten) sind selten vertikal integriert und haben sehr unterschiedliche Interessenslagen und Anreizsysteme, anhand derer sie ihre Entscheidungen treffen.

Wie?

Das Erreichen einer räumlichen, stofflichen und zeitlichen Prognosegenauigkeit von Sekundärrohstoffquellen ist notwendig, aber nicht hinreichend, um Materialkreisläufe zu schließen. Bei der Rohstoffrückgewinnung müssen die Materialien möglichst in ihrer bisherigen Funktionalität in einem Materialkreislauf erhalten werden, Abflüsse in andere Materialkreisläufe und Ausscheiden als Abfall gilt es möglichst zu reduzieren. Um die Potenziale von Urban Mining im Endeffekt auch zu realisieren, müssen die technischen, logistischen und organisatorischen Voraussetzungen dafür erfüllt sein: Sind adäquate Aufbereitungstechniken zur Wertstoffanreicherung und Schadstoffentfrachtung vorhanden? Wurden Qualitätsanforderungen verbindlich geregelt und politische Rahmenbedingungen für hochwertige, ökologische Verwertungslösungen geschaffen? Hat eine Sensibilisierung der Nachfrager stattgefunden? Dies ist der Schlüssel für eine marktgerechte Vermittlung von Sekundärrohstoffen, für deren Transaktion eine hohe Verlässlichkeit hinsichtlich Menge, Qualität, Ort und Zeitpunkt gefordert ist.



05

Eine Erfolgsgröße im
Urban Mining: Die richtige
Trennung, Förderung und
Aufbereitung unterschiedli-
cher Materialfraktionen.



DEN WEG EBEN – AKTIVITÄTEN UND MASSNAHMEN



Auf verschiedenen Ebenen wurden bereits erste Schritte getan, um die fünf Leitfragen zu beantworten. So etwa konzeptionell mit der Kartierung des gesamten anthropogenen Lagers und auch im Detail für einzelne Gütergruppen und Materialien. Es wurde eine Vielzahl an Initiativen gestartet, um das Wissen über das anthropogene Lager zu erweitern und Handlungsgrundlagen zu schaffen, angefangen von Forschungsprojekten bis hin zu regionalen und sektoralen Urban Mining-Konzepten und wirtschaftlich tragfähigen Geschäftsmodellen.

Diese Einzelinitiativen und darin entwickelte Methoden können einen Leuchtturmeffekt haben und als Vorbild auf die Erschließung anderer Materialien im anthropogenen Lager wirken. Mit Urban Mining e. V. existiert bereits eine aktive Plattform für den Erfahrungsaustausch [70]. Um Urban Mining den Weg zu ebnen, sind Instrumente und Maßnahmen aus sehr verschiedenen Disziplinen erforderlich, die weiterentwickelt und in einen Zusammenhang gestellt werden müssen.

Forschung – die richtigen Akzente sind gesetzt

Die Forschung konzentriert sich zum einen auf die Massenströme. Mithilfe der Fördermaßnahme „r³ Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien“ des BMBF wurde eine Vielzahl an Projekten gefördert, die sich im Themencluster Urban Mining dem Recycling von versorgungskritischen Metallen und der Rückgewinnung von Rohstoffen aus Bauwerken und anthropogenen Ablagerungen widmen. Darunter waren mehrere Vorhaben (SMSB, REStrateGIS, ROBEHA) zur Erkundung von Bergbau und Hüttenhalden [71]. Allein im Harz, als einem der bedeutenden Erzreviere in Deutschland für Bunt- und Edelmetalle, existieren schätzungsweise mehr als 1.000 Halden.

Mithilfe von Fernerkundungsdaten, Vor-Ort-Beprobungen und geochemischer Analytik werden Haldenkataster entwickelt und die Wertstoffgehalte ermittelt. Neben Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, die abgelagerten Berge, Schlacken, Stäube, Schlämme oder auch Feuerfestmaterialien und Abraummassen wegen ihrer Metallgehalte in hydro- und pyrometallurgischen Prozessen zu verwerten, werden auch die juristischen Rahmenbedingungen zur Genehmigung derartiger Explorationen untersucht.

Auch die Prospektion in Siedlungsräumen wurde vorangetrieben. Ebenfalls in der Fördermaßnahme „r³“ finanziert, werden unter der Leitung der TU Darmstadt Wertstoffpotenziale von Industriebrachen und Gewerbegebäuden ermittelt (PRRIG). Dafür wurden im Rhein-Main-Gebiet Rohstoffinventare und -kennwerte empirisch erfasst und in Form eines Rohstoffkatasters abgelegt. Daneben wurden methodische Grundlagen und Instrumente entwickelt, mit denen in Zukunft gezielt Metalle aus dem Abbruch von Industrie- und Gewerbegebäuden zurückgewonnen werden können [71]. In Wien finden unter Leitung der TU Wien (Christian Doppler Labor für „Anthropogene Ressourcen“) ähnliche Entwicklungen statt, um die in Einzelobjekten enthaltenen Materialmengen zu erkunden [72]. Dabei werden aktuelle Abrissprojekte begleitet und sowohl Plandokumente berücksichtigt als auch die Gebäudeaufnahme durch Begehungen sowie die Daten von Abbruchfirmen.

Aber nicht nur die großen Massenströme stehen im Fokus. Die Verbesserung des Recyclings von Sondermetallen aus Elektro- und Elektronikaltgeräten (EAG) hatte sich das r³-Projekt UPgrade zum Ziel gesetzt, durchgeführt unter Leitung der TU Berlin, unter der Beteiligung der FH Münster und vieler weiterer Projektpartner. Dabei werden Wertstoffkataster für EAG erarbeitet und experi-

mentelle Stoffstromanalysen von ausgewählten Aufbereitungs- und Behandlungsprozessen entlang der Recyclingkette durchgeführt [71]. Darauf aufbauend sollten neue Anreicherungsverfahren entwickelt werden, die auf die bislang nur unzureichend rückgewonnenen Metalle wie Germanium, Tantal, Antimon oder Seltene Erden zielen. Ganz ähnliche Zielsetzungen wurden in den Ufoplan-Forschungsprojekten ReStra [59] und RePro [60] verfolgt. Mit einem produktspezifischen Vorgehen für Elektrogeräte sowie sonstigen Industriegütern wurde in diesen Vorhaben untersucht, welche Mengen ausgewählter kritischer Metalle 2020 als Abfall zu erwarten sind. Auf dieser Grundlage wurden Wege aufgezeigt, wie die abfallwirtschaftliche Produktverantwortung über die Sammlung, Behandlung und Verwertung der Abfallströme weiterentwickelt werden kann.

Konzeptioneller Natur sind etwa die systematische Forschungsserie zur Kartierung des gesamten anthropogenen Lagers – im Auftrag des Umweltbundesamtes – (s. Kasten) und das Forschungsverbundprojekt MINEA (Mining the European Anthroposphere) im Rahmen des paneuropäischen COST-Programms (European Cooperation in Science and Technology) [73]. Eine von fünf Kernaktivitäten des Projekts, an dem Fachleute aus über 20 Ländern mitwirken, besteht darin, bis 2019 einheitliche Klassifizierungen für anthropogene Lager zu entwickeln und eine Bewertung von europaweit angewandten Verfahren zur Wertstoffgewinnung aus Halden, Verbrennungsrückständen sowie dem Bauwerksbestand vorzunehmen.

Im Fokus – Erschließung und Aufbereitung von Baurestmassen

Baurestmassen stehen im besonderen Fokus des Urban Mining. Bei einem Anfall von jährlich ca. 200 Mio. Tonnen stellen diese mit rund 60 Prozent am Gesamtaufkommen die größte Abfallfraktion dar. Zu den Baurestmassen zählen im Wesentlichen Bauschutt, Straßenaufbruch, Baustellenabfälle sowie Boden und Steine. Die Verwertungsquoten über all diese Abfälle liegen mit ca. 90 Prozent derzeit sehr hoch. Nur ein sehr geringer Anteil wird deponiert, der Großteil wird auf andere Weise aufbereitet und verwendet. Aber bei einem genaueren Blick auf die Verwertungswege wird ersichtlich, dass eine tatsächliche Kreislaufführung kaum praktiziert wird. Von den jährlich anfallenden etwa

52 Mio. Tonnen an Bauschutt, überwiegend aus dem Hochbau, wird nur ein Bruchteil zu hochwertigen Betonzuschlagstoffen und anderen Baustoffen aufbereitet, die wieder im Hochbau eingesetzt werden. Hingegen gelangen ca. 30 Mio. Tonnen als Rezyklat in den Straßenbau. Aber auch dort nicht vorrangig in eng definierte Anwendungen als Frost- und Tragschichten. Der überwiegende Teil der aus Bauschutt gewonnenen Gesteinskörnung wird weniger hochwertig bodennah eingesetzt, wie beispielsweise im Landschafts- und Wegebau oder als Ausgleichsmaterial. Außerdem gelangt ein erheblicher Anteil des Bauschutts in die Verfüllung und Rekultivierung von Steinbrüchen, Kiesgruben, Tagebaurestlöchern und Bergehalden [78]. Für die Zukunft ist dies aus zwei Gründen problematisch.

1. *Die Baurestmassen werden deutlich ansteigen.* Angesichts der demografischen Entwicklung, anhaltender Abwanderung und Schrumpfung in vielen ostdeutschen, aber auch in einigen westdeutschen Kommunen und eines absehbaren Wandels der Wohnbedürfnisse der Bevölkerung in Deutschland werden Abbruch und Sanierung künftig zu signifikant höheren Bauschuttmengen führen. Im Gebäudebereich wird sich ein großer Wandel vollziehen. Derzeit entsteht auf drei Tonnen Materialeinsatz nur eine Tonne Abfall aus dem Hochbau. Bis 2050 zeichnet sich ab, dass deutschlandweit insgesamt eine weit größere Menge an Baustoffen, ca. das Anderthalbfache, aus dem Wohngebäudebestand abfließen, als neu in diesen eingebracht werden wird [79]. Langfristig wird damit der Gebäudebestand zur Rohstoffquelle.

2. *Die möglichen Verwertungswege ändern sich.* Es ist davon auszugehen, dass derzeit bevorzugte Verwertungswege regional, beispielsweise im Deponiebau und im Straßen- und Wegebau eine Sättigung erfahren werden. Deren Aufnahmekapazität wird zu einem limitierenden Faktor werden. Der bislang aus Kostengründen praktizierte Hocheinbau bei Ertüchtigungen von Verkehrswegen außerorts hat physikalische und technische Grenzen, so dass auch aus dem Tiefbau die Abbruchmassen zunehmen werden. Hinzu kommen bundeseinheitlich erhöhte ökologische Qualitätsanforderungen für Ersatzbaustoffe. Durch die Mantelverordnung (s. Kasten, S. 52) wird eine bisherige gesetzliche Regelungslücke geschlossen und Einsatzbereiche, z. B. im Landschafts- und Erdbau sowie bei Verfüllungen zum Schutz des Bodens und des Grundwassers

„Kartierung des anthropogenen Lagers“

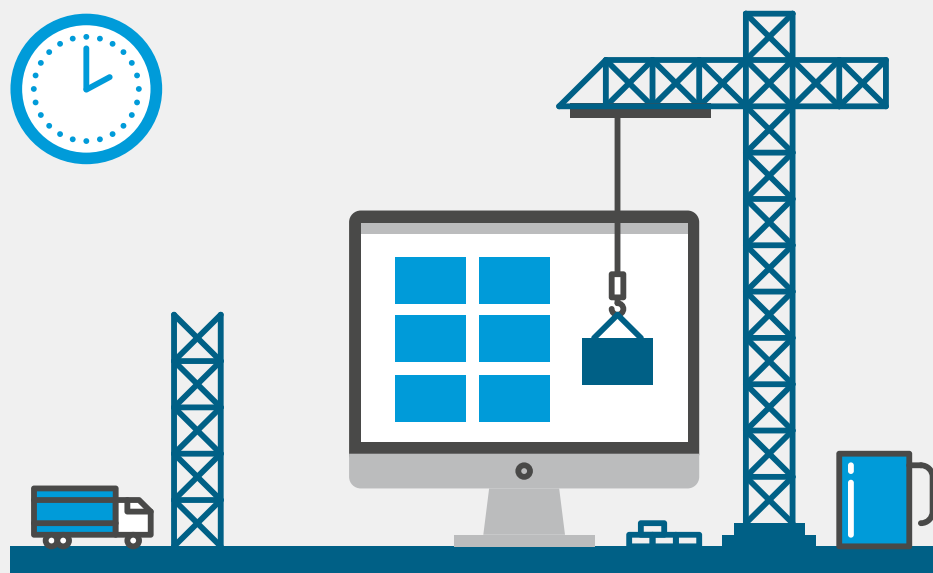
Die Forschungsserie „Kartierung des anthropogenen Lagers“ im Auftrag des Umweltbundesamtes verfolgt das Ziel, die Wissens- und Entscheidungsbasis für die Sekundärrohstoffwirtschaft systematisch zu verbessern, um ein Urban Mining aus langlebigen Gütern zu etablieren. Die Leitfragen lauten:

- › **Welche Anteile der jährlich neu eingebrachten Materialien und des Lagers insgesamt werden zukünftig als Sekundärrohstoffquelle zur Verfügung stehen?**
- › **Wann und in welcher räumlichen Verteilung wird dies voraussichtlich sein?**
- › **Sind die technischen, logistischen und rechtlichen Rahmenbedingungen adäquat für eine hochwertige Verwertung und besteht ein hinreichend großer Bedarf in den angestrebten Einsatzbereichen?**

Es wurde ein modularer Ansatz gewählt, der von der Zustandserfassung – des Status quo – über die Prognostik zukünftiger Entwicklungen bis hin zu Möglichkeiten des aktiven Stoffstrommanagements reichen wird. Bislang wurden eine systematische Einschätzung der Größe und Zusammensetzung des derzeitigen anthropogenen Rohstofflagers und eine Analyse von Datenquellen und Kenngrößen zur Erfassung der Dynamik vorgenommen [31, 74]. Sie sind die Arbeitsgrundlage für alle weiteren Aktivitäten.

Darauf aufbauend wurde ein fortschreibbares Bestandsmodell für die gesamte Bundesrepublik erarbeitet. Hierzu wurde ein System unter der Bezeichnung DyMAS (Dynamic Modeling of Anthropogenic Stocks) programmiert, das zur Szenarioanalyse auf Material- und Güterebene eingesetzt werden wird, um zu ermitteln, welche Anteile der jährlich neu eingebrachten Materialien und des Lagers zukünftig als Sekundärrohstoffquelle zur Verfügung stehen werden [75, 76]. Durch die angeschlossene Datenbank und ein standardisiertes Datenaustauschformat dient es als Wissensspeicher für Güter, Materialien, Inventare, Lebensdauern etc. Viele Daten und Informationen aus weiteren Projekten und Statistiken werden hier zusammengeführt und harmonisiert werden. Denn Urban Mining erfordert vor allem ein integratives Wissens- und Informationsmanagement.

Im nächsten Schritt wird das Softwaresystem für eine verlässliche Stoffstromprognostik zum Einsatz kommen. Flankiert durch weitere Projekte werden z. B. für mineralische Bau- und Abbruchabfälle sowie Basis- und Sondermetalle bestehende technische, informatorische, logistische, organisatorische und rechtliche Hemmnisse adressiert werden, die derzeit noch eine Verwertung erschweren oder ein Downcycling dieser Materialien begünstigen [77]. Im besonderen Fokus werden dabei auch selektive und hochsensitive Recyclingtechniken für komplexe Stoffverbünde stehen, die zukünftig – in der Anwendungsbreite etabliert – ganz neue Möglichkeiten zur qualitativen Schließung von Stoffkreisläufen eröffnen werden.



stärker reglementiert. In diesem Zusammenhang stellt der Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e. V. schon heute Entsorgungsengpässe und den Bedarf von zusätzlichem Deponieraum fest [80]. Damit die aus Baurestmassen zu gewinnenden Sekundärrohstoffe auch zukünftig verwertet werden und damit Primärrohstoffe und Deponieraum schonen können, müssen weitere anspruchsvolle Einsatzbereiche, insbesondere im Hochbau, erschlossen werden. Dies wird sehr wahrscheinlich zu einer geringfügigen Senkung der derzeit hohen Verwertungsquoten führen, denn zur Qualitätssicherung müssen größere Mengen an Schadstoffen und Feinkornfraktionen ausgeschleust werden, die bei bisheriger Verwertungspraxis nicht separiert worden sind.

Das Management der ansteigenden Baurestmassen und die Etablierung neuer, ressourcenschonender Verwertungswege, werden die beiden Aufgaben sein, vor denen Urban Mining steht. Zu ihrer Bewältigung können Ansätze zur Gütesicherung, zum Ausschleusen von Schadstoffen und zu Materialpässen, auf die im Folgenden näher eingegangen wird, wichtige Beiträge leisten.

Gütesicherte Recycling-Baustoffe

Aus Bauschutt können prinzipiell hochwertige Recyclinggesteinskörnungen gewonnen werden, die wieder im konstruktiven Bau als Betonzuschlag im Hoch- und Tiefbau eingesetzt werden können. Diese weisen analoge bautechnische Eigenschaften zu Kiesen und gebrochenen Natursteinen aus ihren natürlichen Quellen auf und können diese wertvollen Rohstoffvorkommen schonen. Durch hochwertiges Recycling mineralischer Bauabfälle ließen sich im Jahr 2020 in Deutschland ein Viertel der gesamten Gesteinskörnungen für Ortbeton, Betonfertigteile und Betonwaren im Hochbau – elf Mio. Tonnen – im Ergebnis eines hochwertigen Recyclings mineralischer Bauabfallstoffe direkt substituieren [81]. Und das bereits unter Berücksichtigung von regionalen Disparitäten, d. h. Mangel- und Überschussregionen. Denn Baustofflieferketten für Massenbaustoffe – ob aus Primär- oder Sekundärmaterial – rechnen sich wirtschaftlich nur in engen räumlichen Grenzen. Bis zum Jahr 2050, wenn sich eine abnehmende Bautätigkeit voraussichtlich in ganz Deutschland ausgeprägt haben wird, ließe sich aus dem Aufkommen

Mantelverordnung

Die Mantelverordnung (MantelV) sieht eine Harmonisierung der materiellen Maßstäbe des Wasser-, Bodenschutz- und Abfallrechts vor. Sie vereint eine novellierte Grundwasserverordnung (GrwV), eine novellierte Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV), eine novellierte Deponieverordnung (DepV) sowie eine neu zu schaffende Ersatzbaustoffverordnung (EBV). Mithilfe der MantelV sollen die Anforderungen an die Herstellung und den schadlosen Einsatz mineralischer Ersatzbaustoffe sowie das Auf- und Einbringen von Bodenmaterial bundes einheitlich, im Einklang mit den Anforderungen des Boden- und Grundwasserschutzes geregelt werden. Es soll gelingen, einerseits natürliche Ressourcen durch möglichst hohe Verwertungsquoten bei mineralischen Ersatzbaustoffen im Sinne einer Kreislaufwirtschaft zu schonen und andererseits Rechtssicherheit durch bundeseinheitliche Anforderungen beim Einbringen von Stoffen ins Grundwasser, bei Errichtung technischer Bauwerke und bei Verfüllungen zu schaffen. Dabei gilt eine Prämisse: Mensch und Umwelt, insbesondere Boden und Grundwasser, sollen bei der Verwendung mineralischer Ersatzbaustoffe vorsorglich vor Schadstoffen geschützt werden.

Die Regelung von Qualitätsmaßstäben und Einbauklassen in der MantelV hat erhebliche Auswirkungen auf Urban Mining und die Rahmenbedingungen für ein Stoffstrommanagement. In Hinblick auf die oben genannten fünf strategischen Leitfragen gehört die MantelV zu den ökonomisch-rechtlichen Rahmenbedingungen.

an Bauschutt durch eine geeignete Erfassung, Aufbereitung und Schadstoffentfrachtung das maximale technische Zuschlagspotenzial in Neubau und Sanierung heben.

Noch wird Recycling-Beton in Deutschland selten eingesetzt, obwohl in Normungswerken wie DIN 10945/EN 206-1 und DIN 4226-100/EN 12610 alle bautechnischen Grundlagen für einen verstärkten Rezyklateinsatz im Beton geregelt sind. Dabei steigt die Zahl der erfolgreichen Pilotprojekte, insbesondere in Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Berlin, teils wissenschaftlich durch die Brandenburgische Technische Universität Cottbus begleitet, stetig an [82]. Auch der Kanton Zürich stellt eine Modellregion dar, in der Pilotprojekte erfolgreich verlaufen sind. Doch in der Baupraxis zeigt sich ein anderes Bild. Für eine Aufbereitung von mineralischen Bauabfällen entsprechend ihrer technisch-physikalischen Eignung für hochwertige Anwendungen fehlt noch immer eine breite Akzeptanz und damit die Nachfrage seitens der Bauherren. Folglich werden im Abbruch und der Aufbereitung der logistische und technische Aufwand sehr gering gehalten und im Ergebnis überwiegend Recycling-Baustoffe bereitgestellt, die nur für einfache Anwendungen zugelassen sind [78]. Die Nachfrage steigern kann zweifelsfrei die öffentliche Hand auf allen Ebenen, denn sie ist der größte Bauherr der Bundesrepublik. Auch das Umweltbundesamt versucht seiner Vorbildfunktion im Bereich des nachhaltigen Bauens gerecht zu werden. So wird im UBA-Erweiterungsbau am Hauptsitz Dessau-Roßlau, dessen Fertigstellung für Ende 2017 geplant ist, neben anderen umweltverträglichen Baustoffen auch Recycling-Beton eingesetzt. Ein erster Schritt wurde mit der Anpassung der Beschaffungskriterien für Bundesbauten getan [83]. Nun muss noch eine neutrale Ausschreibungspraxis und ein Diskriminierungsverbot für den Einsatz mineralischer Rezyklate auf Länder- und kommunaler Ebene etabliert und praktiziert werden.

Um in weitaus größerem Umfang als bislang gütegesicherte mineralische Rezyklate zu erzeugen, muss allerdings schon früher angesetzt werden. Dies kann einerseits durch eine konsequente getrennte Erfassung von Bauschutt unterstützt werden. Das UBA setzte sich in diesem Zusammenhang dafür ein, dass eine Pflicht zur Getrennterfassung von Bau- und

Abbruchabfällen, beispielsweise für Dämmmaterialien, gipshaltige Abfälle, Keramik und Ziegel, im Rahmen der bevorstehenden Novelle in die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) aufgenommen wird. Aber um eine adäquate Störstoff- und Schadstoffentfrachtung, insbesondere von Sulfaten aus gipshaltigen Innenausbauten, zu erzielen, muss möglichst direkt bei Abrissmaßnahmen mit einem selektiven Rückbau angesetzt werden. Es konnte in ökobilanziell ausgewerteten Modellvorhaben gezeigt werden, dass eine vorherige Schadstoffentfrachtung durch selektive Vor-Ort-Maßnahmen die Umweltwirkungen bei der Gewinnung von rezyklierten Gesteinskörnungen aus Altbeton reduzieren können. So können nicht nur energieintensive und ggf. abwasserlastige nachfolgende Sortierprozesse eingespart werden, sondern höchste Gütekriterien überhaupt erst erfüllt werden [84].

In der Aufbereitung eröffnen sich mittlerweile auch ganz neue technologische Möglichkeiten des Aufspürens und der Nutzung, die für das Urban Mining sehr bedeutsam werden. Die sortenreine Trennung, Sortierung und Homogenisierung der einzelnen Bauschuttfraktionen wie Betone, Ziegel, Kalksandstein oder Porenbeton ist ungeachtet des selektiven Rückbaus technisch sehr anspruchsvoll und erfordert Verfahren wie die Nahinfrarottechnik zur Detektion – bislang vor allem im Kunststoff- und Papierrecycling eingesetzt. Doch das werkstoffliche Recycling muss nicht die einzige Verwertungsstrategie darstellen. Eine andere aussichtsreiche Option stellt die rohstoffliche Nutzung des Abbruchmaterials dar, bei der gänzlich neue Materialien erzeugt werden, die passgenau für weitere hochwertige Anwendungen sind. Dank der langjährigen Forschungsarbeiten an der Bauhaus-Universität Weimar können vielseitige Leichtgranulate aus Mauerwerkbruch erzeugt werden [85]. Mauerwerkbruch, der in Deutschland mit ca. zehn Mio. Tonnen pro Jahr anfällt, gilt bislang aufgrund seiner Heterogenität und des hohen Feinkornanteils in der Aufbereitung als schwer verwertbar. Das neue Recyclingprodukt baut auf der chemisch-physikalischen, sehr vielfältigen Zusammensetzung des Mauerwerkbruchs auf. Dieser wird klassiert, gemahlen und – mit einem Blähmittel versetzt – thermisch erhärtet. Die erzeugten Leichtgranulate können die gleichen Eigenschaften erfüllen wie Blähtone aus Primärrohstoffen und tragen auf diese Weise unmittelbar

zur Ressourcenschonung bei. Sie können hochwertig im Stahl- und Konstruktionsleichtbeton sowie für Leichtbetonblöcke eingesetzt werden [86].

Schadstoffe ausschleusen

Ein intelligentes Zusammenspiel aus selektivem Rückbau, Getrennthaltung der Baurestmassen und modernen Aufbereitungstechniken ist zukünftig unerlässlich für hochwertige Recyclingprodukte durch Urban Mining. Dabei sind die Gewinnung von Wertstoffen und das Ausschleusen von Schadstoffen gleichermaßen von Bedeutung, um Gefahren für Mensch und

Umwelt zu vermeiden. Mithilfe einer fachgerechten Schadstofferkundung in Bauwerken können schadstoffhaltige Fraktionen bei Abbrucharbeiten ausgeschleust und später sachgerecht beseitigt werden. Eine Anreicherung von umwelt- und gesundheitsgefährdenden Stoffen in Rezyklaten kann so weitestgehend verhindert werden.

Schadstoffe finden sich nolens volens in vielen Bauprodukten wieder, z. B. in Bodenbelägen, Putzen, Dichtungsbahnen, Holzverkleidungen, Rohrleitungen, Wärmedämmungen oder Anstrichfarben (s. Tabelle 2, S. 57). Vielfach sind es Altlasten, die der Baupraxis im Laufe des 20. Jahrhunderts entsprachen und die

Material für neue, hochwertige Recyclingprodukte: Aus schwerverwertbarem Mauerwerkbruch lassen sich Leichtgranulate für zahlreiche neue Anwendungen erzeugen.



mittlerweile verboten sind, oder zumindest nicht mehr eingesetzt werden. So z. B. Bleirohre in der Trinkwasserversorgung, stark mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) belastete Dachbahnen aus Steinkohleteerölen, PCB-haltige Fugenmassen, Asbest in Bodenplatten, Arsen und Cadmium als Rostschutz, Pigment oder Stabilisator in Anstrichen, Lacken und Kunststoffen, schwermetallhaltige Schlacken in Betonen, kanzerogene kurzfasrige künstliche Mineralfasern in der Wärmedämmung, PCP- und/oder Lindan-haltige Insektizide als Holzschutzmittel [87].

Viele dieser Stoffe wurden ganz gezielt eingesetzt um z. B. unmittelbare Gefahren im Brandfall abzuwehren. Mit Bekanntwerden und folgenden Grenzwerten und Stoffverboten konnte zwar die weitere Anreicherung im anthropogenen Bauwerkslager verlangsamt oder gar gestoppt werden. Doch durch die langen Standzeiten von Gebäuden liegt vieles noch immer im Bauwerksbestand vor.

Beim Abbruch muss belastetes Material teils als gefährlicher Abfall eingestuft werden und unterliegt damit den besonderen Dokumentations-, Transport- und Behandlungsaufgaben gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Altlasten sind folglich auch Teil des Vermächtnisses im anthropogenen Lager, mit dem wir zukünftig sehr sorgsam umgehen müssen.

Allerdings kommen auch neue stoffliche Problematiken hinzu, wie etwa Biozide und persistente organische Schadstoffe. Gegen biologischen Abbau, Fraß, Bewuchs oder Verwitterung werden auch heute noch in großem Maßstab ganz bewusst Stoffe wie Biozide eingesetzt. Dabei lassen sich immer wieder Risiken für Mensch und Umwelt erst nach mehrjährigem Einsatz dieser Stoffe erkennen. Mit der Einführung des europäischen Zulassungsverfahrens für Biozidprodukte (BiozidV) wird eine Verbesserung angestrebt.

Auch bei langlebigen organischen Schadstoffen wird davon ausgegangen, dass schädliche Effekte eintreten oder wahrscheinlich sind. Im Bemühen um Energieeinsparmaßnahmen im Gebäudebereich fanden seit bald 40 Jahren zunehmend intensivere energetische Sanierungsmaßnahmen im Gebäudebestand statt. Unter den Dämmstoffen haben mineralölbasierte Dämmstoffe einen deut-

lichen Zuwachs erfahren. Fast 300.000 Tonnen Polystyrol-basierte (XPS und EPS) Dämmstoffe werden jährlich verbaut. Um die hohen Flamm-schutzanforderungen an Fassaden und Dächern zu erfüllen, wurde in PS-basierten Dämmstoffen über Jahrzehnte das Flammenschutzmittel HBCD (Hexabromcyclododecan) eingesetzt. Seit 2013 wird dieses in der Stockholm Konvention, einem internationalen Übereinkommen zur Beendigung oder Einschränkung der Produktion, Verwendung und Freisetzung organischer Schadstoffe, als persistenter, also in der Umwelt schwer abbaubarer, und bioakkumulierender organischer Schadstoff (POP) geführt. Wegen dieser Eigenschaften wird HBCD auch als „besonders besorgniserregender Stoff“ nach den Kriterien der Europäischen Chemikalienverordnung REACH eingestuft. Infolgedessen wurden nun – seit März 2016 ist das HBCD-Verbot in Kraft getreten, mit einigen Ausnahmen für bestimmte EPS-Dämmstoffe bis Februar 2018 – umweltverträglichere Flammenschutzmittel eingeführt [88]. Für die Verwertung der Dämmstoffe, die in großen Mengen erst in den kommenden Jahrzehnten anfallen werden, heißt das: HBCD muss in jedem Fall ausgeschleust werden. Konventionell ist dies nur mit einer thermischen Behandlung, z. B. der Verwertung in einer MVA möglich, bei der HBCD komplett zersetzt und das enthaltene Brom in unproblematischeren Salzen abgeschieden wird. Die MVA-Betreiber müssen dazu jedoch über eine Genehmigung zur Behandlung gefährlicher Abfälle verfügen, die viele noch nicht haben.

Aber auch ein Recycling ist zukünftig noch nicht gänzlich ausgeschlossen. Beim sogenannten „CreaSolv“-Verfahren werden die Polystyrole mit einem Lösemittel verflüssigt. Anschließend lassen sich Additive wie Flammenschutzmittel vom Polystyrol trennen, das dann wieder zur Produktion von Wärmedämmverbundsystemen eingesetzt werden kann [89].

Das Ausschleusen von HBCD betrifft styrolbasierte Dämmstoffe, die bis 2015 eingebaut worden sind. Doch diese sind von neueren Wärmedämmverbünden nur durch eine gesonderte Analytik zu unterscheiden und eine getrennte Erfassung ist logistisch nur schwer darstellbar. Für andere Dämmstoffe wie künstliche Mineralfasern und viele weitere Bauprodukte wie behandeltem Bauholz gibt es ähnliche Hemmnisse zum Recycling: Abfälle bestimmter Baualtersklassen oder



^
Wärmedämmverbundsysteme sind effektiv, um Heizkosten und damit den Ausstoß klimaschädlicher Gase zu senken. Bei deren schadlosen Entsorgung greifen allerdings besondere Anforderungen.

Einbauweisen können Kontaminationen enthalten. Da in der Abbruchpraxis in der Regel keine Informationen über die genaue Herkunft und Rezeptur vorliegen, liegt es für diese heizwertreichen Abfallströme nah, die energetische Verwertung oder Beseitigung zu wählen [90].

Materialpässe als zeitlose Informationsquelle

Ein vorausschauendes, geeignetes Instrument zum Urban Mining stellen Materialpässe dar. Denn um zukünftig ein hochwertiges Recycling zu unterstützen, müssen die notwendigen Daten und Informationen zu Bauwerken vorliegen, bevor ein Umbau, Rückbau oder der Abriss ansteht. Ein Gebäudepass, der neben dem Energieausweis auch einen Materialpass enthält, kann hierfür für Einzelobjekte ein geeignetes Instrument sein.

Erforderlich ist eine Bauwerksdokumentation, die über den Lebenszyklus eines Bauwerks dessen Materialinventar strukturiert erfasst. Ganz wesentlich sind dafür einerseits die eingesetzten Baustoffe, sowohl deren Mengen, deren Qualitäten als auch deren Verortung im Bauwerk. Unter der Maßgabe einer recyclinggerechten Konstruktion ist eine Dokumentation der Einbauweisen ebenso wichtig. Diese sollte idealerweise auch Techniken zum Trennen und selektiven Rückbau, beispielsweise bei verschraubten Wärmedämmverbundsystemen, sowie zu Recyclinganforderungen nach Stand der

Technik zum Zeitpunkt des Einbaus enthalten. Bereits beim Planen und Bauen selbst wird mithin festgelegt, inwieweit die Materialien Jahrzehnte später wieder recycelt werden können. Doch schon darin liegt ein Problem, denn die klassische Bauplanung erlaubt keine vollständige Dokumentation der materiellen Information. Durch eine integrale Planung könnte die Information der einzelnen Ausführungseinheiten (Bauherr, Planer, Bauunternehmen etc.) zusammengeführt werden [87].

Aber Gebäude können sich im Laufe der Nutzungsdauer durch Sanierungen, An- und Umbauten sowie Erneuerung der Haustechnik deutlich verändern. Eine Fortschreibung des Materialpasses ist eine wichtige Anforderung, um auch bei Eigentümerwechseln im Laufe des Gebäudelebenszyklus Kontinuität zu wahren.

Die Idee eines Materialpasses ist keineswegs neu. Schon seit ca. 15 Jahren dienen sogenannte Gebäudepässe der Bestandsdokumentation von Bundesbauten. Sie beinhalten in konzentrierter Form wichtige Gebäudekenndaten und Betriebsanweisungen sowie eine Dokumentation der Bauwerksgeschichte, die für den Umbau und Rückbau von Bedeutung sind [91]. Für private und gewerbliche Bauherren und Eigentümer bestehen solche Dokumentationsanreize bislang kaum [92]. Und eine nachträgliche Aufnahme von Bestandsgebäuden ist mit einem erheblichen Aufwand und Einzelbegehungen verbunden, die allenfalls zum Zeitpunkt eines Umbaus oder erforderlichen Abrisses erfolgen.

Die flächendeckende Anwendung von Materialpässen könnte langfristig einen systemischen Nutzen entfalten. Würden von nun an alle Neubauten mit einem Materialpass dokumentiert werden, wäre 2050 schon fast ein Viertel aller Wohngebäude kartiert. Durch Anwendung von Materialpässen auf technische Bauwerke und Infrastrukturen ließen sich ganze Quartiere in Materialkatastern abbilden. Eine elektronische Verwaltung der Materialpässe ermöglichte eine Auswertung sehr differenzierter Gebäude- und Bauwerkstypologien sowie deren Baualtersklassen. Rückbauerfahrungen und Praktiken ließen sich genauso zuordnen wie neue Recyclingtechnologien für die enthaltenen Stoffverbünde. Neue Skaleneffekte und Erfahrungskurvengewinne im Rückbau und der Sekundärrohstoffwirtschaft

Tabelle 2

Schadstoffe in Baustoffen

Schadstoff	Vorkommen
Formaldehyd	Spanplatten, Möbel, Fenster, Lacke, Tapeten und Kleber
Pentachlorphenol (PCP), Lindan	Holzschutzmittel, Fugen-, Spachtel- und Vergussmassen, Anstrichstoffe und Reiniger
Asbest	Brand-, Wärme-, Hitze-, Schall- und Feuchtigkeitsschutz (hauptsächlich in Gebäuden von 1950 – 1980)
Künstliche Mineralfasern (KMF)	Wärmedämmung, Trittschall an Böden, Schallschlucker an Wänden, Füllung in Putzen, Türen, Heiz- und Installationsleitungen, Leichtbauwände
Polychlorierte Biphenyle (PCB)	dauerelastische Fugenmassen, Kabelummantelungen, Vergusspachtelmassen, Lacke, Farben, Kühl-Isolierflüssigkeit in Transformatoren, Kondensatoren, Leuchtstofflampen
Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	Steinkohlenteer, Pech- und Teeröl, Fußbodenplatten und Kleber, Dichtungen, Dachbahnen, Verguss- und Spachtelmassen, Lacke
Schwermetalle Zink, Blei, Nickel, Cadmium, Kupfer u. a.	Ablagerungen in industriellen Betrieben, im Boden sowie Austrag ins Grundwasser

wären möglich. Für die Bauwirtschaft, Kommunen und Händler ließen sich regionalisiert Aufkommensmengen an wiederverwendbaren Bauteilen und Potenziale an Recycling-Baustoffen absehen.

Nicht zuletzt könnte durch die Pflege elektronischer Materialpässe die ökologische Bewertung der Leistung von Bauwerken deutlich verbessert werden. Einerseits ließen sich die Ressourceninanspruchnahmen aller eingesetzten Bauprodukte – auch für Umbau- und Sanierungszyklen – erfassen. Andererseits aber auch die in Bauproduktökobilanzen nur unvollständig abgebildeten Verwertungseffekte mit realistischen Verwertungsszenarien ergänzen.

Recyclingeffizienz erhöhen – Downcycling verhindern

Der Erfolg der Kreislaufwirtschaft bemisst sich an der Fähigkeit, die Abflüsse aus einem Materialkreislauf in andere Materialkreisläufe zu reduzieren und das Ausscheiden von Materialien als Abfälle in letzte Senken oder teils dissipative Emissionen zu reduzieren [50].

Als strategischer Ansatz des Stoffstrommanagements kann Urban Mining durch intelligente Logistik und Technik dazu beitragen, die Poten-

ziale der Kreislaufwirtschaft zu nutzen.

Eine Materialgruppe für die zunächst keine größeren Herausforderungen im Urban Mining vermutet werden müssen, sind die Basismetalle wie Stahl, Kupfer und Aluminium. Da diese überwiegend in ihrer metallischen Form verwendet werden, sind sie theoretisch unbegrenzt und ohne Qualitätsverlust durch Schmelzprozesse rohstofflich recycelbar. Das unterscheidet sie maßgeblich von molekular genutzten Materialien wie Kunststoffen, Papier und holzbasierten Werkstoffen. Die meisten Kunststoffe altern durch den Einfluss von Licht und Chemikalien in der Gebrauchsphase. Sie sind empfindlich bei Verunreinigungen und Vermischungen im Recycling. Schon das Erhitzen beim Wiederaufschmelzen von thermoplastischen Kunststoffen kann ein Problem für ein werkstoffliches Recycling ohne Qualitätseinbußen darstellen. Pflanzenfasern wie in Papier und Textilien erfahren im Recycling eine Verkürzung der Faserlängen, die zu Funktionalitätsverlusten führt. Mineralische und keramische Werkstoffe, aber auch Holz sind für ein Recycling auf gleichem Qualitätsniveau schwierig, da sie formgebunden und nicht umformbar sind [93]. Sie werden daher mit der technischen Verwertung soweit verändert, dass sie in der Regel eine Kaskadennutzung durchlaufen. Damit einher geht ein Downcycling.

Begünstigend kommt für Metalle der hohe Marktwert hinzu. Der Anreiz, diese möglichst vollständig zurückzugewinnen, ist dementsprechend groß. So groß, dass Urban Mining sogar teilweise schon vorweggenommen wird. Metallediebstähle, nicht nur auf Schrottplätzen, sondern aus noch verwendeten Gütern, stellen ein ernstes Problem dar. Dabei haben es Diebe vor allem auf Kupfer abgesehen – ganz gleich ob rein, oder als Messing und Bronze. Signal- und Oberleitungskabel von Bahntrassen, Telefonleitungen, Heizungs- und Sanitäranlagen in teils leerstehenden Wohngebäuden, Regenfallrohre an Bauten bis hin zu Kunstobjekten und Gedenktafeln in Innenstädten.

In legalen Entsorgungsketten werden Metallschrotte in der Regel effektiv erfasst, sortiert, aufbereitet und wiedereingesetzt. Die Altschrott-Recycling-Quoten von Eisen, Kupfer und Aluminium zählen mit 50 bis 90 Prozent im weltweiten Durchschnitt zu den höchsten aller Metalle [58]. Altschrott-Recycling-Quoten werden als Produkt der Erfassungs-, Vorbehandlungs-, Sortier- und Aufbereitungseffizienz ermittelt. Verluste zu Beginn dieser Kette pflanzen sich also bis zum Ende fort. Auch wenn die Gesamteffizienzen im Recycling in einigen Produktgruppen wie Altfahrzeugen und Elektroschrott noch deutlich gesteigert werden könnten – Defizite liegen insbesondere in der Sammlung und Behandlung [94] – besteht für diese Metalle kein vorrangig quantitatives Verwertungsproblem.

Die eigentliche Herausforderung ist qualitativer Natur (s. Abbildung 19), denn Metalle werden selten in ihrer Reinform eingesetzt – meist sind sie legiert. Durch die Zugabe von bestimmten Legierungselementen werden die Eigenschaften ganz gezielt auf den späteren Anwendungsbereich eingestellt. Rund 100 Aluminiumsorten sind

gebräuchlich. Bei Stahl sind es mehr als 2.000. Neben den Legierungen werden verschiedene Metalle auch durch Oberflächenbeschichtungen zusammengebracht. Oberflächen aus Zinn, Zink, Nickel, Chrom und Kupfer dienen dabei insbesondere dem Korrosionsschutz.

Am Ende der Produktlebenszyklen fallen Altschrotte in ebenjener Form und Vielfalt an. Um nun wieder alle funktionellen Eigenschaften der enthaltenen Metalle zurückzuerlangen, müssten einerseits Legierungen sortenrein erfasst und aufbereitet werden. Beschichtete Metallverbünde wären hingegen in hoher Reinheit wieder voneinander zu trennen.

Unabhängig von den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen bemisst sich der Aufwand für Trennverfahren anhand der physikalisch-chemischen Eigenschaften der Metalle. Je ähnlicher diese für gewünschte oder tolerierte und ungewollte Begleitstoffe sind, desto komplexer und energieintensiver ist eine Trennung. Die Ressourcenschonungseffekte werden dementsprechend geringer oder kehren sich sogar in das Gegenteil um. In diesem Zusammenhang spricht man auch von thermodynamischen Grenzen [97, 98].

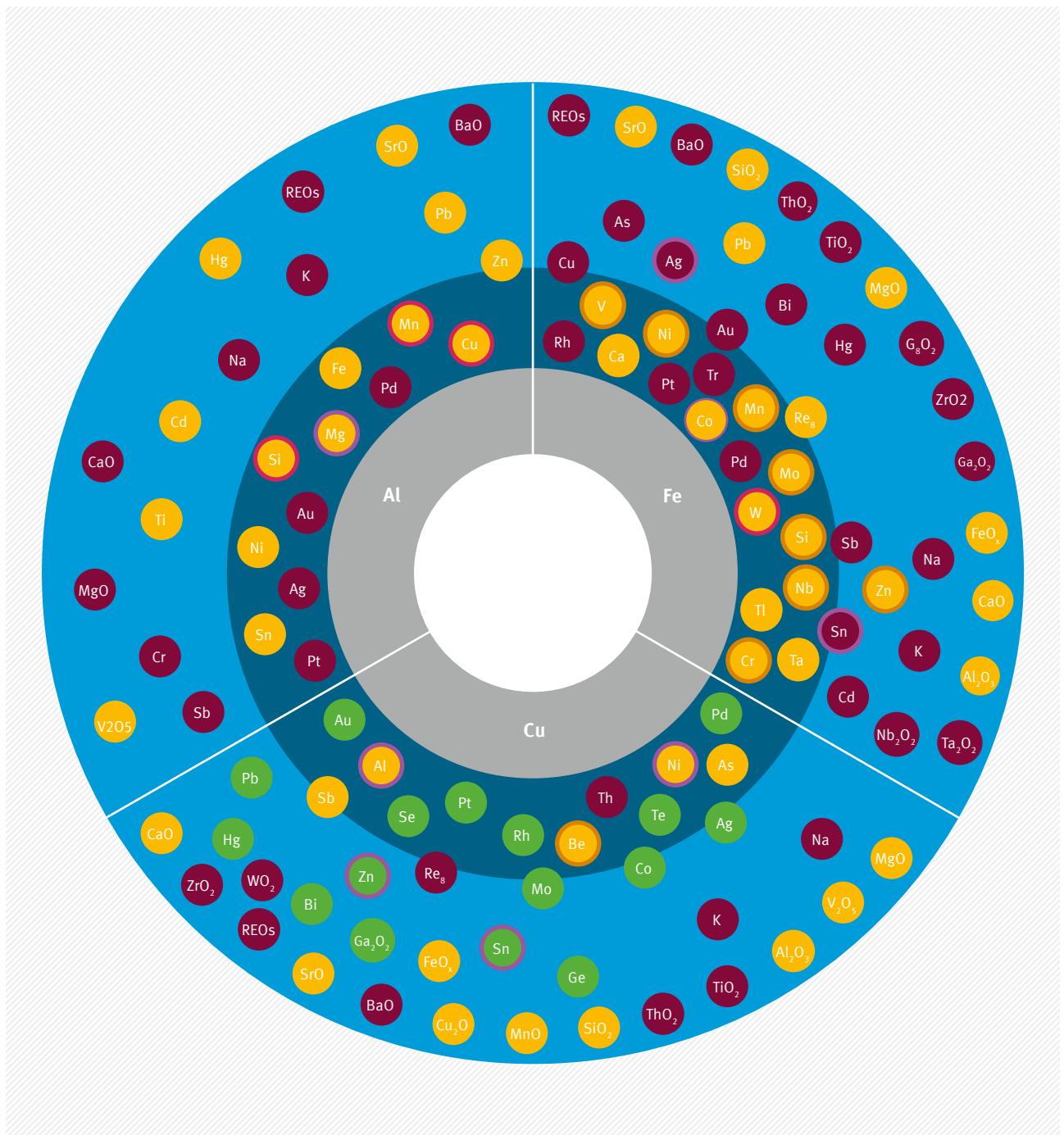
Nicht zuletzt äußert sich dies in der Wirtschaftlichkeit der Verfahren. Aufgrund seiner verhältnismäßig geringen Schmelztemperaturen findet Aluminiumrecycling lediglich durch relativ unselektive Schmelzverfahren statt, während das Recycling von Kupfer mithilfe elektrolytischer Verfahren bis hin zum hochreinen Kathodenkupfer mit einer Reinheit von mindestens 99,99 Prozent erfolgt.

Je nach Prozessführung werden insbesondere unedle, reaktive Metalle wie Zink, Magnesium, Seltene Erden, Titan und Chrom in metallurgischen Recyclingprozessen in Schlacken, Schlämme oder Abluftstäube überführt. Dies gelingt gut im Stahlrecycling in Elektrolichtbogen- und Sauerstoffblasstahlöfen. Eine Rückgewinnung der diffus ausgeschleusten Metalle aus Schlacken, Stäuben oder Schlämmen ist aber vor allem wirtschaftlich nur begrenzt darstellbar. Werden Rückgewinnungsverfahren angewandt, so verbleiben auch nach Stand der Technik nennenswerte Frachten der Metalle in den Schlacken, wo sie eine Kontamination darstellen, die



Abbildung 19

Downcycling als Herausforderung in der Metallurgie



59

Legierungselemente in Produkten aus Aluminium, Eisen und Kupfer



Hauptlegierungselement (Mehr als 50 % der Weltproduktion der Metalle werden im jeweiligen Trägermetall legiert)



Häufiges Legierungselement (10 – 50 % der Weltproduktion der Metalle werden im jeweiligen Trägermetall legiert)



Seltene Legierungselement (Weniger als 10 % der Weltproduktion der Metalle werden im jeweiligen Trägermetall legiert)

Metallurgie in Recyclinganlagen für Aluminium, Eisen und Kupfer



geht verloren



wird in Legierung oder Oxidprodukt zurückgewonnen



wird elementar zurückgewonnen



Hauptrecyclingprodukt (Trägermetall)



in Metallphase des Trägermetalls gelöst



in Schlacken, Schlämmen, Stäuben



^
Objekt der Begierde: Aufgrund des hohen Marktwertes verschwinden Kupferleitungen selbst aus genutzten Lagern.

die Nutzungsmöglichkeiten als Ersatzbaustoff einschränken können. Doch unabhängig von der werkstofflichen Nutzung von Schlacken oder deren Deponierung gehen die enthaltenen Metalle funktional verloren. So lassen sich beispielsweise auch in hochgradig spezialisierten Recycling-Wälzprozessen nur 84 Prozent der Zinkfrachten aus zinkhaltigen Abfällen wiedergewinnen. Im Idealfall 95 Prozent [99].

Andere Metalle wiederum, lassen sich bei großtechnisch realisierter Prozessführung in Schmelzen nicht separieren. Bei Stahl und Aluminium ist derzeit beispielsweise keine wirtschaftlich und großtechnisch darstellbare Technik etabliert, mit der Verunreinigungen durch Kupfer und Zinn aus den Schmelzen wieder entfernt werden könnten [93]. Dies hat zur Folge, dass sie zwar in einem Materialkreislauf geführt werden, aber

ihre ursprüngliche Funktionalität einbüßen. Man spricht hierbei von einem Downcycling, d. h. einem qualitätsgeminderten Recycling. Zwei Aspekte sind dabei problematisch.

1. Verlust von Sekundärrohstoffen

Gehen Frachten an besonders ressourcenintensiven Legierungselementen wie Nickel, Cobalt, und Molybdän in niedriglegierten Stahlschmelzen verloren, so müssen für hochlegierte Edelstähle umso mehr Primärmaterialien eingesetzt werden. Über die Metalle Kupfer und Zinn hinaus gehen auch Edelmetalle wie Gold aus Elektroschrotten unwiederbringlich verloren, wenn sie einmal in den großen Stahlpool gelangt sind [100].

2. Kontamination

Die eingetragenen Metalle können sich über mehrere Materialkreisläufe soweit anreichern, dass sie die Eigenschaften und Qualität des Hauptträgermetalls mindern. Um dies zu verhindern, werden im Zuge des Recyclings Primärrohstoffe hinzugesetzt, um einen ausreichenden Verdünnungseffekt zu erzielen.

In den vergangenen wachstumsstarken Jahrzehnten hat die weltweite Metallnachfrage das Schrottaufkommen weit überschritten. Im weltweiten Durchschnitt werden derzeit lediglich 20 bis 50 Prozent der Eisen- und Nichteisenmetalle aus Schrotten gewonnen. Darunter nicht

Der Beitrag zur Ressourcenschonung durch das Metallrecycling wird von der Art und Hochwertigkeit der Verwertung bestimmt. So sind z. B. zur Produktion einer Tonne hochreinen Kupfers von der Gewinnung über die Veredelung, Raffination und Elektrolyse ca. 196 Tonnen Primärrohstoffe erforderlich, die der Natur entnommen werden – darunter Kupfererze, Kieselerde, Kalkstein und Erdöl. Wird Kupferschrott nun wieder zu einem Kupferrohmaterial aufbereitet, das dieses hochreine Kupfer ersetzen kann, so erfordert dies lediglich neun Tonnen neue Rohstoffe, insbesondere für Energieträger zur Schrottsammlung, Sortierung, Aufbereitung und Schmelze. Idealerweise werden beim Recycling einer Tonne Kupferschrott also 187 Tonnen Primärrohstoffe eingespart. Geht hingegen ein Kupferstoffstrom, beispielsweise über Shredderfraktionen, im Stahlrecycling auf, so verliert das Kupfer dort nicht nur seine funktionalen, physikalischen Eigenschaften und mindert als Kontamination die Qualität des Elektrostahls. Auch der erzielte Effekt zur Primärrohstoffsubstitution ist bei diesem sogenannten Downcycling ungleich geringer, denn die Herstellung einer Tonne Hochofenstahl als Vergleichsprodukt erfordert lediglich 6,7 Tonnen Primärrohstoffe.

selten mehr als die Hälfte aus Neuschrotten und Kreislaufmaterial, d. h. Material, das unmittelbar noch in Produktionsprozessen anfällt, so dass der tatsächliche Anteil an Altschrotten noch geringer ist [58]. Aufgrund der starken Nachfrage nach wenig anspruchsvollen Baustählen und legiertem Gussaluminium, das insbesondere im Transportwesen für Fahrzeuge und Motoren benötigt wird, ist die Problemwahrnehmung einer schleichenden Qualitätsminderung im Angebot an Recyclingmaterial im weltweiten Maßstab noch immer gering. Derzeit werden niedriglegierte Stahlsorten und solche mit besonderen Anforderungen an die Legierungsgehalte weiterhin und überwiegend aus Primärrohstoffen erzeugt. Oder aber wie im Aluminiumrecycling durch Primärmaterial so weit verdünnt, dass hochwertige Knetlegierungsspezifikationen erreicht werden.

Die Praxis des Downcyclings kann zukünftig erhebliche negative ökologische Rückkopplungen verursachen. Durch Sättigungseffekte auf den Wachstumsmärkten und einem gesteigerten Aufkommen an Schrotten aus dem anthropogenen Lager sind Situationen absehbar, bei denen sich ein Schrottüberangebot niedriger Qualitäten ausprägt. Es wird dann mehr Schrott vorhanden sein, als dieser unter Berücksichtigung der notwendigen Verdünnung mit Primärmaterial nachgefragt wird. Für legierte Aluminiumgusschrotte aus dem Transportwesen ist dies bereits ab 2018 absehbar. Bis 2050 könnte sich der Überschuss auf jährlich bis zu 18 Mio. Tonnen weltweit steigern. Die entgangenen Stromenergieeinsparungen aus dem funktionalen Recycling dieses Aluminiumgusschrottes könnten dann bis zu 240 Terawattstunden pro Jahr betragen. Dies entspricht ca. 40 Prozent des deutschen Strombedarfs 2013. Bei derzeitigem weltweiten Strommix resultierten daraus ca. 170 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente, die vermieden werden könnten [101]. Auch wenn sich für Stahlschrotte ähnliche Überschussszenarien durch Kupfer- und Zinnkontaminationen nicht so kurzfristig zeigen, ist auch dort der entgangene Ressourcenschonungseffekt messbar. Der Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen der im Automobilbau eingesetzten Stähle ist durch die qualitativ erforderliche Zugabe von Primärmaterial ca. ein Drittel größer als dies theoretisch erforderlich wäre [102]. An derartigen Szenarien und Simulationen wird deutlich, dass aus dem qualitativen Problem des Downcyclings von Metallen ein

veritables quantitatives Problem erwachsen kann. Für die Zukunft heißt dies vor allem, dass geeignete Techniken entwickelt und Anreize geschaffen werden, um den weiteren Eintrag von Legierungselementen in die großen „Metallpools“ zu begrenzen. Altschrotte, die wir aus dem anthropogenen Lager gewinnen, müssen möglichst sortenrein nach Legierungen und Anwendungen erfasst, sortiert und verarbeitet werden. Gleichzeitig müssen die Techniken weiterentwickelt werden, mit denen ausgeschleuste Begleitstoffe wie Zink effizient aufbereitet und hochwertig verwertet werden können.

Dies ist einerseits eine logistische, organisatorische und wirtschaftliche Herausforderung, aber auch eine sehr technische. In den letzten Jahren wurden verschiedene neuartige Metallsortiertechniken wie die Röntgentransmission (XRT), Röntgenfluoreszenz (XRF) und Laserinduzierte Plasma-Spektroskopie (LIBS) entwickelt und optimiert [103]. Diese müssen nun auch integriert am Markt etabliert werden. Im Rahmen eines im Umweltinnovationsprogramm geförderten Vorhabens konnte 2014 schon der erfolgreiche großtechnische Einsatz einer optimierten Röntgentransmissionsanlage demonstriert werden [104]. Damit lassen sich un- und sehr niedrig legierte Aluminiumpartikel im Shreddergut effektiv erkennen und aussortieren. Diese können z. B. wieder in qualitativ hochwertigen Knetlegierungen für Fensterprofile ohne Zusatz von Primäraluminium eingesetzt werden. Aber auch viele weitere anwendungsbezogene nahezu geschlossene Aluminiumkreisläufe, für Aluminiumgetränkedosen und Automobilbleche, sind mit Hilfe dieser Technik vorstellbar. Der Wertzuwachs des Rezyklats allein durch das Ausschleusen von Begleitstoffen ist beachtlich. Das enorme wirtschaftliche Potenzial für die Zukunft wurde schnell erkannt. Mittlerweile wird die Technik innerhalb eines der größten Aluminiumkonzerne der Welt umgesetzt. Wettbewerber suchen intensiv nach vergleichbaren Lösungen.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die integrale Bewirtschaftung des anthropogenen Lagers zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus langlebigen Produkten, Gebäuden, Infrastrukturen und Ablagerungen, wird im Anthropozän einen großen Bedeutungszuwachs erfahren. Urban Mining kann den notwendigen systematischen, interdisziplinären Rahmen für ein Stoffstrommanagement liefern, um Wachstums- und Schrumpfungsdynamiken im anthropogenen Lager in eine ressourcenschonende Kreislaufwirtschaftspolitik zu integrieren. Ziel ist dabei, die in unserer gebauten Umwelt enthaltenen Materialien langfristig in ihrer bisherigen Funktionalität in gleichen Materialkreisläufen zu halten und eine Schad- und Störstoffanreicherung zu verhindern – auch und gerade dann, wenn die Mengen an freiwerdenden Materialien aus dem Lager deutlich zunehmen werden. Dies in einer Wirtschaftswelt zu realisieren, die unter anderen Vorzeichen – einer günstigen Primärrohstoffversorgung und ebenso gut verfügbaren Senken für Abfälle und Emissionen auf Kosten nicht internalisierter Umweltauswirkungen – gewachsen ist, stellt Umweltpolitik und Wirtschaft vor große Herausforderungen.

Mühsam müssen wir den bisher gewachsenen, anthropogenen Lagerbestand nachträglich neu kartieren und analysieren, wie unsere Abfälle stofflich beschaffen sind. Fünf strategische Leitfragen zu Lage, Beschaffenheit und Freisetzung der Lager, zu beteiligten Akteuren und

technischen, logistischen und organisatorischen Voraussetzungen gilt es hier frühzeitig zu beantworten und in einen Zusammenhang zu stellen.

Was für den „Altbestand“ mit vielen aufwendigen Recherchen und Untersuchungen verbunden ist, ist auch für die aktuelle Entwicklung nicht trivial. Die technologische Entwicklung schreitet so schnell voran, dass sich selbst die Verteilung von Materialien in Gütergruppen wie Elektrogeräten oder Fahrzeugen überhaupt nur mit großen Unsicherheiten nachvollziehen lässt. Dennoch haben wir die Möglichkeit, jetzt die Wissens- und Entscheidungsbasis dafür zu schaffen, dass wir in den kommenden Jahren und Jahrzehnten effektiver agieren können. Effektiver in der Erfassung und im Recycling von kleinen bedeutsamen Stoffströmen neben großen Hauptmaterialströmen. Effektiver um unterdessen Schadstoffe sicher auszuschleusen und zu beseitigen. Effektiver darin, ein Stoffstrommanagement mit dem Materialeinsatz zu beginnen – und nicht erst am Abfallaufkommen anzusetzen.

Der Schlüssel zur Prognostik zukünftiger Potenziale im anthropogenen Lager liegt in der qualitativen und quantitativen Veränderung der Güterbestände. Nur auf die nach derzeitigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen werthaltigsten Stoffe und auf überwiegend mit einem Downcycling verbundene Verwertungswege zu setzen, wird genauso wenig genügen wie

die Orientierung an materialunspezifischen Mengenverwertungsquoten, wie sie z. B. für Bauabfälle gelten, um die immensen Ressourcenschonungspotenziale unserer gebauten Umwelt erschließen zu können. Wie im Primärbergbau die Regel, kann die Bewirtschaftung des anthropogenen Lagers auch im Sinne einer Koppelproduktion verstanden werden. Auch wenn einzelne Materialfrachten erlöstreibend sind, können andere – wie Sondermetalle – mit ausgebracht und separiert werden. Diese weiter aufzukonzentrieren und Mengenströme zu hochspezialisierten Verwertungsbetrieben zu lenken, kann wegweisend sein.

Ob der erzielte Nutzen die Höhe der Aufwendungen rechtfertigt, sollte sich in Zukunft viel stärker daran bemessen, wie hoch die Ressourceninanspruchnahmen und Umweltauswirkungen sind, die in der Primärrohstoffwirtschaft anfallen. Im Vergleich zu dem immensen Aufwand, der mit hochtechnisierten Verfahren betrieben wird, um Rohstoffe aus der natürlichen Umwelt zu entnehmen und zu veredeln, erscheinen die für Sekundärrohstoffe eingesetzten Prozesse noch nicht gänzlich ausgereizt. Unter diesem Gesichtspunkt ließe sich der Organisations- und Technisierungsgrad in der Kreislaufwirtschaft noch deutlich steigern.

Das Umweltbundesamt setzt sich für eine strategische und interdisziplinäre Ausrichtung des Urban Mining ein, das sowohl urbane

Prospektionen, Explorationen, Erschließung und Ausbeutung anthropogener Lagerstätten sowie die Aufbereitung der gewonnenen Sekundärrohstoffe umfasst. Viele der genannten Funktionen erfordern ganz neue methodische Ansätze, Entwicklungen und Instrumente oder die Integration von bestehenden. Hierzu zählen

- › Indikatoren, Modelle und Bewertungsschemata für urbane Minen,
- › digitale Kataster, Datenbanken, Gebäude- und Güterpässe zur Stärkung der prospektiven Wissensbasis,
- › die umsichtige Entwicklung von Sortier-, Trenn- und Recyclingtechniken für komplexe Stoffverbünde und deren Verbreitung,
- › das vorausschauende Gestalten logistischer und rechtlicher Rahmenbedingungen für die Gewinnung, Erfassung und Behandlung,
- › das Anbahnen marktgerechter Akteurskonstellationen zur Stärkung der Nachfrage für qualitätsgesicherte Sekundärrohstoffe.

All dies kann sich in einer erfolgreichen Urban Mining Strategie zusammenfügen und wird der Kreislaufwirtschaft einen großen Schub verleihen.

Auf lange Sicht könnte eine doppelte Dividende fällig werden. Denn die für das Urban Mining entwickelte Informationsbasis wird wichtige Anreize für das Produktdesign und die Bauplanung geben – für eine recyclinggerechte Konstruktion.

LITERATURVERZEICHNIS

1. **DESTATIS:** Umweltnutzung und Wirtschaft – Bericht zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen. 2014, Statistisches Bundesamt: Wiesbaden. S. 1 – 155.
2. **Umweltbundesamt:** Inländische Entnahme von Rohstoffen und Materialimporte. Abgerufen am 10.10. 2016 von: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/rohstoffe-als-ressource/inlaendische-entnahme-von-rohstoffen>.
3. **EU COM:** Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. COM(2015) 614 final. 2015, Europäische Kommission: Brüssel.
4. **Müller, F.:** Urban Mining – Die Wertstoffschatze heben. Recycling Magazin, 2015. 70(20): S. 14 – 17.
5. **Müller, F., Lehmann, C., Kosmol, J. et al.:** Urban Mining – Systematisierung eines Strategieansatzes zur Kreislaufwirtschaft. Müll und Abfall, 2016. 48(10): S. 169 – 176.
6. **Wagner, J., Heidrich, K., Baumann, J. et al.:** Ermittlung des Beitrages der Abfallwirtschaft zur Steigerung der Ressourcenproduktivität sowie des Anteils des Recyclings an der Wertschöpfung unter Darstellung der Verwertungs- und Beseitigungspfade des ressourcenrelevanten Abfallaufkommens. In: UBA-TEXTE, 14/2012. Umweltbundesamt (Hrsg.). 2012: Dessau-Roßlau. S. 1 – 174.
7. **BDE, ITAD und VDMA:** Branchenbild der deutschen Kreislaufwirtschaft. 2016, Bundesverband der Deutschen Entsorgungs- Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V. et al.: Berlin. S. 1 – 48.
8. **Wiedmann, T.O., Schandl, H., Lenzen, M. et al.:** The material footprint of nations. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015. 112(20): S. 6271 – 6276. DOI:10.1073/pnas.1220362110
9. **DESTATIS:** Abfallbilanz 2014 (Abfallaufkommen/-verbleib, Abfallkennzahlen, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen) In: Umwelt. Statistisches Bundesamt (Hrsg.). 2016. S. 1 – 63.
10. **Baccini, P. und Brunner, P.H.:** Metabolism of the anthroposphere : Analysis, evaluation, design. 2012, The MIT Press: Cambridge, MA, 408 S.
11. **Baccini, P. und Bader, H.-P.:** Regionaler Stoffhaushalt. Erfassung, Bewertung und Steuerung. 1995, Heidelberg: Spektrum Akad. Verl. 420 S.
12. **Fischer-Kowalski, M. und Hüttler, W.:** Society's metabolism. The intellectual history of materials flow analysis, Part II, 1970 – 1998. Journal of Industrial Ecology, 1999. 2(4): S. 107 – 136.
13. **Ayres, R.U. und Ayres, L.:** A handbook of industrial ecology. 2002, Edward Elgar Publishing: Cheltenham (UK), Northampton (MA, USA), 688 S.
14. **Henseling, K.O.:** Ursprünge des industriellen Stoffwechsels zwischen Mensch und Natur. Schriftenreihe des IÖW, 2008. 187(08): S. 1 – 108.
15. **Crutzen, P.J.:** Geology of mankind. Nature, 2002. 415(6867): S. 23 – 23.
16. **Vince, G.:** An epoch debate. Science, 2011. 334(6052): S. 32 – 37. DOI:10.1126/science.334.6052.32
17. **EEA:** The European environment: State and outlook 2015: Synthesis report. 978-92-9213-515-7. European Environment Agency (Hrsg.). 2015: Copenhagen. S. 1 – 212.
18. **Rockström, J., Steffen, W., Noone, K. et al.:** Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. Ecology & Society, 2009. 14(2): S. 1 – 33.
19. **Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J. et al.:** Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science, 2015. 347(6223). DOI:10.1126/science.1259855
20. **Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N. et al.:** Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. Ecological Economics, 2009. 68(10): S. 2696 – 2705. DOI:10.1016/j.ecolecon.2009.05.007
21. **Rauch, J.N. und Pacyna, J.M.:** Earth's global Ag, Al, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, and Zn cycles. Global Biogeochemical Cycles, 2009. 23(2): S. 1 – 16.
22. **Gordon, R.B., Bertram, M. und Graedel, T.E.:** Metal stocks and sustainability. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2006. 103(5): S. 1209 – 1214. DOI:10.1073/pnas.0509498103
23. **Skinner, B.J.:** Exploring the resource base. In: Unpublished notes for a presentation to the Conference on Depletion and the Long-Run Availability of Mineral Commodities held in Washington, DC, April. 2001.
24. **Graedel, T.E., Harper, E.M., Nassar, N.T. et al.:** Criticality of metals and metalloids. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015. 112(14): S. 4257 – 4262. DOI:10.1073/pnas.1500415112
25. **Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D. et al.:** How circular is the global economy? An assessment of material flows, waste production, and recycling in the European Union and the world in 2005. Journal of Industrial Ecology, 2015. 19(5): S. 765 – 777. DOI:10.1111/jiec.12244
26. **UN:** World cities report 2016. Urbanization and development: Emerging futures. 2016, United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat): Nairobi. S. 1 – 262.
27. **Baccini, P.:** Zukünfte urbanen Lebens mit Altlasten, Bergwerken und Erfindungen. In: Industrial ecology: Erfolgreiche Wege zu nachhaltigen industriellen Systemen. A.v. Gleich und S. Gössling-Reisemann, (Hrsg.). 2008, Vieweg + Teubner: Wiesbaden. S. 218 – 237.
28. **Brunner, P., Smolak, A., Fiala, P. et al.:** Ressourcen: Raubbau, Recycling und Energiegewinnung. In: Schriftenreihe für Ökologie und Ethologie 33. 2007, Facultas.wuw: Wien.
29. **Liu, G., Bangs, C.E. und Müller, D.B.:** Stock dynamics and emission pathways of the global aluminium cycle. Nature Climate Change, 2013. 3: S. 338 – 342. DOI:10.1038/nclimate1698
30. **Consultic:** Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2013 – Kurzfassung. 2013, Consultic: Alzenau, S. 1 – 18.
31. **Schiller, G., Ortlepp, R., Krauß, N. et al.:** Kartierung des Anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft. In: UBA-TEXTE 83/15. 2015, Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau. S. 1 – 260.
32. **Nakamura, T. und Halada, K.:** Urban mining systems. 2015, Springer Verlag: Tokyo, Heidelberg, New York, Dordrecht London, S. 1 – 55.
33. **Halada, K., Iijima, K., Shimada, M. et al.:** A possibility of urban mining in Japan. Journal of the Japan Institute of Metals, 2009. 73(3): S. 151 – 160.
34. **International Panel for Sustainable Resource Management, Working Group on the Global Metal Flows:** Metal stocks in society: Scientific synthesis. 2010, United Nations Environment Programme: Nairobi, 52 S.
35. **Jasinski, S.:** Mineral commodity summaries 2015. In: U.S. Geological Survey, Department of the Interior. U.S. Department of the Interior: Virginia, S. 1 – 199.
36. **Pilarsky, G.:** Wirtschaft am Rohstoffropf: Der Kampf um die wichtigsten mineralischen Ressourcen. 2014, Springer Fachmedien: Wiesbaden.
37. **Krook, J., Carlsson, A., Eklund, M. et al.:** Urban mining: Hibernating copper stocks in local power grids. Journal of Cleaner Production, 2011. 19(9 – 10): S. 1052 – 1056. DOI:10.1016/j.jclepro.2011.01.015

38. **Brown, T.J., Walters, A., Idione, N. et al.:** World mineral production 2006 – 2010. 2012, British Geological Survey: Keyworth, Nottingham. S. 1 – 87.
39. **Nassar, N., Graedel, T. und Harper, E.:** By-product metals are technologically essential but have problematic supply. *Science Advances*, 2015, 1(3): S. 1 – 10.
40. **Norgate, T.:** Deteriorating ore resources. Energy and water impacts. In: *Linkages of sustainability*. T.E. Graedel und E. van der Voet (Hrsg.). 2009, The MIT Press: Cambridge, MA, S. 131 – 148.
41. **Giegrich, J., Liebich, A., Lauwigi, C. et al.:** Indikatoren/Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. In: *UBA-TEXTE*, 01/2012. 2012, Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau. S. 1 – 248.
42. **UBA:** ProBas -Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente. Abgerufen am 21.10.2016 von: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/>.
43. **Schilling-Vacaflor, A. und Flemmer, R.:** Rohstoffabbau in Lateinamerika: Fehlende Bürgerbeteiligung schürt Konflikte. *GIGA Focus*, 2015(5): S. 1 – 8.
44. **Ernst&Young:** Business risks facing mining and metals 2015 – 2016. 2015, Ernst & Young: S. 1 – 52.
45. **Fricke, K., Münnich, K., Heußner, C. et al.:** Landfill Mining – Ein Beitrag der Abfallwirtschaft für die Ressourcensicherung. In: *Recycling und Rohstoffe*, Band 5. K.J. Thomé-Kozmiensky und D. Goldmann (Hrsg.) 2012: Neuruppin. S. 933 – 944.
46. **Rettenberger, G.:** Rohstoffpotential in Deponien. In: *Recycling und Rohstoffe*, Band 5. K.J. Thomé-Kozmiensky und D. Goldmann (Hrsg.). 2012: Neuruppin. S. 919 – 932.
47. **Fricke, K., Hillebrecht, K., Richter, O. et al.:** Nachnutzung von Deponien für den Anbau von Energiepflanzen – Bewertung von Anforderungen und Synergien bei der Produktion von Energiepflanzen, der Deponienachsorge und dem Naturschutz – Machbarkeitsstudie Endbericht. FKZ 804 34 001. 2005, Technische Universität Braunschweig: Braunschweig. S. 1 – 141.
48. **Krüger, M., Becker, B., Fricke, K. et al.:** Leitfaden zum Enhanced Landfill Mining. 2016, Papierflieger Verlag: Porta Westfalica.
49. **Schiller, G., Müller, F. und Ortlepp, R.:** Mapping the anthropogenic stock in Germany: Metabolic evidence for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016. DOI:10.1016/j.resconrec.2016.08.007
50. **UBA:** Alles, nur kein Abfall: Wie die moderne Kreislaufwirtschaft gelingt. In: *Schwerpunkte* 2015. 2015, Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau. S. 38 – 57.
51. **EU COM:** Proposal for a Regulation of the European Parliament and the Council setting up a Union system for supply chain due diligence self-certification of responsible importers of tin, tantalum and tungsten, their ores, and gold originating in conflict-affected and high-risk areas. 2014, European Commission: Brüssel. S. 1 – 14.
52. **Fronde, M., Grösche, P., Huchtemann, D. et al.:** Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen – Endbericht. Forschungsprojekt Nr. 09/05 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi). 2007, RWI u. a.: Essen. S. 1 – 350.
53. **Fronde, M. und Schmidt, C.M.:** Von der baldigen Erschöpfung der Rohstoffe und anderen Märchen. 2007, RWI: Essen. S. 1 – 13.
54. **Wellmer, F.W.:** Reserves and resources of the geosphere, terms so often misunderstood. Is the life index of reserves of natural resources a guide to the future? *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 2008, 159(4): S. 575 – 590.
55. **EU COM:** Report on critical minerals for the EU. Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials. 2014, European Commission: Brüssel.
56. **Hagelüken, C.:** Auf Spurensuche. *Recycling Magazin – Sonderheft Metallrecycling*, 2012(07): S. 34 – 37.
57. **Hagelüken, C. und Meskers, C.E.:** Complex life cycles of precious and special metals. In: *Linkages of sustainability*. T.E. Graedel und E. van der Voet (Hrsg.). 2009, The MIT Press: Cambridge, MA. S. 163 – 197.
58. **Graedel, T., Allwood, J., Birat, J.-P. et al.:** Recycling rates of metals: A status report. 9280731610. 2011, United Nations Environment Programme (UNEP): Nairobi. S. 1 – 48.
59. **Sander, K., Gößling-Reisemann, S. und Zimmermann, T. et al.:** Ermittlung von Substitutionspotenzialen von primären strategischen Metallen durch Sekundärmaterialien (ReStra). *UBA-TEXTE*. Umweltbundesamt (Hrsg.). 2017: Dessau-Roßlau.
60. **Sander, K., Marscheider-Weidemann, F., Wilts, H. et al.:** Weiterentwicklung der abfallwirtschaftlichen Produktverantwortung unter Ressourcenaspekten am Beispiel von Elektro- und Elektronikgeräten. *UBA-TEXTE*. Umweltbundesamt (Hrsg.). Im Erscheinen: Dessau-Roßlau.
61. **Marscheider-Weidemann, F., Langkau, S., Hummen, T. et al.:** Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. Auftragsstudie. 2016, BGR, DERA: Berlin. S. 1 – 360.
62. **Winterstetter, A., Laner, D., Rechberger, H. et al.:** Integrating anthropogenic material stocks and flows into a modern resource classification framework: Challenges and potentials. *Journal of Cleaner Production*, 2016(133): S. 1352 – 1362. DOI:10.1016/j.jclepro.2016.06.069
63. **Hashimoto, S., Daigo, I. und Murakami, S.:** Framework of material stock accounts – Toward assessment of material accumulation in the economic sphere. In: *EcoBalance Proceedings 2008*. Tokyo.
64. **McKelvey, V.:** Mineral reserves, resources, resource potential, and certainty. 1973: Washington, DC., S. 95 – 97.
65. **Graedel, T.E., Barr, R., Cordier, D. et al.:** Estimating long-run geological stocks of metals – Working paper. 2011, UNEP International Panel on Sustainable Resource Management – Working Group on Geological Stocks of Metals. S. 1 – 32.
66. **Graedel, T.E.:** The prospects for urban mining. *Bridge*, 2011, 41(1): S. 43 – 50.
67. **Kapur, A. und Graedel, T.E.:** Copper mines above and below the ground. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(10): S. 3135 – 3141.
68. **Fellner, J., Lederer, J., Purgar, A. et al.:** Evaluation of resource recovery from waste incineration residues – The case of zinc. *Waste Management*, 2015(37): S. 95 – 103. DOI:10.1016/j.wasman.2014.10.010
69. **Bunge, R. und Stäubli, A.:** Metalle – Reserven, Preise, Umwelt. In: *Recycling und Rohstoffe*, Band 7. K.J. Thomé-Kozmiensky und D. Goldmann (Hrsg.). 2014: Neuruppin. S. 271 – 286.
70. **URBAN MINING® e.V.:** Die Stadt als Rohstoffmine. Abgerufen am 10.10. 2016 von: <http://www.urban-mining-verein.de>.
71. **BMBF:** BMBF-Fördermaßnahme r³ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien. Abgerufen am 10.10. 2016 von: <http://www.r3-innovation.de/>.
72. **Christian Doppler Institut für anthropogene Ressourcen. TU Wien.** Abgerufen am 10.10. 2016 von: <http://iwr.tuwien.ac.at/anthropogene-ressourcen/home/>.
73. **COST action MINEA.** Abgerufen am 10.10. 2016 von: <http://www.minea-network.eu>.
74. **Schiller, G., Ortlepp, R., Krauß, N. et al.:** Kartierung des anthropogenen Lagers: eine neue Planungsgrundlage zur Optimierung der Sekundärrohstoffen in Deutschland. *ReSource – Fachzeitschrift für nachhaltiges Wirtschaften*, 2015, 28(4): S. 4 – 10.

75. **Müller, F., Meinshausen, I. und Möller, A.:** Dynamic modeling framework for anthropogenic stocks and flows to enhance the circular economy. In: *EnviroInfo* 2016. HTW: Berlin. S. 459 – 465.
76. **Hedemann, J., Meinshausen, I., Ortlepp, R. et al.:** Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland – Entwicklung eines dynamischen Stoffstrommodells und Aufbau einer Datenbank zur Prognose des Sekundärrohstoffaufkommens. In: *UBA-TEXTE*. Umweltbundesamt (Hrsg.). Im Erscheinen: Dessau-Roßlau.
77. **UBA:** Kartierung des Anthropogenen Lagers III – Etablierung eines Stoffstrommanagements unter Integration von Verwertungsketten zur qualitativen und quantitativen Steigerung des Recyclings von Metallen und mineralischen Baustoffen (Projektlaufzeit 2016 – 2019). 2016, Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau.
78. **Knappe, F.:** Urban Mining – es sind neue Wege notwendig. Müll und Abfall, 2011(10): S. 460 – 465.
79. **Deilmann, C., Krauß, N., Gruhler, K. et al.:** Sensitivitätsstudie zum Kreislaufwirtschaftspotenzial im Hochbau. In: *Forschungsprogramm Zukunft Bau*, Bundesinstitut für Bau, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.). 2015: Berlin. S. 1 – 152.
80. **BDE:** Bauindustrie und Entsorgungswirtschaft: 90% Baustoff-Recycling nicht zu halten. 2015. Abgerufen am 10.10. 2016 von: <http://recyclingportal.eu/Archive/13683>.
81. **Schiller, G., Deilmann, C., Gruhler, K. et al.:** Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung. In: *UBA-TEXTE*, 56/10. 2010, Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau. S. 1 – 191.
82. **Bauen mit RC-Beton.** Abgerufen am 10.10.2016 von: <http://www.rc-beton.de/index-pilotprojekte.html>.
83. **Beschaffungsamt des Bundesministeriums des Innern:** Leitfaden ressourceneffiziente Beschaffung – Teil 1: Rezyklierte Baustoffe. 2014: Berlin.
84. **Weimann, K., Matyschik, J. und Adam, C.:** Optimierung des Rückbaus/Abbaus von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung. In: *UBA-TEXTE*, 5/13. 2013, Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau. S. 1 – 227.
85. **Müller, A. und Schnell, A.:** Steigerung der Ressourceneffizienz im Bauwesen durch die Entwicklung innovativer Technologien für die Herstellung hochwertiger Aufbaukörnungen aus sekundären Rohstoffen auf der Basis von heterogenen Bau- und Bruchabfällen. Abgerufen am 10.10. 2016 von: www.aufbaukoernung.de
86. **Rübner, K., Schnell, A., Haamkens, F. et al.:** Leichtbeton aus Aufbaukörnungen. *Chemie Ingenieur Technik*, 2012. 84(10): S. 1792 – 1797. DOI:10.1002/cite.201200068
87. **Daxbeck, H., Flath, J., Neumayer, S. et al.:** Konzept zur nachhaltigen Nutzung von Baurestmassen basierend auf der thematischen Strategie für Abfallvermeidung und Abfallrecycling der EU (Projekt EnBa) – Technischer Endbericht. 2011, RMA: Wien. S. 1 – 71.
88. **Wurbs, J., Beer, I., Bolland, T. et al.:** Häufig gestellte Fragen und Antworten zu Hexabromcyclododecan (HBCD). Hintergrund. 2016, Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau.
89. **CreaCycle GmbH:** Der CreaSolv® Prozess. Abgerufen am 10.10. 2016 von: <http://www.creacycle.de/de/der-prozess.html>.
90. **BAUA:** Technische Regeln für Gefahrstoffe – Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten mit alter Mineralwolle (TRGS 521). 2008: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
91. **Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung:** Leitfaden Nachhaltiges Bauen – Anlage 7 – Gebäudepass. 2001, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: Berlin. S. 1 – 17.
92. **Keßler, H. und Knappe, F.:** Anthropogenic stock as a source of raw materials: Optimized utilization of recycled building materials to conserve resources. In: *Factor X. M. Angrick et al. (Hrsg.).* 2013, Springer: Dordrecht, Heidelberg, New York, London. S. 187 – 202.
93. **von Gleich, A.:** Die stofflichen Grundlagen nachhaltigen Wirtschaftens – Anforderungen und Möglichkeiten. In: *Erde 2.0 – Technologische Innovationen als Chance für eine nachhaltige Entwicklung?* S. Mappus und C. Fussler (Hrsg.). 2005, Springer: Dordrecht.
94. **Rombach, G., Modaresi, R. und Müller, D.:** Aluminium recycling – Raw material supply from a volume and quality constraint system. *World of Metallurgy – ERZMETALL*, 2012.65(3): S. 157 – 162.
95. **Reuter, M., Hudson, C., van Schaik, A. et al.:** Metal recycling – Opportunities, limits, infrastructure. 2013, United Nations Environment Programme (UNEP): Paris. S. 1 – 320.
96. **Graedel, T.E.:** On the future availability of the energy metals. *Annual Review of Materials Research*, 2011. 41(1): S. 323 – 335. DOI:10.1146/annurev-matsci-062910-095759
97. **van Schaik, A. und Reuter, M.:** Recycling indices visualizing the performance of the circular economy. *World of Metallurgy – ERZMETALL*, 2016. 69(4): S. 201 – 216.
98. **Reuter, M. und van Schaik, A.:** Opportunities and limits of recycling: A dynamic-model-based analysis. *MRS Bulletin*, 2012. 37(04): S. 339 – 347. DOI:10.1557/mrs.2012.57
99. **Seelig, J.H., Stein, T., Zeller, T. et al.:** Möglichkeiten und Grenzen des Recyclings. In: *Recycling und Rohstoffe*, Band 8. K.J. Thomé-Kozmiensky und D. Goldmann (Hrsg.) 2015: Neuruppin. S. 55 – 69.
100. **Reck, B.K. und Graedel, T.E.:** Challenges in metal recycling. *Science*, 2012. 337(6095): S. 690 – 695. DOI:10.1126/science.1217501
101. **Modaresi, R. und Muller, D.B.:** The role of automobiles for the future of aluminum recycling. *Environmental Science and Technology*, 2012. 46(16): S. 8587 – 8594. DOI:10.1021/es300648w
102. **Nakamura, S., Kondo, Y., Matsubae, K. et al.:** Quality- and dilution losses in the recycling of ferrous materials from end-of-life passenger cars: Input-output analysis under explicit consideration of scrap quality. *Environmental Science and Technology*, 2012. 46(17): S. 9266 – 9273. DOI:10.1021/es3013529
103. **Martens, H. und Goldmann, D.:** Recyclingtechnik. 2. Auflage. 2016, Springer Fachmedien: Wiesbaden.
104. **Kurth, G. und Kurth, B.:** Röntgentrennung für Aluminiumrecycling. 2014, Umweltbundesamt. S. 1 – 26. Abgerufen am 10.10. 2016 von: www.umweltinnovationsprogramm.de.
105. **Lutter, S., Giljum, S., Lieber, M. et al.:** Die Nutzung natürlicher Ressourcen : Bericht für Deutschland 2016. Umweltbundesamt (Hrsg.). 2016: Dessau-Roßlau. S. 1 – 82
106. **Wirtschaftsvereinigung Metalle (WVMetalle):** Metallstatistik 2015. 2016: Berlin. S. 1 – 19.
107. **Buchert, M., Bulach, W. und Stahl, H.:** Klimaschutzpotenziale des Metallrecyclings und des anthropogenen Metalllagers. Bericht im Auftrag von Metalle pro Klima, einer Unternehmensinitiative in der WVMetalle. 2016, Berlin.

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Fachgebiet III 2.2 – Ressourcenschonung,
Stoffkreisläufe, Mineral- und Metallindustrie
Postfach 14 06
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Konzeption und Redaktion:

Felix Müller
Tel: +49 340-2103-3854
felix.mueller@uba.de

Autorinnen und Autoren:

Felix Müller
Christian Lehmann
Jan Kosmol
Hermann Keßler
Til Bolland

Unter Mitarbeit von Johanna Wurbs, Sabine Thalheim,
Doreen Heidler, Regina Kohlmeyer, Christopher Manstein,
Bernd Engelman

Lektorat:

Martina Blum
Sven Heußner

Gestaltung:

Studio GOOD, Berlin
www.studio-good.de

gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier

Broschüren bestellen (optional):

Umweltbundesamt
c/o GVP
Postfach 30 03 61 | 53183 Bonn
Service-Telefon: +49 340-2103-6688
Service-Fax: +49 340-2104-6688
E-Mail: uba@broschuerenversand.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Publikationen als pdf:

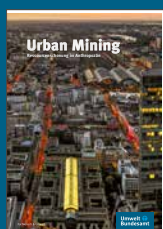
www.umweltbundesamt.de/publikationen/
urban-mining-ressourcenschonung-im-anthropozan

Diese Publikation ist kostenfrei zu beziehen beim
Umweltbundesamt. Der Weiterverkauf ist untersagt.
Bei Zuwiderhandlung wird eine Schutzgebühr von
15 Euro/Stück erhoben.

Bildnachweise:

Titel: Fotolia.com
Seite 2 – 14: Shutterstock.com
Seite 15: Jens Goepfert/Shutterstock.com
Seite 16 – 55: Shutterstock.com
Seite 27: Karl Tönsmeier/Entsorgungswirtschaft GmbH & Co. KG, An der Pforte
2, 32457 Porta Westfalica
Seite 56: Fotolia.com
Seite 57 – 63: Shutterstock.com

Stand: Juli 2017



 www.facebook.com/umweltbundesamt.de
 www.twitter.com/umweltbundesamt

► **Diese Broschüre als Download**

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/urban-mining-ressourcenschonung-im-anthropozan>