

TEXTE

61/2026

Strategiedokument Urban Mining

Kartierung des Anthropogenen Lagers V

Strategieentwicklung für einen nationalen Urban Mining Prozess (KartAL V)

von:

Dr. Matthias Buchert, Dr. Johannes Klinge, Dr. Edda Winter, Dr. Nino Schön-Blume
Öko-Institut, Darmstadt

Nadine Muchow, Christian Dierks, Anja Kathan, Birte Ewers, Antonia Bonnaire, Dr. Monika
Dittrich

ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH, Heidelberg

Dr.-Ing. Georg Schiller, Dr. Gerard Hutter, Karin Gruhler, Anna Diemer, Katharina Bullinger
IÖR, Dresden

Felix Müller

Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 61/2026

REFOPLAN des Bundesministeriums Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3722 35 301 0

Strategiedokument Urban Mining

Kartierung des Anthropogenen Lagers V

Strategieentwicklung für einen nationalen Urban Mining
Prozess (KartAL V)

von

Dr. Matthias Buchert, Dr. Johannes Klinge, Dr. Edda Winter,
Dr. Nino Schön-Blume

Öko-Institut, Darmstadt

Nadine Muchow, Christian Dierks, Anja Kathan, Birte
Ewers, Antonia Bonnaire, Dr. Monika Dittrich

ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH,
Heidelberg

Dr.-Ing. Georg Schiller, Dr. Gerard Hutter, Karin Gruhler,
Anna Diemer, Katharina Bullinger

IÖR, Dresden

Felix Müller

Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Öko-Institut
Rheinstraße 95
64295 Darmstadt

Abschlussdatum:

September 2025

Redaktion:

Fachgebiet III 2.2 Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und Metallindustrie
Felix Müller

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8290>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, April 2026

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen*Autoren.

Kurzbeschreibung: Kartierung des Anthropogenen Lagers V – KartAL V

Mit dem Vorhaben KartAL V wurde in enger Abstimmung mit dem Umweltbundesamt die Urban Mining Strategie zur politischen Ausgestaltung vorbereitet. Ziel des Forschungsvorhabens war die Erstellung eines Strategiedokuments. Dieses umfasst die wesentlichen Inhalte und Ziele einer Urban Mining Strategie. Dieses Dokument soll anschließend dem BMUKN als Strategieentwurf dienen, welcher dann im politischen Prozess abgestimmt und weitergeführt wird. Innerhalb von KartAL V wurde ein Strategieprozess etabliert, welcher die Struktur der thematischen Strategie, seine inhaltliche Ausrichtung mitsamt Vision, Motivationen, Zielesystem, Indikatoren, Aktionsfeldern und Handlungsansätzen sowie Akteurseinbindungen realisierte. Dieser Strategieprozess wurde entscheidend durch die intensive Einbindung eines Steuerungsbegleitkreises (SBK) befruchtet, der sich aus Vertreter*innen ausgewählter Bundesministerien, wichtiger Institutionen des Bundes sowie der Länder und Kommunen zusammensetzte.

Abstract: Mapping the Anthropogenic Stock V - Strategy Development for a National Urban Mining Process – KartAL V

With the KartAL V project, the Urban Mining Strategy was prepared for political development in close cooperation with the Federal Environment Agency. The aim of the research project was to create a strategy document. This comprises the main contents and objectives of an urban mining strategy. This document will then serve as a draft strategy for the BMUKN, which will then be coordinated in the political process. A strategy process was established within KartAL V, which realized the structure of the thematic strategy, its content orientation including vision, motivations, target system, indicators, fields of action and approaches to action as well as stakeholder involvement. This strategy process was decisively stimulated by the intensive involvement of a steering committee (SBK), which was made up of representatives of selected federal ministries, important federal institutions and the states and municipalities.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis.....	10
Abkürzungsverzeichnis.....	11
1 Zielstellung	14
1.1 Urban Mining als Strategieansatz	15
1.2 Vision und Mission	17
1.3 Einordnung in die Strategielandschaft.....	19
1.4 Anthropogenes Lager Deutschlands (Status).....	21
2 Inhaltlich methodisches Vorgehen der Strategieentwicklung	24
2.1 Struktur des Strategieprozesses	24
2.2 Auswahl und Ausgestaltung der Aktionsfelder.....	24
3 Aktionsfelder der Urban Mining Strategie	29
3.1 Aktionsfeld „Elektro/nikgeräte“	29
3.1.1 Elektro/nikgeräte - Strategische Ziele.....	29
3.1.2 Elektro/nikgeräte - Strategische Lücken.....	29
3.1.3 Elektro/nikgeräte – Maßnahmen.....	30
3.2 Aktionsfeld „Fahrzeuge“	31
3.2.1 Fahrzeuge - Strategische Ziele	32
3.2.2 Fahrzeuge - Strategische Lücken.....	32
3.2.1 Fahrzeuge - Maßnahmen.....	33
3.3 Aktionsfeld „Lithium-Ionen-Batterien: Stationäre Anwendungen“.....	34
3.3.1 Lithium-Ionen-Batterien: Stationäre Anwendungen - Strategische Ziele.....	34
3.3.2 Lithium-Ionen-Batterien: Stationäre Anwendungen - Strategische Lücken.....	34
3.3.3 Lithium-Ionen-Batterien: Stationäre Anwendungen - Maßnahmen	35
3.4 Aktionsfeld „Windenergieanlagen“	35
3.4.1 Windenergieanlagen - Strategische Ziele	36
3.4.2 Windenergieanlagen - Strategische Lücken.....	36
3.4.3 Windenergieanlagen - Maßnahmen.....	37
3.5 Aktionsfeld „Photovoltaikanlagen“	37
3.5.1 Photovoltaikanlagen - Strategische Ziele.....	38
3.5.2 Photovoltaikanlagen - Strategische Lücken	38
3.5.3 Photovoltaikanlagen - Maßnahmen	39
3.6 Aktionsfeld „Fossile und nukleare Kraftwerke“	39

3.6.1	Fossile und nukleare Kraftwerke - Strategische Ziele	40
3.6.2	Fossile und nukleare Kraftwerke - Strategische Lücken	40
3.6.3	Fossile und nukleare Kraftwerke – Maßnahmen.....	41
3.7	Aktionsfeld „Mineralische Baustoffe im Hochbau sowie in Straßen und Brücken“	43
3.7.1	Mineralische Baustoffe - Strategische Ziele.....	43
3.7.2	Mineralische Baustoffe - Strategische Lücken.....	44
3.7.3	Mineralische Baustoffe - Maßnahmen	45
3.8	Aktionsfeld „Kunststoffe im Hoch- und Tiefbau“	46
3.8.1	Kunststoffe im Hoch- und Tiefbau - Strategische Ziele.....	47
3.8.2	Kunststoffe im Hoch- und Tiefbau - Strategische Lücken	47
3.8.3	Kunststoffe im Hoch- und Tiefbau - Maßnahmen	48
4	Prioritäre Querschnittsthemen der Urban Mining Strategie	51
4.1	Schadstoffregulierung.....	51
4.2	Regionalisierung.....	54
4.3	Digitalisierung	57
5	Strategiestatus und Perspektiven	60
5.1	Kohärenz mit weiteren Strategien	61
5.2	Maßnahmen, Akteur*innen, Adressat*innen und Zeitrahmen.....	62
5.3	Erfolgskontrolle, Indikatoren und Monitoring.....	69
6	Quellenverzeichnis	71
A	Anhang – Steckbriefe zu den Aktionsfeldern	76
A.1	Steckbrief „Elektro/nikgeräte“.....	76
A.1.1	Status quo	76
A.1.2	Rohstoffe der Elektro(nik)geräte	80
A.1.3	Zukünftiges Sekundärrohstoffpotenzial.....	83
A.1.4	Handlungsbedarf für eine optimierte Urban Mining Strategie	85
A.1.5	Quellverzeichnis Steckbrief „Elektro/nikgeräte“	87
A.2	Steckbrief „Fahrzeuge“	90
A.2.1	Status quo	90
A.2.2	Rohstoffe in Fahrzeugen	92
A.2.3	Zukünftiges Sekundärrohstoffpotenzial.....	94
A.2.4	Handlungsbedarf für eine optimierte Urban Mining Strategie	97
A.2.5	Quellenverzeichnis Steckbrief „Fahrzeuge“	100
A.3	Steckbrief „Lithium-Ionen-Batterien: Stationäre Anwendungen“	103

A.3.1	Status quo	103
A.3.2	Rohstoffe in Lithium-Ionen-Batterien.....	103
A.3.3	Zukünftiges Sekundärrohstoffpotenzial.....	104
A.3.4	Handlungsbedarf für eine optimierte Urban Mining Strategie	105
A.3.5	Quellenverzeichnis Steckbrief „Lithium-Ionen-Batterien“	106
A.4	Steckbrief „Windenergieanlagen“	108
A.4.1	Status quo	108
A.4.2	Rohstoffe in Windenergieanlagen	109
A.4.3	Zukünftiges Sekundärrohstoffpotenzial.....	111
A.4.4	Handlungsbedarf für eine optimierte Urban Mining Strategie	112
A.4.5	Quellenverzeichnis Steckbrief „Windenergieanlagen“	114
A.5	Steckbrief „Photovoltaikanlagen“	116
A.5.1	Status quo	116
A.5.2	Rohstoffe in Photovoltaikanlagen.....	117
A.5.3	Zukünftiges Sekundärrohstoffpotenzial.....	120
A.5.4	Handlungsbedarf für eine optimierte Urban Mining Strategie	123
A.5.5	Quellenverzeichnis Steckbrief „Photovoltaikanlagen“	124
A.6	Steckbrief „Fossile und nukleare Kraftwerke“	128
A.6.1	Status quo	128
A.6.2	Rohstoffe in fossilen und nuklearen Kraftwerken	131
A.6.3	Zukünftiges Sekundärrohstoffpotenzial.....	132
A.6.4	Handlungsbedarf für eine optimierte Urban Mining Strategie	135
A.6.5	Quellenverzeichnis Steckbrief „Fossile und nukleare Kraftwerke“	136
A.7	Steckbrief „Mineralische Baustoffe im Hochbau sowie in Straßen und Brücken“	137
A.7.1	Status quo	137
A.7.2	Materiallager im Hochbau sowie in Straßen und Brücken	138
A.7.3	Zukünftiges Sekundärrohstoffpotenzial.....	140
A.7.4	Handlungsbedarf für eine optimierte Urban Mining Strategie	145
A.7.5	Quellenverzeichnis Steckbrief „Mineralische Baustoffe im Hochbau sowie in Straßen und Brücken“	147
A.8	Steckbrief „Kunststoffe im Hoch- und Tiefbau“	150
A.8.1	Status quo	150
A.8.2	Relevante Kunststoffe und -komponenten im Hoch- und Tiefbau.....	151
A.8.3	Zukünftiges Sekundärrohstoffpotenzial.....	155

A.8.4	Handlungsbedarf für eine optimierte Urban Mining Strategie	157
A.8.5	Quellenverzeichnis Steckbrief „Kunststoffe im Hoch- und Tiefbau“	159
B	Anhang - Übersicht auf wichtige Strategien, Initiativen und Rahmensetzungen mit Schnittstellen zur nationalen Urban Mining Strategie (UMS).....	162

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verortung von Urban Mining als Strategie- und Handlungsansatz innerhalb des R-Strategierahmens einer Kreislaufwirtschaft.....	15
Abbildung 2:	Inhaltliche Systematik der Urban Mining Strategie.....	17
Abbildung 3:	Auszug Strategielandschaft mit Bezug zur Urban Mining Strategie	20
Abbildung 4:	Flussdiagramm – Zuwachs des anthropogenen Lagers Deutschlands 2020 [Mio. t]	22
Abbildung 5:	Schema des Auswahlprozesses der Aktionsfelder der UMS	24
Abbildung 6:	Schema des Prozesses zur Ausgestaltung und Umsetzung der Maßnahmen in der Urban Mining Strategie für die jeweils priorisierten Aktionsfelder	27
Abbildung 7:	Einordnung des Strategieprozesses.....	61
Abbildung 8:	Schema des Vorgehens bei der Erfolgskontrolle der Maßnahmen in der UMS	70

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Bewertungskategorien mit hohen Ausprägungen der Aktionsfelder	26
Tabelle 2:	Aktionsfeld Elektro/-nikgeräte: Maßnahmen, Akteure, Adressaten und Zeitrahmen	63
Tabelle 3:	Aktionsfeld Fahrzeuge: Maßnahmen, Akteure, Adressaten und Zeitrahmen	64
Tabelle 4:	Aktionsfeld Lithium-Ionen-Batterien: Maßnahmen, Akteure, Adressaten und Zeitrahmen	65
Tabelle 5:	Aktionsfeld Windenergieanlagen: Maßnahmen, Akteure, Adressaten und Zeitrahmen	65
Tabelle 6:	Aktionsfeld Photovoltaikanlagen: Maßnahmen, Akteure, Adressaten und Zeitrahmen	66
Tabelle 7:	Aktionsfeld Fossile und Nukleare Kraftwerke: Maßnahmen, Akteure, Adressaten und Zeitrahmen	66
Tabelle 8:	Aktionsfeld Mineralische Baustoffe im Hochbau und Tiefbau sowie Straßen und Brücken: Maßnahmen, Akteure, Adressaten und Zeitrahmen	67
Tabelle 9:	Aktionsfeld Kunststoffe in Hoch- und Tiefbau: Maßnahmen, Akteure, Adressaten und Zeitrahmen	68

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
AVV	Abfallverzeichnisverordnung
BattVO	EU Battery Regulation
BauPVO	EU-Bauprodukteverordnung
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BBS	Bundesverband Baustoffe
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (battery electric vehicle)
BMFTR	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMFTR	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CCRI	Circular Cities and Regions Initiative
CEAP	Circular Economy Action Plan
CFK	Kohlenfaserverstärkte Kunststoffe
CRMA	EU Critical Raw Materials Act
DAV	Deutscher Asphaltverband e.V.
DDT	Dichlordiphenyltrichlorethan
DepV	Verordnung über Deponien und Langzeitlager
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
EAG	Elektro(nik)altgeräte
EAV	Europäisches Abfallverzeichnis
EEG	Erneuerbare-Energie-Gesetz
ElektroG	Elektrogesetz
ELV	End-of-Life Vehicles
EoL (PV-Module)	„End-of-Life“ = PV-Module am Ende ihrer Lebenszeit
EPPA	European PVC Window Profile and related Building Products Association
EPS	Expandiertes Polystyrol
ErsatzbaustoffV	Ersatzbaustoffverordnung

Abkürzung	Erläuterung
EU COM	Europäische Kommission
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
FSS	Frostschutzschicht
GewAbfV	Gewerbeabfallverordnung
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GK	Gesteinskörnung
GW	Gigawatt
HBCD	Hexabromcyclododecam
HFCKW	Teilhaletierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe
ICE	Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (internal combustion engine)
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
KartAL	Kartierung des anthropogenen Lagers
KMF	Künstliche Mineralfasern
KoaV	Koalitionsvertrag
LIB	Lithium-Ionen-Batterie
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
LMO	Lithium-Mangan-Oxid
NAS	Net additions to stock (Nettobestandszuwachs)
NCA	Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid
NKWS	Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie
NMC	Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
PA	Polyamid
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	polychlorierte Biphenyle
PCP	Pentachlorphenol
PE	Polyethylen
PFAS	per- und polyfluorierte Alkylverbindungen
PKW	Personenkraftwagen
PMMA	Polymethylmethacrylat
PMSM	Permanenterregter Synchronmotor
PP	Polypropylen

Abkürzung	Erläuterung
ProgRess	Ressourceneffizienzprogramm
PUR	Polyurethan
PV	Photovoltaik
PVC	Polyvinylchlorid
RC	Recycling
REA	Rauchgas-Entschwefelungs-Anlage
SBK	Steuerungsbegleitkreis
SDGs	Sustainable Development Goals
STS	Schottertragschicht
THG	Treibhausgase
TWh	Terrawattstunde
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
UMS	Urban Mining Strategie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VerpackG	Verpackungsgesetz
WDVS	Wärmedämmverbundsysteme
WEA	Windenergieanlage
XPS	Extrudiertes Polystyrol

1 Zielstellung

Die Bundesregierung hat sich mit dem Deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes III) im Jahr 2020 die Aufgabe gestellt, eine dezidierte Urban Mining Strategie vorzulegen (BMU 2020). Das Mandat zur Erarbeitung einer Urban Mining Strategie lautet wie folgt:

„Urban Mining zielt auf eine integrale Bewirtschaftung des anthropogenen Lagers zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus langlebigen Produkten, Gebäuden, Infrastrukturen und Ablagerungen. Die Bundesregierung wird eine Urban Mining-Strategie vorlegen, um die Prospektion, Exploration, Erschließung und Ausbeutung anthropogener Lagerstätten sowie die Aufbereitung der gewonnenen Sekundärrohstoffe bis hin zum gütegesicherten Wiedereinsatz in der Produktion ressourcenschonend zu sichern und die Sekundärrohstoffbasis für eine an Kreisläufen orientierte Wirtschaft zu erweitern. Die Strategie stellt das zukünftige Aufkommen und die Qualität von anthropogenen Ressourcen in einen Zusammenhang mit organisatorischen, logistischen, rechtlichen und technischen Rahmenbedingungen sowie Akteurskonstellationen für die Bereitstellung hochwertiger Qualitäts- und gütegesicherter Sekundärrohstoffe und systematisiert erforderliche Instrumente und Maßnahmen.“ (BMU 2020, S. 47 zu Maßnahme 62)

Urban Mining bezeichnet die integrale Bewirtschaftung des anthropogenen Lagers zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus langlebigen Gütern und Ablagerungen und deren Wiedereinbringen in den anthropogenen Materialkreislauf. Als langlebig werden all jene Güter bezeichnet, die durchschnittlich ein Jahr oder länger im anthropogenen Lager verbleiben (z.B. Bauwerke wie Gebäude und Straßen, langlebige Konsum- und Investitionsgüter wie Fahrzeuge oder Windenergieanlagen).

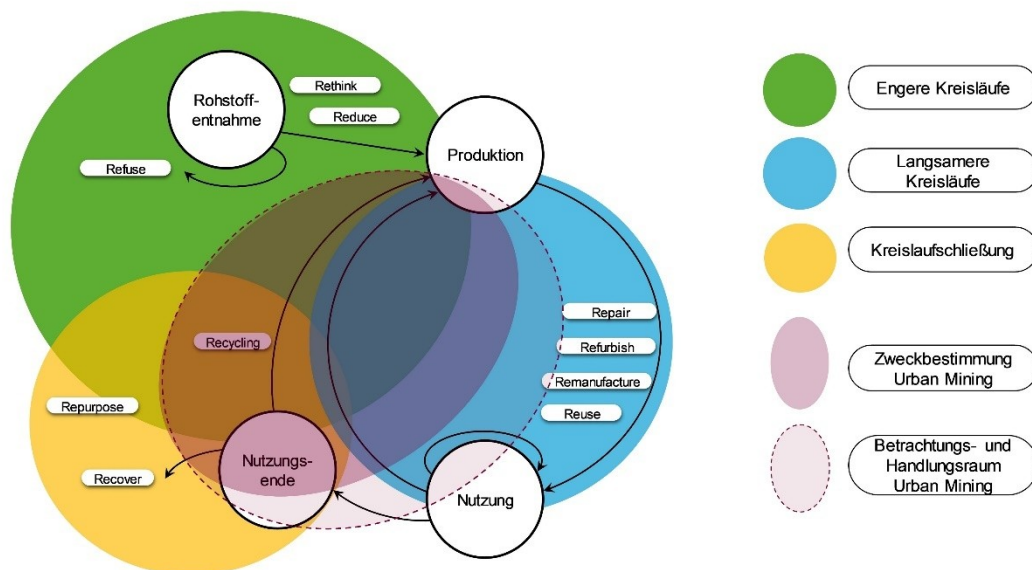
Das anthropogene Lager umfasst sowohl Güter in städtisch als auch ländlich geprägten Räumen. Urban Mining ist deshalb bundesweit von hoher Bedeutung. Es umfasst Prozesse der Prospektion (Aufsuchen), Exploration (Erkundung), Erschließung und Nutzung anthropogener Lagerstätten, die Aufbereitung der gewonnenen Sekundärrohstoffe sowie die Wiedereinbringung der Sekundärrohstoffe in neue Produkte (Hedemann et al. 2017; Müller et al. 2017). Trotz der Analogie dieser grundsätzlichen Prozessschritte zur Primärrohstoffgewinnung im Bergbau gehen mit der Bewirtschaftung des anthropogenen Lagers zur Sekundärrohstoffgewinnung vielfältige Herausforderungen einher, die einen eigenen strategischen Rahmen zum Urban Mining erforderlich machen.

Zahlreiche Initiativen und Projekte haben ein stetig wachsendes Potenzial des anthropogenen Lagers in Deutschland aufgezeigt und dieser Trend setzt sich mittel- bis langfristig fort (Loibl et al. 2020; Müller et al. 2017; Tercero Espinoza et al. 2020). Dies betrifft sowohl Massenmaterialien im Millionen-Tonnen-Maßstab (wie z.B. Beton, Stahl) als auch sogenannte Technologiemetalle (z.B. Lithium, Kobalt), die zur Herstellung von Batterien erforderlich sind, oder Seltenerdmetalle in Permanentmagneten von Motoren und Generatoren. Technologiemetalle bewegen sich zwar quantitativ in anderen Dimensionen als Massenmaterialien mit jährlichen Einsatzmengen in Deutschland im Tonnen- bis zu Kilotonnenbereich – sie spielen jedoch nicht zuletzt für die Transformation kritischer Sektoren in Bezug auf formulierte Klimaziele eine unverzichtbare Rolle (z.B. im Energie- und Verkehrssektor).

Es ist wichtig zu betonen, dass Urban Mining vorrangig auf das Schließen von Materialkreisläufen zielt. Die Kernstrategie im 10-stufigen R-Strategierahmen zur Kreislaufwirtschaft liegt für das Urban Mining im Recycling. Durch den vorausschauenden Bewirtschaftungsansatz des anthropogenen Lagers ist der Betrachtungs- und Handlungsraum aber auf die Produktion und Nutzung langlebiger Güter ausgedehnt. So setzen Prospektion und Exploration bereits mit Instrumenten in der Neuproduktion und vor allem den Beständen in der Nutzungsphase an. Das Urban

Mining bedient übergeordnete Strategieziele wie die Ressourcenschonung und die Steigerung der Versorgungssicherheit indem in der Kreislaufwirtschaft vor allem Kreisläufe geschlossen und diese durch die Substitution von Primärrohstoffen verengt werden (Vgl. Abbildung 1) (UBA 2022). Als thematische Strategie ist Urban Mining damit stark fokussiert und Teil einer umfassenderen Strategie des Zirkulären Wirtschaftens, wie sie die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz [BMUV]¹ 2024) vorzeichnet. Diese zielt darüber hinaus auf die Verlangsamung von Materialflüssen durch die längere Nutzung von Gütern sowie die Enger-Führung im Sinne von “weniger und anders” durch verändertes Konsumverhalten oder unter Verfolgung effizienzbasierter Ansätze zur Reduktion des Materialeinsatzes. Folglich erstreckt sich dieser Ansatz auch auf die Design-, Herstellungs- und Nutzungsphase von Produkten und setzt überdies bei Lebensstilen und Geschäftsmodellen an.

Abbildung 1: Verortung von Urban Mining als Strategie- und Handlungsansatz innerhalb des R-Strategierahmens einer Kreislaufwirtschaft



Quelle: Umweltbundesamt / eigene Abbildung nach DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Modell der R-Strategien 2024

Die Erarbeitung einer Urban Mining Strategie basiert auf einer Projektreihe von fünf Vorhaben zur „Kartierung des Anthropogenen Lagers in Deutschland“ (KartAL I – V, Laufzeit insgesamt von 2012 bis 2025). Das fünfte, hier beschriebene Vorhaben – KartAL V – war der Formulierung dieses Strategiedokuments im Auftrag des BMUKN und Umweltbundesamtes sowie in Zusammenarbeit mit zahlreichen weiteren Akteur*innen gewidmet (z.B. Kommunen, Verbände, Wissenschaft).

1.1 Urban Mining als Strategieansatz

Die nationale Urban Mining Strategie (UMS) hat einen Geltungsbereich für das Territorium der Bundesrepublik Deutschland und ihrer Volkswirtschaft. Im Einklang mit der „Circular Economy Strategy“ der EU und dem Arbeitsprogramm im Zuge des „Clean Industrial Deals“ ist dabei die

¹ Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz [BMUKN] BMUV wurde mittlerweile in BMUKN umbenannt

internationale Einbettung systematisch zu beachten. So findet das Aufsuchen und die Erfassung in Deutschland zwar statt, doch sind Recyclingkapazitäten zur Verwertung bestimmter Materialströme teilweise im europäischen Ausland oder außerhalb Europas lokalisiert. Im Rahmen einer nationalen Urban Mining Strategie werden entsprechende Zusammenhänge berücksichtigt und bei Bedarf adressiert.

Die Lebensdauer von Gütern im anthropogenen Lager beträgt wenige Jahre bis hin zu mehreren Dekaden. Dies beeinflusst die zeitliche Dynamik des urbanen Lagers und damit den zeitlichen Rahmen für dessen Bewirtschaftung (Hedemann et al. 2017 (KartAL II)). Der zeitliche Betrachtungsrahmen einer nationalen Urban Mining Strategie ist deshalb langfristig angelegt.

Das Strategiedokument von KartAL V setzt einen *Zeithorizont bis 2045*. Zugleich sind kürzere Zeithorizonte zu beachten, wenn es etwa um die Konkretisierung von Maßnahmen und die Erfolgskontrolle geht. Dies entspricht zugleich den zeitlichen Perspektiven zentraler Klima- und Umweltziele des Bundes (z. B. das Ziel der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045) und bereitet den Weg für das Monitoring und die mittelfristige Erfolgskontrolle einer nationalen Urban Mining Strategie.

Das anthropogene Lager ist ein komplexes System mit einer zunehmenden Stoff- und Materialvielfalt in unterschiedlichsten Gütern und Gütergruppen (Schiller et al. 2015 (KartAL I)). Hemmnisse bzw. Herausforderungen für Urban Mining ergeben sich beispielweise durch sehr unterschiedliche Lebensdauern von Gütern oder durch Datenlücken bzw. Datenunschärfen zu in früheren Jahrzehnten eingesetzten Materialien. „Hypotheken“ resultieren nicht zuletzt aus historisch bedingten Schadstoffeinträgen. Ein prominentes Beispiel ist das Problem der Asbestbelastung von Gebäuden. Eine nationale Urban Mining Strategie berücksichtigt diese Herausforderungen und zeigt Lösungswege für strategierelevante Probleme auf.

In der Vergangenheit gab es bereits Vorstöße zur besseren Erschließung des anthropogenen Lagers in Deutschland. Diese Aktivitäten waren jedoch häufig auf einzelne Materialströme ausgerichtet – insbesondere zur Verbesserung der Recycling-Prozesseffizienz in technischen Anlagen – und vorgeschlagene Maßnahmen waren nicht verbindlich genug formuliert (z.B. fehlende Zeitpläne, fehlende Vorgaben für Monitoring zur Erfolgskontrolle, nicht ausreichende Adressierung von betroffenen bzw. verantwortlichen Akteuren). Vor allem mangelte es an einem strategischen Rahmen zur Etablierung und zum Ausbau der Sekundärrohstoffproduktion in Deutschland, um die quantitativen und qualitativen Potenziale bestmöglich (optimal) zu nutzen. Ein strukturierter Prozess für die strategische Erschließung des anthropogenen Lagers in Deutschland fehlt bislang.

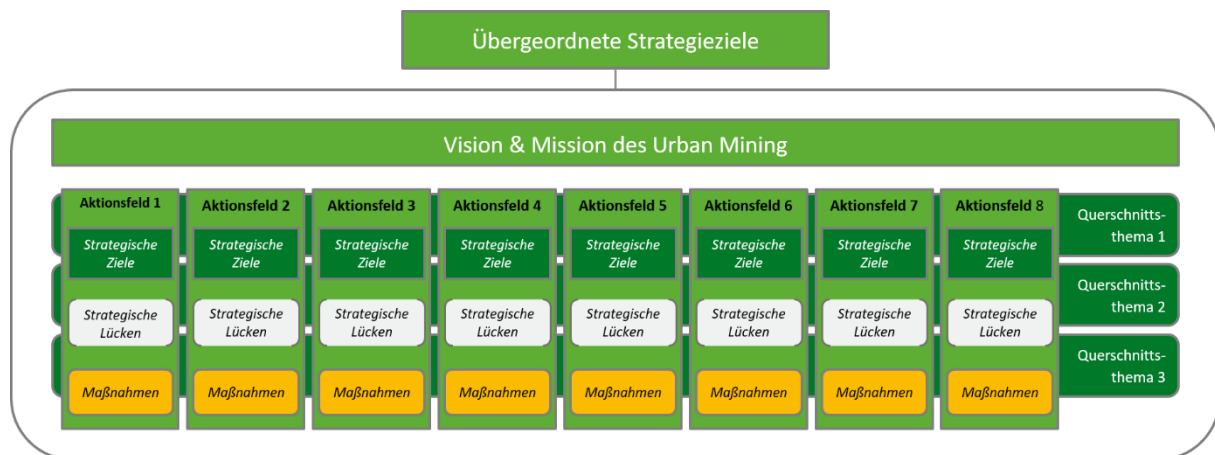
Diese Lücke soll die nationale Urban Mining Strategie schließen. Das vorliegende Dokument enthält über Aussagen zu Zielen und Maßnahmen hinaus auch konkretisierende Aussagen zu strategischen Lücken in einzelnen Aktionsfeldern (Handlungsfeldern²) des Urban Mining. Die Erarbeitung des Strategiedokuments erfolgte auf der Basis einer engen Abstimmung zwischen den (1) Auftraggebern BMUKN und UBA, (2) dem Konsortium der Auftragnehmer*innen sowie (3) der systematischen Einbindung von Fachleuten (vor allem aus Bundesverwaltungen, Kommunen, Verbänden, Wissenschaft). Durch vertiefende Dialoge war es möglich, Schlüsselakteuren für die Urban Mining Strategie zu gewinnen.

² Die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie nutzt den Begriff Handlungsfelder; das vorliegende Dokument nutzt zur Vermeidung von Unklarheiten stattdessen den synonym zu verstehenden Begriff Aktionsfelder.

1.2 Vision und Mission

Urban Mining ist Teil übergeordneter Strategien für die Bundesrepublik Deutschland und selbst durch spezifische Herausforderungen der Strategierealisierung charakterisiert (z.B. Dynamiken des anthropogenen Lagers, Hedemann et al. 2017; Müller et al. 2017). Abbildung 2 zeigt, wie dies bei der Erarbeitung von Aussagen zu Aktionsfeldern (Maßnahmen) Berücksichtigung findet.

Abbildung 2: Inhaltliche Systematik der Urban Mining Strategie



Quelle: eigene Darstellung IÖR

Übergeordnete Strategieziele

Urban Mining als thematische Strategie kann insgesamt als Mittel zur Realisierung übergeordneter Strategieziele verstanden werden. Übergeordnete Strategieziele ergeben sich aus den Nachhaltigkeits-, Umwelt-, Ressourcen-, Rohstoff- und Wirtschaftsstrategien im öffentlichen Sektor, insbesondere durch Strategien des Bundes.

Urban Mining leistet dementsprechend maßgebliche Beiträge zur Realisierung folgender Ziele:

- ▶ **Rohstoffsouveränität**
 - Steigerung der Versorgungssicherheit
 - Senkung der Importabhängigkeit durch Rohstoffversorgungsdiversifikation
 - Sicherung strategischer und kritischer Rohstoffe
 - Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und inländischen Wertschöpfung
 - Erzielung wirtschaftlicher Vorteile
- ▶ **Schonung natürlicher Ressourcen**
- ▶ **Umweltziele hinsichtlich konkreter Umweltwirkungen wie Treibhauspotenzial, Versauerung, Toxizitätsrisiken, Flächenumwandlung, Biodiversitätsverlust usw.**
- ▶ **Effektiveres Abfallmanagement**
 - Schadstoffmanagement
 - Mengen – und Qualitätssteigerung im Recycling

Die Beachtung übergeordneter Strategieziele ist wichtig, um Urban Mining insgesamt im Zusammenhang der Klima-, Umwelt- und Wirtschaftspolitik der Bundesregierung zu begründen.

Vision und Mission

Strategien im öffentlichen Sektor dienen der Orientierung und Motivation von Akteur*innen, Beiträge zum Umgang mit wichtigen gesellschaftlichen Herausforderungen zu leisten (Orientierungs- und Motivationsfunktion). Die Urban Mining Strategie umfasst daher sowohl eine Vision – also eine Vorstellung vom zukünftigen Optimalzustand, den es zu erreichen gilt – als auch eine Mission. Die Mission stellt dar, wie involvierte Akteur*innen die Vision zu realisieren beabsichtigen. Konkrete Ziele und Maßnahmen sind in den Aktionsfeldern des Urban Mining enthalten, die prinzipiell zur Realisierung der Vision beitragen sollen.

- ▶ Vision: Urban Mining ist 2045 ein substanzieller Bestandteil der nationalen Rohstoffversorgung und trägt damit wesentlich zur Ressourcenschonung sowie zum Klima- und Umweltschutz bei. Dies basiert auf einer integralen Bewirtschaftung anthropogener, materieller Ressourcen, zu der alle gesellschaftlichen Akteur*innen mit Rücksicht auf eigene Zielsetzungen und variierenden Rahmenbedingungen gemeinsam beitragen. Urban Mining trägt signifikant und messbar anhand umsetzbarer Maßnahmen und einfacher, nachvollziehbarer Indikatoren zur nachhaltigen und damit umweltverträglichen Rohstoffversorgung der deutschen Volkswirtschaft bei.
- ▶ Mission: Der Staat übernimmt eine aktive Rolle zur Realisierung der Vision des Urban Mining. Er trägt damit zur weiteren Stärkung der Handlungsfähigkeit der öffentlichen Hand bei. Bundesregierung und Bundesverwaltungen unterstützen die zahlreichen Akteur*innen, die für die Realisierung des Urban Mining von zentraler Bedeutung sind. Ökologische, ökonomische und soziale sowie organisatorische, logistische, technische und rechtliche Aspekte der Realisierung des Urban Mining finden in systematischer Weise Beachtung.

Die Vision wendet sich damit insgesamt an alle potenziell relevanten Akteur*innen des Urban Mining, das heißt öffentliche und private sowie intermediäre Akteur*innen. Sie erfüllt eine Orientierungs- und Motivationsfunktion für die Gesamtgesellschaft in Deutschland im internationalen Kontext. Die Mission fokussiert stärker auf die Strategieentwicklung im öffentlichen Sektor (Bund, Länder, Kommunen usw.), um den Weg zur Realisierung der Vision anhand eines handlungsfähigen Staates zu ermöglichen.

Aktionsfeldspezifische strategische Ziele

Eine Urban Mining Strategie wird sich letztlich daran messen lassen müssen, inwieweit sie zur effektiven, effizienten und legitimen Nutzung (Entlang von Prospektion, Exploration, Gewinnung, Aufbereitung und Wiedereinsatz) von anthropogenen Lagerstätten beiträgt. Der Steuerungsbegleitkreis des Projekts KartAL V, bestehend aus Expert*innen verschiedenster Fachrichtungen aus allen relevanten Akteur*innengruppen, hat im Rahmen einer semiquantitativen Vorabbewertung acht strategische Aktionsfelder ermittelt, die für das Urban Mining in Deutschland besondere Wichtigkeit aufweisen (vgl. Kapitel 2.2). Entsprechend werden für diese vorerst prioritär behandelten Aktionsfelder jeweils spezifische Ziele identifiziert sowie Handlungsempfehlungen zu Maßnahmen formuliert.

Die aktionsfeldspezifischen strategische Ziele dienen der gesamthaften (integrativen) Orientierung in den acht Aktionsfeldern des Urban Mining. Sie sind auf einer mittleren Abstraktionsebene formuliert und dienen nicht zuletzt zur Auswahl von Indikatoren des Urban Mining zur Erfolgskontrolle.

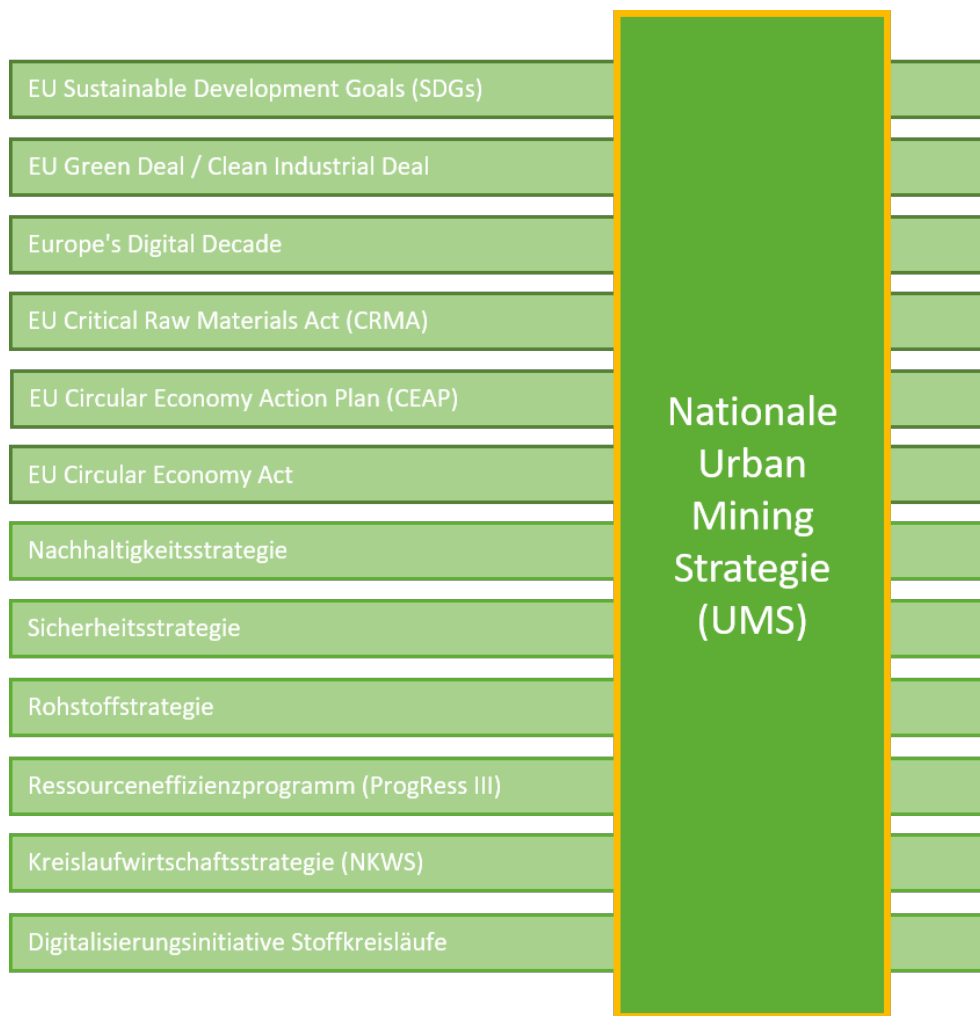
Die Maßnahmen in Aktionsfeldern umfassen Maßnahmen im Sinne der *Anwendung* eines bestimmten informatorischen, regulatorischen und ökonomischen *Politikinstrument*s (z.B. Instrumente in der Verantwortlichkeit des Bundes). Durch die konkreten Aussagen zu Maßnahmen werden die Umsetzungsorientierung der Strategie gestärkt und Umsetzungsfragen geklärt (z.B. Zuständigkeit, Ressourcen, Zeithorizont usw.).

1.3 Einordnung in die Strategielandschaft

Ende 2024 wurde die *Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS)* (BMUV 2024) veröffentlicht und im Bundeskabinett beschlossen. Deren Erstellung wurde im Koalitionsvertrag des 20. Bundestages (2021 – 2025) beschlossen und wird im Koalitionsvertrag des 21. Bundestages im Sinne einer Umsetzung erneut aufgegriffen (Koalitionsvertrag [KoaV] 2021, 2025). Die NKWS enthält übergreifende Maßnahmen zur Implementierung einer Kreislaufwirtschaft für diverse Produktkategorien (z.B. Fahrzeuge und Batterien, IKT und Elektro(nik)geräte, Erneuerbare Energien-Anlagen und den Bau- und Gebäudebereich) im Bereich von 10 R-Strategien (BMUV 2024).

Die vorliegende Urban Mining Strategie knüpft mit dem Fokus auf die R-Strategie *Recycling* an die NKWS an und schließt sich dem Leitbild und den übergeordneten Zielen der NKWS (“Senkung des Primärrohstoffverbrauchs, Schließung von Stoffkreisläufen, Erhöhung der Rohstoffsouveränität, Vermeidung von Abfällen” (vgl. BMUV 2024, S. 15) an. In diesem Zusammenhang kann die Urban Mining Strategie aktuell als die umfassendste thematische Strategie im Bereich Recycling betrachtet werden, die prinzipiell alle Materialkategorien umfasst (vgl. Abbildung 2).

Abbildung 3: Auszug Strategielandschaft mit Bezug zur Urban Mining Strategie



Quelle: eigene Darstellung IÖR (Stand Juni 2025)

Die *Urban Mining Strategie* schließt nicht nur im Sinne eine Querschnittsstrategie an zahlreiche bundesdeutsche Strategien an, sondern trägt auch zur Umsetzung einiger EU-Strategien, Gesetze oder Aktionspläne bei (siehe Abbildung 3). Gemeint sind hier z.B. der *EU Sustainable Development Goals Strategy* zur Umsetzung der Agenda 2030 (SDGs) der Vereinten Nationen. Hierbei sind insbesondere drei SDGs betroffen: SDG 8 „Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum“, SDG11 „nachhaltige Städte und Regionen“ und das SDG12 „nachhaltiger Konsum und Produktion“ (United Nations (UN) 2015).

Ebenfalls trägt Urban Mining zu den Zielen des *EU Green Deals* bei, der unter anderem eine nachhaltigere Nutzung der wichtigsten natürlichen Ressourcen anstrebt (Fetting 2020). An den Green Deal knüpft sich seit 2025 der *EU Clean Industrial Deal* an, mit einer ergänzenden Ausrichtung auf Wettbewerbsfähigkeit der Industrie und einer Betonung einer starken Kreislaufwirtschaft sowie der Souveränität bei kritischen Rohstoffen (European Commission [EU COM] 2025a). Die Urban Mining Strategie bedient diese Ziele maßgeblich. Auch in *Europe's Digital Decade* wird beispielsweise nachhaltige Entsorgung und eine Unterstützung der Transformation zu mehr Nachhaltigkeit durch Digitalisierung aufgegriffen (EU COM 2025b). Außerdem besteht darüber hinaus der *EU Critical Raw Materials Act (CRMA)*. Dieser hat zum Ziel, einen sicheren Zugang und eine nachhaltige Versorgung mit kritischen Rohstoffen zu gewährleisten. Dabei sollen die Klimaziele erreicht werden (CRMA 2024). Darüber hinaus gibt es seit 2020 den zweiten *EU*

Circular Economy Action Plan (CEAP). Dieser ist einer der Hauptbausteine für den European Green Deal mit dem Schwerpunkt Produktlebenszyklen, zirkuläres Produktdesign und nachhaltiger Konsum und Abfallvermeidung (EU COM 2020). Darüber hinaus unterstützt die Urban Mining Strategie zusammen mit der NKWS zahlreiche andere Bundesstrategien, wie z.B. die *Nationale Sicherheitsstrategie* im Bereich Sicherung der Ressourcenversorgung oder die *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie* (Bundesregierung 2020, 2023). Die Urban Mining Strategie kann hierzu wesentlich beitragen.

Der strategische Grundstein für die Transformation zu einer zirkulären Art des Wirtschaftens wurde auf Bundesebene mit der aktualisierten *Rohstoffstrategie der Bundesregierung* gelegt, die 2019 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) veröffentlicht wurde. Diese Strategie soll, ähnlich wie der *EU Critical Raw Materials Act*, die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands auf dem Rohstoffmarkt sichern und fordert die Verwertung von Sekundärmaterial zum Zweck der Gewährleistung einer nachhaltigeren Rohstoffversorgung. Dabei liegt der Fokus vor allem auf Sekundär-Baumaterial (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi], 2019). Im 2020 vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) veröffentlichten *Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess III)* wird die Erarbeitung einer Urban Mining Strategie gefordert (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit [BMU], 2020). Hierauf folgte die bereits thematisierte NKWS (BMUV 2024). In Zukunft sollen diese Entwicklungen auf Bundesebene von einer *Digitalisierungsinitiative zur Schließung von Stoffkreisläufen* begleitet werden, wie sie im aktuellen Koalitionsvertrag vereinbart ist (KoaV 2025, S. 10).

Es gibt außerdem Schnittstellen mit regionalen Rohstoffstrategien (z.B. Ressourcenschutzstrategie Hessen, Sachsen als Sekundärrohstoffland) (Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2018; Sächsisches Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr, 2022).

Manche Aktionsfelder weisen darüber hinaus Schnittstellen zu produkt- oder materialspezifischen Strategien, Verordnungen oder Gesetzen auf. Dies gilt sowohl auf Bundes-, als auch auf EU-Ebene auf. So spezifiziert z.B. das Aktionsfeld 3.3 "Lithium-Ionen-Batterien: Stationäre Anwendungen" Ziele der *EU Battery Regulation*, während das Aktionsfeld 3.7 "Mineralische Baustoffe im Hochbau sowie in Straßen und Brücken" Übereinstimmungen mit der *EU-Bauprodukteverordnung* (BattVO 2023; EU BauPVO 2024) aufweist und für das Aktionsfeld 3.2 „Fahrzeuge“ wird die Anpassung der *ELV-Direktive Fahrzeuge* miteinbezogen (Europäischer Rat der Europäischen Union 2025).

Aus der inhaltlichen Gesamtbetrachtung der aktuellen Strategielandschaft auf Bundes- und EU-Ebene ergeben sich die in Kapitel 1.2 genannten übergeordneten Strategieziele, zu denen die Urban Mining Strategie beitragen soll.

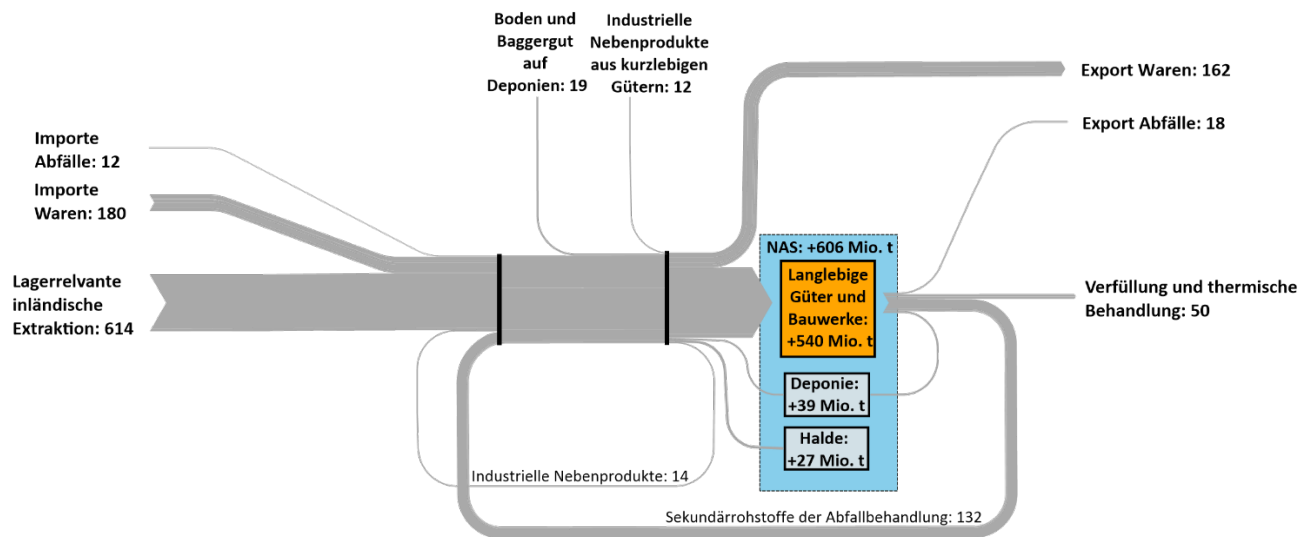
1.4 Anthropogenes Lager Deutschlands (Status)

Eine Voraussetzung für Urban Mining ist ein grundlegendes Verständnis des Zustandes und der Dynamik des anthropogenen Lagers. In einer Serie von Forschungsprojekten des Umweltbundesamts zur Kartierung des anthropogenen Lagers wurden gesamtwirtschaftlich und auf Ebene ausgewählter Sektoren, Güter und Materialflüsse Bestände und ihre Veränderungen modelliert (vgl. Schiller et al. 2015; Hedemann et al. 2017; Buchert et al. 2022).

Als anthropogenes Lager werden die Materialien bezeichnet, die in Gebäuden, Infrastruktur und langlebigen Gütern enthalten sind. Diese sollen – zumeist am Ende der Nutzungsdauer der Güter

– durch Prospektion, Exploration, Erschließung und Ausbeutung wieder als Sekundärrohstoffe verfügbar gemacht werden. Das Lager umfasst sowohl in Nutzung befindliche Materialien, beispielsweise in PKW, bewohnten Gebäuden oder Wasserrohren, als auch nicht mehr genutzte Materialien wie in stillgelegten Bahntrassen oder Ablagerungen auf Deponien und Halden.

Abbildung 4: Flussdiagramm – Zuwachs des anthropogenen Lagers Deutschlands 2020 [Mio. t]



Quelle: Eigene Darstellung

Das Sankey-Diagramm (Abbildung 4) zeigt den Zuwachs des anthropogenen Lagers im Jahr 2020. Der Nettobestandszuwachs (Net additions to stock, NAS) lässt sich als physisches Bestandswachstum der Volkswirtschaft interpretieren und stellt damit gleichermaßen ein Potenzial für das zukünftige Urban Mining dar. Dieser berechnet sich aus der Differenz aus Eingängen und Ausgängen des anthropogenen Lagers. In der Sankey-Darstellung werden gemäß den zu Grunde liegenden Rechnungen alle für langlebige Güterbildung bilanzrelevanten Positionen berücksichtigt. Kurzlebige Güterflüsse wie Lebensmittel oder Kraftstoffe und zugehörige Bilanzpositionen wie Verbrennungsgase wurden herausgefiltert und sind nicht dargestellt. Für die Berechnung des Nettobestandszuwachses wurden Top-Down-Daten zur inländischen Rohstoffentnahme des Statistischen Bundesamts sowie eine Reihe von öffentlichen ökonomieweiten Statistiken zu Produktion, Außenhandel und Abfall verwendet.

Der Nettobestandszuwachs belief sich demnach auf 606 Mio. t (darunter Zuwachs an langlebigen Gütern und Bauwerken 540 Mio. t sowie auf Deponien 39 Mio. t und Halden 27 Mio. t). Dies entspricht 7,3 t pro Kopf. Auf die langlebigen Güter und Bauwerke entfiel hiervon ein Zuwachs von rund 6,5 t pro Kopf. Der Nettobestandszuwachs lässt sich zu ca. 94 % nichtmetallischen Mineralien zuordnen, 5 % Metallen und 1 % Sonstigen, darunter Holz und Kunststoffe (Kathan et al. o.J.).

Für das Jahr 2020 setzt sich dieser zusammen aus (Kathan et al. o.J.):

- Eingänge: Inländische Entnahme von Rohstoffen (614 Mio. t), Importe von Gütern, Rohstoffen sowie Halbwaren (180 Mio. t) und Abfällen (12 Mio. t) inklusive der Zu- bzw. Rückflüsse industrieller Nebenprodukte (insb. REA-Gips, Schlacken, Aschen) (26 Mio. t) und

Sekundärrohstoffe aus der Abfallbehandlung (132 Mio. t) sowie Boden und Baggergut, die auf Deponien gelangen (19 Mio. t)³,

- **Ausgänge:** Exporte von Gütern, Rohstoffen sowie Halbwaren (162 Mio. t) und Abfällen (18 Mio. t) wie auch dem Output aus dem Bilanzraum mit Verfüllungen in über- und untertägigen Abbaustätten und thermischen Behandlungen von Abfällen (50 Mio. t). Außerdem werden outputseitig die stofflich verwerteten Materialflüsse der Abfallwirtschaft (132 Mio. t) abgezogen.

Der Nettobestandszuwachs ist seit dem Jahr 2010 gestiegen. Im Jahr 2010 lag er nach dieser Berechnungsmethodik bei 565 Mio. t; im Jahr 2015 bei 583 Mio. t. So ist der Nettobestandszuwachs im Jahr 2020 schließlich um rund 7 % höher als noch im Jahr 2010. (Kathan et al. o.J.) Somit wächst die deutsche Volkswirtschaft physisch in bedeutendem Maße weiter an und lässt in diesem Zeitraum nicht erkennen, dass Sättigungseffekte eintreten, die mit rückläufigen Bestandszuwachsen einhergehen.

Der gesamte Umfang des anthropogenen Lagers Deutschland lässt sich mit Hilfe von Hochrechnungen abschätzen. Die Gesamtmenge lagerrelevanter Materialien, darunter Gebäude, leitungsgebundene Infrastrukturen, Haustechnik sowie Kapital- und Konsumgüter wurde für das Jahr 2010 in einer Hochrechnung auf detaillierter Güterebene auf rund 28 Mrd. t geschätzt (Schiller et al. 2015). Das entspricht einer Menge von 341 t Material pro Kopf. Mineralische Materialien, wie Gesteine, Sande und Beton, machen davon mit 318 t pro Kopf den überwiegenden Teil aus. An zweiter Stelle stehen Metalle mit 14,3 t pro Kopf. Bei indirekter Ermittlung des Bestandszuwachses über volkswirtschaftliche Top-Down-Rechnungen, die als obere Schranke des anthropogenen Lagers angesehen werden können, wurden für 2010 ca. 52 Mrd. t ermittelt (Schiller et al. 2015). Eingedenk der revidierten volkswirtschaftlichen Bilanzierungsmethoden zur Ermittlung der Nettobestandszuwächse, der vorliegenden Zeitreihen der Berichterstattung und einer Trendfortschreibung der jüngsten Entwicklung ist von einer Gesamtgröße des anthropogenen Lagers Deutschlands im Jahr 2025 von 45,6 Mrd. t auszugehen.

Lagerrelevante Güter

Für die Bestimmung der Lagerrelevanz ist die Lebensdauer bzw. die Verweildauer der Materialien oder Stoffe in Gütern ausschlaggebend. Langlebige Güter (z. B. Gebäude, PKWs, PCs, Möbel) sind lagerrelevant; kurzlebige Güter, mit einer Lebensdauer von weniger als einem Jahr, werden als sogenannte „Durchflussgrößen“ bezeichnet und gehen nicht ins Lager ein (z. B. Kraftstoffe, Nahrungsmittel, chemische Erzeugnisse wie Schädlingsbekämpfungs-, Pflanzenschutz- und Desinfektionsmittel).

³ Bodenaushub (Boden und Baggergut) ist in der Umweltökonomischen Gesamtrechnung, die die Datenbasis für die inländische Extraktion bildet, nicht als genutzte Entnahme erfasst. Da der eigentlich ungenutzte Bodenaushub Bestandteil einer später wieder nutzbaren Deponie wird, wird dieser Materialstrom allerdings als gesonderter Zufluss ausgewiesen.

2 Inhaltlich methodisches Vorgehen der Strategieentwicklung

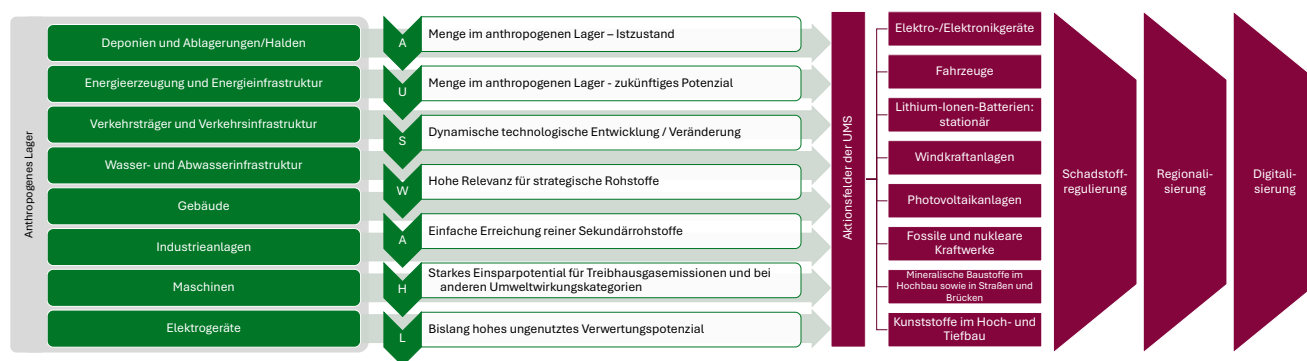
2.1 Struktur des Strategieprozesses

Für die Strategieentwicklung zu einem nationalen Urban Mining Prozess war von Beginn an eine institutionelle Einbindung eines Steuerungsbegleitkreises (SBK) ein wesentlicher Faktor. Der SBK setzte sich aus ca. 20 Vertreter*innen diverser Akteursgruppen (Bundesministerien und -behörden, Kommunen, Wissenschaft etc.) zusammen, die administrativ bzw. im praktischen Vollzug bereits mit Herausforderungen des Urban Mining befasst sind. Der SBK lieferte wichtige Sichtweisen und Perspektiven und unterstützte auf diese Weise maßgeblich die Begründung des Urban Mining als Strategieansatz sowie die Prioritätensetzung für die Strategieentwicklung. Insgesamt wurden im Rahmen des intensiven Austauschs von UBA und Projektteam mit dem SBK zwischen Frühjahr 2023 und September 2025 in vier physischen und drei Online-Veranstaltungen wichtige Schwerpunktsetzungen für den Strategieprozess einvernehmlich abgestimmt (siehe folgende Abschnitte). Darüber hinaus fand im Zuge von vier ganztägigen Fachgesprächen eine Vertiefung der Aktionsfelder mit Branchenakteuren statt.

2.2 Auswahl und Ausgestaltung der Aktionsfelder

Neben der Definition des Urban Mining und seines Geltungsbereichs im Rahmen der Kreislaufwirtschaft (siehe Abschnitt 1) stellt sich die Frage nach einer geeigneten Strukturierung des anthropogenen Lagers innerhalb der Urban Mining Strategie. Im Strategieprozess wurden acht Aktionsfelder und drei Querschnittsthemen ausgewählt (S. Abbildung 5).

Abbildung 5: Schema des Auswahlprozesses der Aktionsfelder der UMS



Quelle: eigene Darstellung

In einem ersten Schritt lässt sich das anthropogene Lager in die folgenden acht Teilsegmente unterteilen:

- ▶ Deponien und Ablagerungen/Halden,
- ▶ Energieerzeugung und Energieinfrastruktur,
- ▶ Verkehrsträger und Verkehrsinfrastruktur,
- ▶ Wasser- und Abwasserinfrastruktur,
- ▶ Gebäude,
- ▶ Industrieanlagen,

- ▶ Maschinen,
- ▶ Elektrogeräte.

Die acht Teilsegmente wurden vom Projektteam weiter in insgesamt 42 Gütergruppen untergliedert. Diese Gütergruppen repräsentieren das gesamte anthropogene Lager und bildeten den Ausgangspunkt für eine notwendige Prioritätensetzung in der Strategieentwicklung zu einem nationalen Urban Mining Prozess. Zur Priorisierung von Aktionsfeldern für den Strategieprozess werden folgende sieben Kriterien angelegt:

1. Menge im anthropogenen Lager – Istzustand,
2. Menge im anthropogenen Lager - zukünftiges Potenzial,
3. Dynamische technologische Entwicklung / Veränderung,
4. Hohe Relevanz für strategische Rohstoffe,
5. Einfache Erreichung reiner Sekundärrohstoffe,
6. Starkes Einsparpotenzial für Treibhausgasemissionen und bei anderen Umweltwirkungskategorien,
7. Bislang hohes ungenutztes Verwertungspotenzial.

Anhand der aufgeführten Kriterien wurde in einem diskursiven Prozess zwischen Projektteam, UBA und SBK auf Basis einer semiquantitativen Vorabbewertung eine Auswahl getroffen. Dabei wurden die Bewertungen von niedrigem bis hohem Potenzial an unterschiedlichen Materialien wie Basis-, Edel- und Sondermetallen sowie Kunststoffen und mineralischen nichtmetallischen Rohstoffen orientiert, die in den jeweiligen Gütergruppen von besonderem Interesse sind und in Relation zu deren Gesamtmarktvolumen betrachtet.

So wurde die folgende Liste an acht Aktionsfeldern abgeleitet, die eine besonders hohe Priorität in einer Strategieentwicklung zu einem nationalen Urban Mining Prozess einnehmen sollen:

- ▶ Aktionsfeld „Elektro-/Elektronikgeräte“,
- ▶ Aktionsfeld „Fahrzeuge“,
- ▶ Aktionsfeld „Lithium-Ionen-Batterien: Stationäre Anwendungen“,
- ▶ Aktionsfeld „Windkraftanlagen“,
- ▶ Aktionsfeld „Photovoltaikanlagen“,
- ▶ Aktionsfeld „Fossile und nukleare Kraftwerke“,
- ▶ Aktionsfeld „Mineralische Baustoffe im Hochbau sowie in Straßen und Brücken“,
- ▶ Aktionsfeld „Kunststoffe im Hoch- und Tiefbau“.

Die maßgeblich zur Auswahlentscheidung beitragenden Bewertungsausprägungen, welche ein hohes Potenzial repräsentieren, sind in Tabelle 1 in einer vereinfachten Heat Map aufgeführt. Kategorien mit hohem Potenzial für die einzelnen Aktionsfelder sind jeweils grün markiert. Diese Auswahl stellt nicht darauf ab, dass die Bewertung mit durchschnittlichen Potenzialen irrelevant ist.

Tabelle 1: Bewertungskategorien mit hohen Ausprägungen der Aktionsfelder

Aktionsfeld	Menge im anthropogenen Lager – Ist-Zustand	Menge im anthropogenen Lager - zukünftiges Potenzial	Dynamische technologische Entwicklung / Veränderung	Hohe Relevanz für strategische Rohstoffe	Einfache Erreichung reiner Sekundärrohstoffe	Starkes Einsparpotenzial für Treibhausgasemissionen und bei anderen Umweltwirkungskategorien	Bislang hohes ungenutztes Verwertungspotenzial
Elektro-/Elektronikgeräte		hohes Potenzial	hohes Potenzial	hohes Potenzial	hohes Potenzial		
Fahrzeuge	hohes Potenzial	hohes Potenzial	hohes Potenzial	hohes Potenzial		hohes Potenzial	hohes Potenzial
LIB: Stationäre Anwendungen		hohes Potenzial	hohes Potenzial	hohes Potenzial		hohes Potenzial	
		hohes Potenzial		hohes Potenzial	hohes Potenzial	hohes Potenzial	
LIB: Stationäre Anwendungen		hohes Potenzial	hohes Potenzial	hohes Potenzial		hohes Potenzial	
Windkraftanlagen		hohes Potenzial		hohes Potenzial	hohes Potenzial	hohes Potenzial	
Photovoltaikanlagen	hohes Potenzial	hohes Potenzial	hohes Potenzial	hohes Potenzial		hohes Potenzial	hohes Potenzial
Fossile und nukleare Kraftwerke	hohes Potenzial	hohes Potenzial		hohes Potenzial	hohes Potenzial	hohes Potenzial	
Mineralische Baustoffe im Hoch- und Tiefbau sowie Straßen und Brücken	hohes Potenzial	hohes Potenzial			hohes Potenzial		hohes Potenzial
Kunststoffe im Hoch- und Tiefbau							hohes Potenzial

Legende: Grün = hohes Potenzial

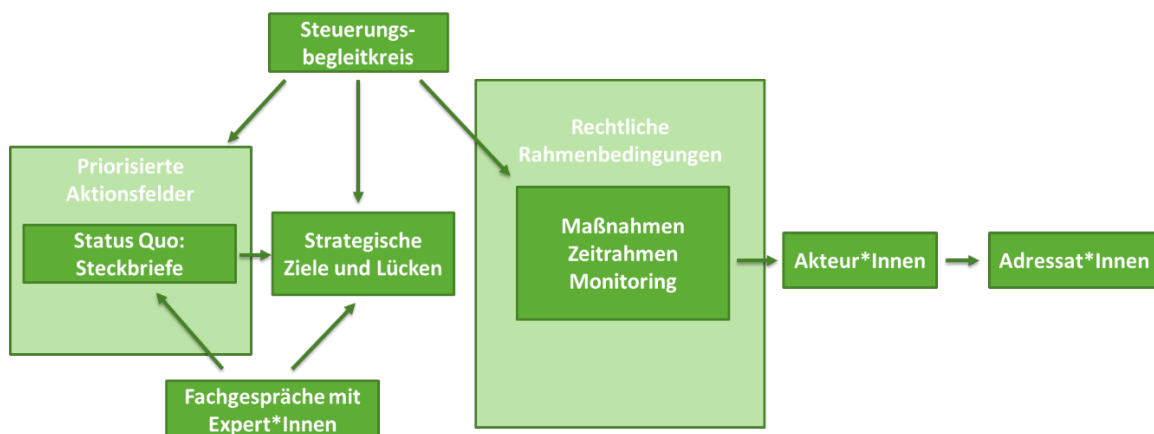
Trotz der grundsätzlichen Bedeutung von Deponien und Ablagerungen/Halden wurde dieses Teilsegment nach intensiver Abstimmung mit dem UBA nicht für die Strategieentwicklung zu einem nationalen Urban Mining Prozess priorisiert. Dies ist der sehr großen Heterogenität von Deponien und Halden in Deutschland geschuldet, so dass eine Übertragbarkeit von Ansätzen zur Erschließung dieser Potenziale durch ein „landfill mining“ und damit verbundener Skaleneffekte kaum gegeben ist. Die betrachteten Mengenströme in Einzelprojekten sind für die allermeisten Materialien sehr gering. Außerdem stehen hierbei weniger die Rückgewinnung von Rohstoffen, sondern Fragen zu Nachsorgekosten und Landschaftsrekultivierung im Vordergrund, die mit besonderen, am eigentlichen Schutzgut ausgerichteten (Gesundheit, Boden, Wasser) Genehmigungsanforderungen einhergehen. Das BMFTR adressiert jedoch in seiner Forschungsagenda zum Urban Mining und zurückliegenden Förderschwerpunkten dieses Teilsegment des anthropogenen Lagers (BMFTR 2024a). So wurden zahlreiche Projekte bereits wissenschaftlich begleitet, die aber nur in wenigen Fällen zur Umsetzung eines Landfill minings mit veritablen Rückbauten führten. Insbesondere historische Halden bergbaulicher und metallurgischer Abfälle gelangen durch die Zielsetzungen des CRMA zur Steigerung der Selbstversorgungsraten bei kritischen und strategischen Rohstoffen erneut in den Blickpunkt.

Weiterhin kristallisierte sich im Diskussions- und Abstimmungsprozess mit dem SBK eine notwendige Befassung mit drei Querschnittsthemen der Urban Mining Strategie heraus:

- ▶ Schadstoffregulierung,
- ▶ Regionalisierung,
- ▶ Digitalisierung.

Diese drei Querschnittsthemen charakterisieren sich dadurch, dass sie im Gegensatz zu den Aktionsfeldern, die definierte Gütergruppen bzw. Infrastrukturen als wichtige Teilbereiche des anthropogenen Lagers mit den entsprechend eingebunden Materialien repräsentieren, wichtige übergreifende Themenkomplexe darstellen, die in erheblichem Maße Chancen aber auch Hemmnisse (siehe vor allem Schadstoffregulierung) für die Umsetzung einer Urban Mining Strategie beinhalten.

Abbildung 6: Schema des Prozesses zur Ausgestaltung und Umsetzung der Maßnahmen in der Urban Mining Strategie für die jeweils priorisierten Aktionsfelder



Quelle: eigene Darstellung

Für alle priorisierten Aktionsfelder wurden zunächst die relevanten Potenziale sowie die bestehenden Rahmenbedingungen (z. B. spezifische EU-rechtliche Regelungen zur

Kreislaufwirtschaft) identifiziert. Anschließend wurden strategische Lücken zur Erschließung der Potenziale aufgedeckt. Schließlich wurden aussichtreiche Maßnahmen zusammengestellt, um diese strategischen Lücken zu schließen. In diesem Zuge wurden für die als prioritär eingestuften Maßnahmen Schritte zur Umsetzung vorgeschlagen (je nach Art der Maßnahmen: verantwortliche Akteur*innen für die Umsetzung, Zeitstrahlen zur Umsetzung, Monitoringroutinen zur Erfolgskontrolle etc.). Diese Arbeiten wurden über Diskussionen mit Stakeholder*innen in fokussierten Fachworkshops und im fortgesetzten Dialog mit dem SBK vorangetrieben.

Die Ergebnisse dieser Prozesse zu den prioritären acht Aktionsfeldern werden in Abschnitt 3 jeweils untergliedert nach strategischen Zielen, identifizierten strategischen Lücken und schließlich prioritären Maßnahmen dargelegt.

Den acht Aktionsfeldern sind ergänzend im Anhang Steckbriefe zugeordnet, welche jeweils den Status Quo für das Aktionsfeld sowie die je Aktionsfeld identifizierten, relevanten Rohstoffe, die entsprechenden Sekundärrohstoffpotenziale und die Handlungsbedarfe im Aktionsfeld beschreiben. Die skizzierten Handlungsbedarfe in den Steckbriefen bilden die Schnittstellen zu den Ausführungen zu den Aktionsfeldern in Abschnitt 3. In Abschnitt 4 sind die Ergebnisse zu den drei Querschnittsthemen der Urban Mining Strategie dokumentiert. Das Kapitel 5 schließt mit konkreten Vorschlägen zur Strategieumsetzung – untergliedert in die Unterabschnitte 5.1 Kohärenz mit anderen Strategien, 5.2 Maßnahmen, Instrumente, Akteur*innen und Zeitrahmen sowie Erfolgskontrolle, Indikatoren und Monitoring.

3 Aktionsfelder der Urban Mining Strategie

3.1 Aktionsfeld „Elektro/nikgeräte“

Die kontinuierlich seit Jahren steigende Menge der in Verkehr gebrachten Elektro- und Elektronikgeräte führt in Kombination mit der ohnehin niedrigen und weiter rückläufigen Sammelquote von Altgeräten zu einem stetig wachsenden anthropogenen Lager (vgl. A.1).

Um die ökologischen und sozialen Auswirkungen der Herstellung und Entsorgung von Elektrogeräten zu reduzieren, braucht es ambitionierte Vorgaben und die Beteiligung der Endnutzer*innen. In der Urban-Mining-Strategie werden Ansätze priorisiert, die die Sammelstrukturen und die Qualität des Recyclings verbessern.

Aus Sicht des Klima- und Ressourcenschutzes sind Ziele und Maßnahmen, die die Wiederverwendung, das Produktdesign und eine Verlängerung der Lebensdauer fördern, zentrale Elemente, die es parallel dringend auszubauen gilt. Diese Zielstellung wird in der Nationalen Kreislaufstrategie im Handlungsfeld „IKT und Elektro(nik)geräte“ aufgegriffen.

3.1.1 Elektro/nikgeräte - Strategische Ziele

EAG-SZ-1: Erhöhung der Sammelquote und Sammelmengen zur Einhaltung der europäischen Vorgaben

Deutschland verfehlt die seit 2019 von der EU vorgegebene Sammelquote von 65 % deutlich. Mit einer Sammelquote von nur 29,5 % im Jahr 2023 liegt Deutschland im europäischen Vergleich abgeschlagen auf einem hinteren Platz. Ziel muss es sein, die ambitionierten Quoten der EU zu erfüllen, auch um Strafzahlungen zu verhindern. Aufgrund der dauerhaften Unterschreitung der Sammelquote wurde von der EU bereits ein Vertragsverletzungsverfahren gegen Deutschland eingeleitet.

EAG-SZ-2: Stärkung der Verbraucherinformation und Öffentlichkeitsarbeit

Ein Elektroaltgerät der Entsorgung zuzuführen, sollte genauso einfach sein wie der Kauf eines Neuproduktes. Dafür braucht es für Endnutzer*innen niedrigschwellige Sammelangebote, das Bewusstsein um die Folgen der falschen Entsorgung sowie Wissen um den richtigen Umgang mit Altgeräten nach der Nutzungszeit.

3.1.2 Elektro/nikgeräte - Strategische Lücken

EAG-SL-1: Fehlende Rückgewinnung von strategisch wichtigen Rohstoffen

Die Massenmetalle wie Eisen, Aluminium und Kupfer sowie Edelmetalle wie Gold, Silber und Palladium werden in der Regel in hohen Anteilen zurückgewonnen. Die Separation und das Recycling von technologisch wichtigen Sondermetallen, die häufig nur in kleinen Mengen in den Geräten vorliegen, sind hingegen nicht wirtschaftlich und führen zu hohen Verlusten.

EAG-SL-2: Gesetzeslücke bezgl. Online-Händler *innen aus dem Ausland und Online-Plattformen

Rund 40 % der Elektrogeräte werden in Deutschland online gekauft, entweder direkt über die Online-Shops der Händler*innen oder über Online-Plattformen. Das Elektrogesetz (ElektroG 2022) enthält jedoch keine Vertreiberpflichten für Online-Plattformen und Online-Händler*innen, deren Lager- und Versandflächen außerhalb Deutschlands liegen. Dies benachteiligt sowohl den inländischen Online-Handel als auch den stationären Handel, die jeweils ab einer Versand- und Lagerfläche von 400 m² den Vertreiber*innenpflichten unterliegen. Ohne die Registrierungspflicht wird zudem der Import illegaler Geräte erleichtert, die auffallen durch Sicherheitsmängel und erhöhte Schadstoffgehalte.

EAG-SL-3: Illegaler Export recycelbarer Altgeräte

Signifikante Anteile der als gebraucht exportierten Geräte sind als Abfall einzustufen. Die Sammlung und der Export erfolgen illegal. Die „Entsorgung“ der Geräte in Ländern ohne die erforderliche technische Infrastruktur und sozialen Standards führt zu massiven ökologischen und gesundheitlichen Schäden in den Exportländern. Zudem sind die Wertstoffe für den nationalen oder europäischen Markt verloren.

3.1.3 Elektro/nikgeräte – Maßnahmen

Regulatorische Maßnahmen

EAG-R-1: Überarbeitung der Sammelquotenmethodik und Sammelsystem

Die Hersteller werden verpflichtet, sich auf Basis der in Verkehr gebrachten Menge, an Herstellersammelsystemen zu beteiligen, um die Erreichung der Sammelquoten sicherzustellen. Dafür sind entweder eigene Systeme aufzubauen oder dessen Finanzierung sicherzustellen. Die Sammelquoten sollten in Abhängigkeit der Nutzungsdauer oder des Gerätetyps differenziert werden, um die Sammelquoten realistischer an die Nutzungspraxis anzupassen.

EAG-R-2: Niedrigschwellige Rückgabe ermöglichen

Rücknahme und Informationspflichten werden auf kleinere stationäre Handelsunternehmen ausgeweitet (von derzeit 400 m² auf 100 m²). Zudem ist eine Rücknahme von Geräten mit einer Kantenlänge von max. 50 cm nicht an den Kauf eines Neugerätes gekoppelt. Aber auch die Netzichte und Erreichbarkeit kommunaler Sammelstellen soll weiter gestärkt werden. Die Finanzierung der Erfassung soll von den Herstellern der in Verkehr gebrachten Geräte zum Erreichen ihrer verbindlichen Sammelquoten unterstützt werden.

EAG-R-3: Erweiterte Hersteller*innenverantwortung im ElektroG ausweiten

Online-Händler*innen mit Lager- und Versandflächen im Ausland sowie im Ausland ansässige Online-Händler*innen müssen analog zu den in Deutschland ansässigen Händler*innen der erweiterten Herstellerpflicht unterliegen. Können die Pflichten nicht durch den*die Händler*in selbst erfüllt werden, ist ein*e in Deutschland ansässiger Erfüllungsgehilf*in zu beauftragen und zu registrieren, z. B. ein beauftragtes Sammelsystem. Ebenso sind diese Online-Händler*innen in die Erfüllung der Sammelorte verpflichtend mit einzubeziehen (vgl. EAG-R-1).

EAG-R-4: Einführung separater Recyclingquoten für Kunststoffe und Technologiemetalle

Laut ElektroG gilt eine gemeinsame Quote für das Recycling aller Stoffe und die Vorbereitung zur Wiederverwendung, je nach Gerätekategorie zwischen 55 bis 80 %. Für alle 6 Gerätekategorien wurden die Quoten im Jahr 2023 erfüllt. Die Quote ist zu differenzieren nach Kunststoffen und Technologiemetallen (wie z. B. Lithium, Indium, Tantal oder seltene Erden), um nicht nur über das Recycling der profitablen Massenmetalle wie Eisen, Kupfer und Aluminium, die Quote zu erfüllen.

EAG-R-5: Vollzug des Exportverbots von nicht funktionsfähigen Geräten

Durch die Vernetzung nationaler und internationaler Behörden ist die Kontrolle der zum Gebrauchtgeräteexport angedachten Altgeräte zu intensivieren. Ebenso müssen die regionalen *illegalen* Sammelplätze geschlossen bzw. Schrottplätze, die nicht autorisiert sind, EAG anzunehmen, besser kontrolliert werden.

Informatorische Maßnahmen

EAG-I-1: Informations- und Aufklärungskampagnen

Insbesondere die regelmäßige und sich wiederholende Informationsbereitstellung kann zu dauerhaften Verhaltensänderungen führen. Die Datensicherheit bzw. die Löschung sensibler Daten sollten einen Schwerpunkt der Kampagnen darstellen, da dies als ein zentrales Hemmnis für die Abgabe von Handys, Laptops und Computern identifiziert wurde.

EAG-I-2: Förderung gezielter Sammelaktionen inkl. Sensibilisierung und Aufklärung

Durchführung von Sammelaktionen in Schulen und öffentlichen Einrichtungen in Kooperation mit kommunalen oder privaten Entsorgungsbetrieben, um Sammelmengen zu erhöhen und gleichzeitig das Bewusstsein und den Wissensstand zur Entsorgung von Elektroaltgeräten zu verbessern. Hierbei soll eine breite Aufklärung über die Umweltwirkungen insb. von IKT und Unterhaltungselektronik mitsamt der dahinterliegenden Infrastruktur wie Rechenzentren sowie den Konsequenzen illegaler Sammlung erfolgen. Die Unterstützung oder Finanzierung dieser Sammelaktionen durch die Hersteller*innen kann als Beitrag zur Erfüllung der Sammelquoten gemäß EAG-R-1 verstanden werden.

EAG-I-3: Zentrale Informationsplattform zu allen Rückgabestellen

Alle Sammelstellen müssen ihren Standort an die Stiftung *elektro-altgeräte register* melden. So kann über die Internetplattform *e-schrott-entsorgen.org* und den sogenannten *E-Schrott-Rücknahmefinder* ein zentrales Informationsangebot der Sammelstellen online zur Verfügung gestellt werden.

Ökonomische Maßnahmen

EAG-Ö-1: Einführung eines Pfandsystems für bestimmte Produktgruppen

Elektrogeräte mit

- a) integrierten, (nicht-) abnehmbaren Batterien oder Akkus oder
- b) Geräte kurzer Nutzungsdauer (z.B. Einweggeräte) oder
- c) Geräte mit besonders hohem Recyclingpotenzial (wertvolle oder kritische Rohstoffe)

werden über ein Pfandsystem erfasst. So können höhere Rückläufe sichergestellt werden und das Brandrisiko durch Fehlwürfe reduziert werden. Anzustreben wäre ein Verbot von bestimmten elektronischen Einweggeräten, nach dem Vorbild von Frankreich, Belgien und Großbritannien (Verbot von Einweg-E-Zigaretten).

3.2 Aktionsfeld „Fahrzeuge“

Aufgrund der hohen Stückzahlen (vgl. Anhang A.2) bilden Fahrzeuge in Deutschland ein signifikantes anthropogenes Lager. Sie sind das mengenmäßig bedeutendste Konsumgut in privaten Haushalten. Insbesondere mit dem Antriebswechsel hin zu Elektromobilität sowie der steigenden Anzahl von (elektronischen) Ausstattungselementen steigt zudem der Einsatz von kritischen Rohstoffen immer weiter an (Lithium, Kobalt etc. für Traktionsbatterien, Seltenerdelemente wie Neodym etc. für die Permanentmagnete der Elektromotoren).

Der Bereich „Fahrzeuge und Batterien, Mobilität“ ist aus diesem Grund in der NKWS bereits als prioritäres Handlungsfeld enthalten, wobei als Hauptziele die Steigerung der Recyclingfähigkeit sowie die Förderung des Gebrauchtteilemarktes genannt sind. Die strategischen Ziele der Urban Mining Strategie im Fahrzeugsektor decken sich weitestgehend mit bereits adressierten Aspekten, die in der NKWS dafür aufgeführten Maßnahmen zielen jedoch in vielen Fällen auf das

Design und damit die Recyclingfähigkeit zukünftig auf den Markt gebrachter Fahrzeuge ab, während in der Urban Mining Strategie die funktionierenden Recyclingketten im Zentrum stehen.

3.2.1 Fahrzeuge - Strategische Ziele

FZ-SZ-1: Steigerung des Rezyklatanteils in allen Bauteilen

Die Verwendung von Rezyklaten ist einer der Hebel zur Reduktion des Primärrohstoffverbrauchs in der Automobilherstellung. Eine Steigerung der Trennung von Materialien und das Herstellen von Sortenvielfalt während des Fahrzeugrecyclings ist Grundlage dafür, um einen Rezyklateinsatz im anspruchsvollen Fahrzeugsektor zu ermöglichen (Baron et al. 2023). Auch in Zeiten niedriger Rohstoffpreise benötigt Rezyklat einen Absatzmarkt, um Investitionssicherheit für heutige Entscheidungen zu begünstigen und seine Verwendung sicherzustellen.

FZ-SZ-2: Rückgewinnung und Wiederverwertung von kritischen Rohstoffen aus Batterien und Elektromotoren

Der Materialbedarf an kritischen Materialien für EV-Batterien und Elektromotoren wird mit dem Hochlauf der Elektromobilität weiter stark ansteigen (Buchert et al. 2023). Die Wertschöpfungsketten für Primär- sowie Sekundärmaterialien sind dabei oft stark abhängig von einigen wenigen Ländern. Eine teilweise Deckung des Bedarfs durch vor Ort zurückgewonnene Rezyklate ist deshalb erstrebenswert. Zusätzlich wird auf eine Verringerung des Abflusses von Material aufgrund von illegalem Export von Altfahrzeugen abgezielt, um die verfügbare Menge an Rezyklaten zu steigern und zur Resilienz der hiesigen Industrie beizutragen.

3.2.2 Fahrzeuge - Strategische Lücken

FZ-SL-1: Demontage/Trennung von Materialien

Zur Rückgewinnung hochwertiger Rezyklate ist zunächst eine effiziente Trennung der verschiedenen im Fahrzeug verbauten Materialien vonnöten. Dies ist in vielen Fällen nach dem gemeinsamen Schreddern verschiedener Fahrzeugteile technisch nicht mehr möglich. Dies führt dazu, dass wie beispielsweise im Fall von mit Kupfer verunreinigtem Stahl die Qualität des gewonnenen Sekundärmaterials oft nicht mehr ausreicht, um dieses im Fahrzeugbau einzusetzen. Die vorherige Demontage von Bauteilen vor der Verwertung mit dem Ziel des Recyclings wird bisher hauptsächlich aus ökonomischen Gründen nicht betrieben.

FZ-SL-2: Kapazitäten für hochwertiges Recycling einzelner Materialien

Für die Rückgewinnung bestimmter Materialien besteht weder eine Pflicht noch ein wirtschaftlicher Anreiz. Dies ist beispielweise für die meisten verbauten Kunststoffteile der Fall. Zudem werden auch Permanentmagnete aus Elektromotoren, die als kritische Rohstoffe eingestufte Seltene Erden enthalten, momentan in Deutschland kaum demontiert und zurück in den Kreislauf geführt. Auch für Lithium-Ionen-Batterien hängt die Frage, ob Material rezykliert wird, stark davon ab, ob es sich um werthaltige Materialien wie Nickel oder Kobalt handelt. Andernfalls ist die Rückgewinnung für die entsprechenden Verwerter*innen bisher nicht wirtschaftlich. In allen drei genannten Fällen sind aufgrund dessen bisher keine ausreichend großen Kapazitäten für hochwertiges Recycling vorhanden bzw. werden vorhandene Kapazitäten nicht immer ausgelastet. Darüber hinaus gibt es keine Investitionssicherheit für neue Kapazitäten.

FZ-SL-3: Sicherstellung der Rückführung

Um sicherzustellen, dass Materialien unter hohen ökologischen Standards effizient wieder in den Kreislauf geführt werden können, ist deren Verbleib innerhalb Deutschlands zentral. Der illegale Export von Altfahrzeugen sowie der Export von Schwarzsand aus dem Recycling von Lithium-Ionen-Batterien führt hier jedoch zu einem nicht unerheblichen Materialverlust.

FZ-SL-4: Informationsfluss zwischen Hersteller*in und Verwerter*in

Dem / der Verwerter*in liegen notwendige Informationen über das Fahrzeug bzw. dessen kritischen Komponenten, wie der Traktionsbatterie, nicht oder nicht in sinnvoller Art und Weise vor, um eine effiziente Materialtrennung zu unterstützen. Dies beinhaltet Wissen über den Zustand, die Zusammensetzung und die beste Ausbauweise.

3.2.1 Fahrzeuge - Maßnahmen

Regulatorische Maßnahmen

FZ-R-1: Export von Gebrauchtfahrzeugen nur bei gültiger Straßenzulassung in der EU

Um den Abfluss größerer Materialmengen in Form von illegal ins nicht-EU-Ausland exportierten Altfahrzeugen zu verhindern, wird der Export von Gebrauchtfahrzeugen nur bei vorliegender gültiger Straßenzulassung in der EU erlaubt. Hier ist neben der Festlegung der Regulatorik zudem die finanzielle Stärkung des Vollzugs essenziell, um die Überprüfung zu gewährleisten.

FZ-R-2: Separationspflicht für bestimmte Bauteile

Wie bereits im Vorschlag für die Altfahrzeugrichtlinie der EU vorgesehen, ist eine Separationspflicht für Bauteile, deren Materialien sich nachweislich ansonsten nicht hochwertig recyceln lassen, ein gutes Mittel, um die Recyclingrate zu erhöhen.

FZ-R-3: Stoffspezifische Rezyklateinsatzquoten

Für Materialien, deren Rückführung in den Kreislauf sich momentan wirtschaftlich nicht lohnt, wird mit stoffspezifischen Rezyklateinsatzquoten der Markt für Rezyklate angekurbelt. So werden mit „Pull-Effekten“ vom Ende der Recyclingkette Anreize für die Rückgewinnung gesetzt. Dies ist besonders für Kunststoffe sowie Seltene Erden relevant. Für Batteriematerialien sind bereits in der Batterieverordnung der EU stoffspezifische Rezyklateinsatzquoten festgelegt, an denen festgehalten werden sollte (BattVO 2023).

Informativische / organisatorische Maßnahmen

FZ-I-1: Digitaler Kreislaufpass für Fahrzeuge

Ein digitaler Kreislaufpass, wie bereits im Vorschlag für die neue EU-Altfahrzeugverordnung angedacht, wird eingeführt. Eine Aktualisierung über den gesamten Lebensweg des Fahrzeugs hinweg (beispielsweise bei Reparaturen oder Upgrades) stellt sicher, dass dem*der Verwerter*in die aktuelle Zusammensetzung bei Entgegennahme vorliegt.

Ökonomische Maßnahmen

FZ-Ö-1: Abgabe bei Inverkehrbringung eines Fahrzeugs zur Finanzierung der Recyclingsysteme bestimmter Komponenten

Für die Inverkehrbringer*innen wird eine Abgabe zur Finanzierung des Recyclings eingeführt, um den Aufbau von Kapazitäten für das hochwertige Recycling mit Pre- und Post-Shredder-Technologie direkt finanziell zu unterstützen. Gefördert werden sollten dabei vor allem das hochwertige Recycling von Kunststoffen, Permanentmagneten und Batterien. Dies ergänzt die Anreize, die durch Rezyklateinsatzquoten erreicht werden.

FZ-Ö-2: Staatliche Förderung des Aufbaus von Kapazitäten hochwertiger Recyclingprozesse

Um das Recycling weiterzuentwickeln, fördert der Staat Forschung zum hochwertigen Recycling – insbesondere zur automatisierten, KI-gestützten Demontage und Sortierung von Materialien – und begünstigt Investitionen für den Aufbau von Kapazitäten neuer und bestehender

Recyclingverfahren. Auch eine organisatorische Förderung (z. B. erleichterte Erteilung von Genehmigungen) wäre denkbar.

3.3 Aktionsfeld „Lithium-Ionen-Batterien: Stationäre Anwendungen“

Neben dem Elektrofahrzeugsektor bilden stationäre Anwendungen als Stromspeicher zur Stabilisierung des Stromnetzes ein zweites großes Einsatzfeld für Lithium-Ionen-Batterien. Laut Batterieverordnung der EU stellen diese eine Unterkategorie der Industriebatterien dar (BattVO 2023). Da der Markt für stationäre Stromspeicher sich mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien zum momentanen Zeitpunkt gerade erst entwickelt (vgl. Anhang A.3), wurden bisher weitestgehend die Technologien aus dem Fahrzeugsektor übernommen. Der Hauptunterschied liegt aufgrund der etwas niedrigeren Anforderungen an Volumen und Energiedichten darin, dass tendenziell weniger kritische und teure Rohstoffe genutzt werden, wodurch deren Rückgewinnung oft weniger wirtschaftlich für den Verwerter ist.

3.3.1 Lithium-Ionen-Batterien: Stationäre Anwendungen - Strategische Ziele

LIB-SZ-1: Effiziente, anwendungsübergreifende Sammlung und Verwertung

Die effiziente Rücknahme stationärer Energiespeichersysteme, insbesondere aus dem privaten Gebrauch, ist zentral. Um die Gesamtmengen zu erhöhen und damit den Aufbau von (großtechnischen) Recyclinganlagen zu unterstützen, ist die anwendungsübergreifende Sammlung und Verwertung sinnvoll.

LIB-SZ-2: Steigerung der Verfügbarkeit von hochwertigen Rezyklaten

Zur Etablierung der gesamten Wertschöpfungskette für Lithium-Ionen-Batterien in Europa wird unter anderem hochwertiges Sekundärmaterial benötigt. Dafür stellt der Verbleib der aus Batterien gewonnene Schwarzmasse in Europa und die Rückgewinnung möglichst aller Rohstoffe daraus die Grundlage dar. Dies ist auch metallurgisch und anlagentechnisch mit Erfahrungskurveneffekten verbunden, die die Wettbewerbsfähigkeit stärken.

3.3.2 Lithium-Ionen-Batterien: Stationäre Anwendungen - Strategische Lücken

LIB-SL-1: Kapazitäten für alle Schritte im Recycling

Für die effiziente Nutzung des Sekundärrohstoffpotenzials aus Lithium-Ionen-Batterien fehlen Kapazitäten für das hochwertige Recycling. Während für die Erstbehandlung und Schwarzmasseproduktion ausreichende Kapazitäten im Aufbau oder in Planung sind, geht der Ausbau der Endrefining-Kapazitäten nur schleppend voran. Dies hat zur Folge, dass die produzierte Schwarzmasse und damit die enthaltenen Sekundärrohstoffe in relevanten Mengen die EU verlassen. Ein großes Hemmnis des Kapazitätsaufbaus ist die Finanzierung der zum Endrefining benötigten großtechnischen Anlagen, insbesondere für Zellchemien, die weniger werthaltige Materialien beinhalten.

LIB-SL-2: Effiziente Sammlung

Da Heimspeicher in Privatbesitz den größten Teil der LIB in stationären Anwendungen ausmachen, ist es hier besonders wichtig, eine flächendeckende Rücknahmestrategie zu entwickeln. Derzeit werden Nutzer*innen beim Kauf eines stationären Speichers kaum über den Rückbau und die ordnungsgemäße Rückgabe informiert.

LIB-SL-3: Informationsfluss zwischen Hersteller*in und Verwerter*in

Für Verwerter*innen von LIB sind Informationen über deren Zusammensetzung, deren Zustand und die Möglichkeit der Demontage essenziell. Im stationären Bereich werden auch Batterien

aus anderen Bereichen wie dem Fahrzeugsektor eingesetzt. Gerade dort stellt der Erhalt der genannten Information auch aufgrund des langen Lebenszyklus eine Herausforderung dar.

3.3.3 Lithium-Ionen-Batterien: Stationäre Anwendungen - Maßnahmen

Regulatorische Maßnahmen

LIB-R-1: Einschränkung des Exports von Schwarzmasse in nicht-EU-Länder

Um die in LIB enthaltenen Sekundärrohstoffe innerhalb Europas zu halten und damit die Rohstoffversorgung für die Batterieherstellung zu stärken, wird der Export von Schwarzmasse in nicht-EU-Länder durch Vorgaben bzgl. Recyclingeffizienz, ökologischen, sozialen und arbeitssicherheitsbezogenen Aspekten erschwert.

Informatorische Maßnahmen

LIB-I-1: Ausgestaltung des Batteriepasses

Zur Unterstützung des Recyclings von LIB sind bei der Ausgestaltung des in der Batterieverordnung der EU (BattVO 2023) angelegten Batteriepasses insbesondere für das Recycling relevante Informationen digital zu hinterlegen. Damit sollen den Akteur*innen der Kreislaufwirtschaft effizient die notwendigen Informationen für das Recycling zugänglich gemacht werden.

Ökonomische Maßnahmen

LIB-Ö-1: Förderung des Kapazitätsaufbaus für hochwertiges Recycling

Für den Ausbau der aktuell vorhandenen Kapazitäten von Anlagen zum Recycling von LIB sind finanzielle Förderungen von Forschungsvorhaben zu innovativen Recyclingverfahren bis hin zur Anschubfinanzierung und organisatorischen Unterstützung vom Aufbau entsprechender Anlagen notwendig. Damit soll der dringend notwendige Ausbau der aktuell vorhandenen Kapazitäten robust unterstützt werden.

LIB-Ö-2: Finanzierung des Recyclings durch Abgabe bei Inverkehrbringung

Für Batterien, die weniger werthaltige Materialien enthalten, ist die Verwertung zum Teil für Recyclingunternehmen nicht wirtschaftlich. Um die Wirtschaftlichkeit der Verwertung auch in diesen Fällen zu gewährleisten, wird bei Inverkehrbringung eine entsprechende Abgabe zur Finanzierung des Recyclings gezahlt. Dies kann im Rahmen einer Beteiligung bei einer Organisation zur Herstellerverantwortung (PRO) geschehen, welche sich um die Sammlung, das Recycling und die dazugehörigen Berichtspflichten kümmert.

3.4 Aktionsfeld „Windenergieanlagen“

Aufgrund des weiterhin großen Wachstumspotenzials sind Erneuerbare-Energien-Anlagen ein weiteres prioritäres Handlungsfeld in der NKWS. Die erklärten Ziele beziehen sich dabei zum Teil auf das Design zukünftiger Anlagen, zum Teil jedoch auch auf den Rückbau und die Verwertung bereits gebauter Anlagen.

Während die Hauptgewichtsanteile von Windenergieanlagen (WEA) weniger problematisch sind und analog zu anderen Bauwerken behandelt werden können (vgl. Anhang A.4), enthalten diese einige weitere Komponenten bzw. Materialien, die eine gesonderte Betrachtung erfordern.

Hierzu gehören zum einen die Rotorblätter, die aus Glas- oder Kohlefaserverstärkten Kunststoffen (GFK bzw. CFK) bestehen. Zum anderen enthalten die meisten neueren Anlagen Permanentmagnete aus Seltenen Erden (neben einigen Generatoren auch in bestimmten, kleineren Motoren). Aufgrund der langen Lebensdauer von WEA sind die Rückläufe in den Kreislauf bisher sehr moderat. Mit dem kontinuierlichen Ausbau der erneuerbaren Energien und des Repowerings

bestehender Standorte mit leistungsstärkeren Anlagen, werden diese allerdings in der Zukunft voraussehbar ansteigen, was ein verbessertes Management dieses Abfallstroms sinnvoll erscheinen lässt.

3.4.1 Windenergieanlagen - Strategische Ziele

WEA-SZ-1: Verbessertes Management des Rückbaus und der Verwertung von WEA

Ziel einer flächendeckenden Strategie für Rückbau und Verwertung von WEA sollte eine höherwertige Verwertung von faserverstärkten Kunststoffen und eine Schließung des Kreislaufs für Permanentmagneten sein. Hierzu gehören insbesondere die Trennung der verschiedenen enthaltenen Materialien bzw. der Ausbau der enthaltenen Permanentmagnete. Für zukünftig gebaute Windkraftanlagen sollte außerdem frühzeitig der Zugang zu verwertungsrelevanten Informationen bis zum Lebensende sichergestellt werden, um den Rückbau zu erleichtern. Bei den Zielen zur Rückgewinnung kritischer Rohstoffe sowie zur besseren Verwertung von Rotorblättern geht diese Strategie Hand in Hand mit der NKWS.

3.4.2 Windenergieanlagen - Strategische Lücken

WEA-SL-1: Kosten des Rückbaus

Der Rückbau und das hochwertige Recycling von WEA sind nicht in jedem Fall kostendeckend. Aufgrund der langen Standzeiten sind die ursprünglichen Inverkehrbringer oft am Lebensende nicht mehr am Markt. Die Frage der Kostenübernahme für den Rückbau ist in diesem Fall zum Teil ungeklärt.

WEA-SL-2: Für den Rückbau relevante Informationen zur Zusammensetzung

Die lange Lebensdauer hat außerdem zur Folge, dass Informationen zum genauen Aufbau und der Zusammensetzung der WEA an ihrem Lebensende nicht mehr verfügbar sind. Wenn zum Beispiel keine Informationen zur Menge und Position von Kohlefaserverstärkten Kunststoffen vorliegen, behindert dies den sicheren Rückbau und die schadlose Verwertung in Aufbereitungsbetrieben. Auch werden Permanentmagnete nicht ausgebaut, sondern geschreddert und gehen damit verloren.

WEA-SL-3: Schlechte Recyclingfähigkeit von Faserverbundstoffen

Es gibt bisher keine ausgereiften Verfahren in großem Maßstab für das Recycling von GFK. Für CFK werden bisher nur Produktionsschrotte recycelt, um die Fasern für Anwendungen mit geringen Anforderungen zurückzugewinnen. Recyclingfähige Materialien mit ähnlichen Eigenschaften sind nicht verfügbar.

WEA-SL-4: Recycling von Permanentmagneten mit Seltenen Erden als Rohstoffe mit kritischer Wertschöpfungskette

Die Kreislaufführung von Permanentmagneten ist nicht etabliert. Diese gehen bisher samt der darin enthaltenen Seltenen Erden verloren, da der Ausbau beim Rückbau von WEA bisher nicht gewährleistet ist. Zusätzlich mangelt es, wie für den Fahrzeugsektor schon diskutiert (vgl. Abschnitt 3.2), auch an Kapazitäten für deren (hochwertiges) Recycling einschließlich der erneuten Permanentmagnetproduktion.

3.4.3 Windenergieanlagen - Maßnahmen

Regulatorische Maßnahmen

WEA-R-1: Verpflichtender Ausbau und Recycling von Permanentmagneten

Um die Rohstoffversorgung für Permanentmagnete zumindest zum Teil aus den vorhandenen Sekundärquellen decken zu können, wird eine Pflicht zum Ausbau von Permanentmagneten aus WEA und deren Zuführung zu einer entsprechenden funktionalen Verwertung eingeführt.

Informatorische Maßnahmen

WEA-I-1: Digitaler Kreislaufpass für Windenergieanlagen

Aufgrund des Informationsverlusts über den Aufbau und die stoffliche Zusammensetzung von WEA über die Lebenszeit werden diese bereits beim Bau langfristig an geeigneter Stelle gespeichert, sodass sie bei der Verwertung abrufbar sind. Dies soll in Form eines digitalen Produktpasses für Windenergieanlagen geschehen, dessen Einträge bei Upgrade- oder Repowering-Vorhaben jeweils im Laufe des Lebenszyklus ergänzt werden, sodass dem*der Verwerter*in der aktuelle Aufbau und die stoffliche Zusammensetzung gesichert vorliegen.

WEA-I-2: Kennzeichnungspflicht für kohlenstoffverstärkte Kunststoffe

Um kohlenstoffverstärkte Kunststoffe beim Rückbau von anderen unterscheiden zu können, werden diese in Zukunft explizit gekennzeichnet und mit einer entsprechenden Warnung versehen. Die Kennzeichnung beinhaltet eine Beschreibung eines möglichen Rückbaus ohne Exposition bzgl. Kohlenstofffasern.

Ökonomische Maßnahmen

WEA-Ö-1: Abgabe bei Bau einer Windkraftanlage für das Recycling

Um die Finanzierung des Rückbaus und des Recyclings einer WEA an ihrem (potenziell sehr weit in der Zukunft liegenden) Lebensende zu gewährleisten, wird bereits bei Bau/Inverkehrbringung eine Abgabe hierfür gezahlt.

WEA-Ö-2: Finanzielle Förderung von innovativen Recycling- und Produktionsprozessen für hochwertige Sekundärprodukte

Für die als prioritär identifizierten Felder der faserverstärkten Kunststoffe sowie Permanentmagnete wird die Entwicklung von hochwertigen Recycling- und Produktionsprozessen finanziell gefördert. Auch eine Förderung des Kapazitätsaufbaus in Form einer Anschubfinanzierung für entsprechende Anlagen wäre sinnvoll.

WEA-Ö-3: Förderung von Forschung zur Verbesserung des Recyclings von Rotorblättern

Die Forschungsförderung zur Verbesserung des Recyclings von Rotorblättern im Rahmen des Energieforschungsprogramms des BMWF wird, wie auch in der NKWS beschrieben, unbedingt weitergeführt und ggf. ausgebaut. Forschung zur Verbesserung der Behandlung von bereits existierenden Rotorblättern sowie zum Bau neuer, besser recyclingfähiger Varianten wird ebenfalls gefördert.

3.5 Aktionsfeld „Photovoltaikanlagen“

Im Gegensatz zu Windenergieanlagen, bei denen fast ausschließlich industriell betriebene Anlagen rohstofftechnisch relevant sind, unterscheiden sich Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) in zwei verschiedene große Nutzungsfelder. Einerseits gibt es analoge industriell betriebene Großanlagen. Andererseits machen die von Privatpersonen im Heimbereich installierten PV-Anlagen

einen beträchtlichen Anteil am Gesamt mengenstrom aus (vgl. Anhang A.5). Da beide Anwendungsfelder stark unterschiedliche Herausforderungen bei der Sammlung und Kreislaufführung mit sich bringen, muss dies in der entsprechenden Strategie berücksichtigt werden. Als Anlagen für erneuerbare Energien sind auch PV-Anlagen bereits in der NKWS mit verschiedenen Maßnahmen adressiert. Die strategischen Ziele, die sich direkt auf die Sekundärrohstoffrückgewinnung beziehen, werden in der Urban Mining Strategie vertieft.

3.5.1 Photovoltaikanlagen - Strategische Ziele

PVA-SZ-1: Effiziente Sammlung/Rücknahme zur Verfügungsstellung von Sekundärrohstoffen

Insbesondere für die Vielzahl an kleineren, im Privatbesitz befindlichen PV-Anlagen ist eine effiziente Sammlung und Rücknahme der entsprechenden Module essenziell, um das Sekundärrohstoffpotenzial optimal ausschöpfen zu können.

PVA-SZ-2: Rückgewinnung von hochwertigen Sekundärrohstoffen

Aus den gesammelten Modulen sollten möglichst hochwertige Sekundärrohstoffe zurückgewonnen werden. Hierunter fällt einerseits, dass neben Glas und Aluminium auch weitere Rohstoffe wie Silizium und Silber sowie im Falle von CI(G)S-Dünnschichtmodulen Rohstoffe wie Indium und Gallium zurückgewonnen werden. Andererseits heißt dies auch, dass die Qualität der bereits zurückgewonnenen Materialien, insbesondere des Recyclingglases aus PV-Modulen, erhöht wird, um die möglichen Einsatzzwecke des Sekundärmaterials auszuweiten.

3.5.2 Photovoltaikanlagen - Strategische Lücken

PVA-SL-1: Sammlung der Module

Die Vielzahl auf dem Markt befindlichen kleineren Module, die sich oft im Privatbesitz befinden, macht die Sammlung und Rücknahme logistisch kompliziert. Zwar dürfen PV-Module auf Wertstoffhöfen abgegeben werden. Hier fehlt jedoch oft geschultes Personal zur optimalen Sortierung und damit Weiterbehandlung. Durch nicht fachgerechten Abbau und Transport kommt es zudem häufig zu Schäden an den Modulen. Da bisher im Recycling meist nur die sortenreine Behandlung einzelner Modultypen möglich ist, werden diese oft nur getrennt entgegengenommen.

PVA-SL-2: Monitoring der Entsorgungswege und Stoffströme

Ein einmal in Verkehr gebrachtes PV-Modul wird in Deutschland über seinen Lebensweg hinweg nicht ausreichend weiterverfolgt. Dies führt dazu, dass Module zum Teil illegal entsorgt bzw. Altmodule ins Ausland exportiert werden. Eine Nachverfolgung der Module über den gesamten Lebensweg hinweg findet bisher auch aufgrund fehlenden Personals beim Vollzug nicht statt.

PVA-SL-3: Fehlender wirtschaftlicher Anreiz für die Rückgewinnung hochwertiger Sekundärrohstoffe

Aus den zurückgenommenen PV-Modulen wird oft ausschließlich Glas und Aluminium zurückgewonnen, wobei insbesondere für Glas die Qualität des Sekundärmaterials im Vergleich zu Primärmaterial wesentlich leidet. Für eine Rückgewinnung weiterer Rohstoffe wie Silizium und Silber bzw. eine Verbesserung der Qualität der zurückgewonnenen Materialien fehlt der wirtschaftliche Anreiz.

3.5.3 Photovoltaikanlagen - Maßnahmen

Regulatorische Maßnahmen

PVA-R-1: Rückgewinnungsquoten für Glas, Silizium und Silber aus PV-Anlagen

Die Sekundärrohstoffpotenziale für Glas, Silizium und Silber aus den marktdominierenden Silizium-basierten PV (c-Si)-Modulen werden bislang nur ungenügend erschlossen. In den nächsten Jahren und Jahrzehnten sind erhebliche wachsende Sekundärrohstoffpotenziale für diese Materialien zu erwarten (Siehe Anhang A.5). Daher sollen materialspezifische Rückgewinnungsquoten für Glas, Silizium und Silber eingeführt werden, die durch den Gesetzgeber vorgegeben werden.

Informatorische Maßnahmen

PVA-I-1: Standardisierung von Identifizierungsnummern, Digitaler Kreislaufpass für PV-Anlagen

Zur besseren Nachverfolgung des Lebenswegs und der Entsorgung einzelner PV-Module ist zunächst eine europaweit standardisierte Identifizierungsnummer notwendig. Diese kann beispielsweise im Rahmen eines digitalen Produktpasses mit dem entsprechenden Modul verknüpft werden. Im zweiten Schritt sollte diese bei Inbetriebnahme bzw. Anmeldung einer Anlage bei der Bundesnetzagentur automatisiert gemeldet werden, so dass die Hersteller*innenverantwortung bei Abmeldung nachvollziehbar ist.

PVA-I-2: Entsorgungsinformationen für Nutzer*innen

Bei Abmeldung einer PV-Anlage bei der Bundesnetzagentur sollten automatisch an den*die Nutzer*in (privat oder gewerblich) entsprechende Hinweise zur fachgerechten Entsorgung versendet werden.

Ökonomische Maßnahmen:

PVA-Ö-1: Finanzielle Förderung von innovativen Recycling- und Produktionsprozessen für hochwertige Sekundärprodukte

Die Förderung des Kapazitätsaufbaus innovativer Recyclingprozesse ist ebenfalls eine Maßnahme, die eine bessere Erschließung der wachsenden Sekundärrohstoffpotenziale aus ausgemusterten PV-Modulen unterstützen kann. Es geht hier ausschließlich um die finanzielle Förderung neuer, innovativer Verfahren, die entweder bislang kaum zurückgewonnene Stoffe wie Silizium oder Silber einem Recycling zuführen und/oder zu besseren Qualitäten (z.B. für Glas) der zurückgewonnenen Wertstoffe führen.

3.6 Aktionsfeld „Fossile und nukleare Kraftwerke“

Um die Energieversorgung von Bevölkerung und Wirtschaft sicherzustellen, werden in Deutschland Kraftwerke auf Basis fossiler Energieträger wie Braunkohle, Steinkohle und Erdgas betrieben. Im Jahr 2023 deckten fossile Kraftwerke rund 43 % der gesamten Stromerzeugung ab (Energy-charts 2025). Im Zuge der Energiewende nimmt dieser Anteil jedoch kontinuierlich ab. Der Rückbau dieser Anlagen gewinnt daher zunehmend an Bedeutung – nicht zuletzt, weil viele fossile Kraftwerke, insbesondere Stein- und Braunkohlekraftwerke, inzwischen über 30 Jahre alt sind. Die Kernenergie spielt seit dem 2011 beschlossenen Atomausstieg inzwischen keine Rolle mehr in der Stromerzeugung: Alle Kernkraftwerke in Deutschland sind mittlerweile abgeschaltet und befinden sich in der Stilllegung bzw. im Rückbau.

Mit Blick auf die im Kraftwerksbestand enthaltenen Materialien birgt der Rückbau erhebliche Potenziale für die Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen (siehe Anhang Steckbrief A.6).

Gleichzeitig stellt er eine komplexe Herausforderung dar. Fossile Kraftwerke unterscheiden sich in Bauweise, Materialien und technischer Ausführung teils erheblich, was individuelle Rückbau- und Sanierungsstrategien erfordert. Der Rückbau kerntechnischer Anlagen bringt zudem spezifische Anforderungen mit sich – insbesondere aufgrund der unterschiedlich hohen radioaktiven Kontaminationen einzelner Komponenten (Spieth-Achtnich et al. 2024).

Moderne Rückbauprojekte müssen hohen Anforderungen in den Bereichen Nachhaltigkeit, Kreislaufwirtschaft, Recycling, Klimabilanz, Emissionsminderung und Arbeitssicherheit gerecht werden. Darüber hinaus ist der Rückbau auch im Kontext der Flächennutzung von Bedeutung: Großkraftwerke beanspruchen oft Flächen von bis zu 30 Hektar. Die Sanierung und mögliche Neunutzung dieser Flächen – z. B. für erneuerbare Energien oder Gewerbe – ist ein integraler Bestandteil des Rückbauprozesses und fördert den Strukturwandel in vielen Regionen.

3.6.1 Fossile und nukleare Kraftwerke - Strategische Ziele

FNK-SZ-1: Qualitätssteigerung Sekundärrohstoffe im Rückbau

Die Kraftwerksflotte in Deutschland stellt ein Sekundärrohstofflager mit großem Potenzial dar. Insbesondere für Edelstahl, Aluminium, Kupfer und Kupferlegierungen. Die dabei gewonnenen Materialien können für andere Anwendungen genutzt werden, da der Bedarf für den Neubau an Kraftwerken deutlich geringer ist. Um eine möglichst zeitnahe Erschließung des Sekundärrohstoffpotenzials und ein optimales Recycling zu ermöglichen, sind zügige und gut strukturierte Rückbauprozesse erforderlich. Dazu sollte auf eine sortenreine Trennung von Komponenten und Bauteilen geachtet werden, um ein möglichst hochwertiges Recycling zu ermöglichen (Spieth-Achtnich et al. 2024).

FNK-SZ-2: Ausschöpfung des Sekundärrohstoffpotenzials

Eine umfassende Ausschöpfung des Sekundärrohstoffpotenzials ist anzustreben, sowohl aus ökologischer wie auch aus ökonomischer Sicht. Dazu sollten modernste Techniken und digitale Plattformen zum Einsatz kommen, um die Recyclingquoten zu maximieren und damit die Verwertungs- und Beseitigungskosten zu minimieren. Dazu ist eine genaue Kenntnis des Rohstofflagers unabdingbar welches Ort, Menge und Details zum Ausbau und der Zerlegung der Komponenten beinhaltet. Dies gilt ausdrücklich auch zur Ausschöpfung des Sekundärrohstoffpotenzials von Edelmetallen wie Gold, Silber und Palladium (Spieth-Achtnich et al. 2024).

FNK-SZ-3: Verbesserte Freigabe von Komponenten aus Kernkraftwerken

Um eine mögliche Ausweitung der Freigabe von gering radioaktiv kontaminierten Komponenten aus Kernkraftwerken zu ermöglichen, sind in den nächsten Jahren noch erhebliche Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen notwendig. Da in diesem Zusammenhang noch weitere Potenziale für einzelne, besonders relevante Komponenten – z.T. nach Dekontamination -existieren. Dies würde die Ausschöpfung höherwertiger und damit höherpreisiger Rohstoffe ermöglichen, wie Titan- und Nickellegierungen welche in der Nähe des „heißen“ Kerns zum Einsatz kommen. Angesichts der erheblichen und weiter steigenden Endlagerkosten für radioaktiv belastete Abfälle sind durch eine Verringerung der Abfallmengen entsprechend positive wirtschaftliche Effekte zu erwarten (Spieth-Achtnich et al. 2024).

3.6.2 Fossile und nukleare Kraftwerke - Strategische Lücken

FNK-SL-1: Informationsdefizite

Bezüglich des Rückbaus stillgelegter Kraftwerke gibt es eine erhebliche Informationslücke bei den entsprechenden Entscheidungsträgern. Dabei stehen die Risiken eines Rückbaus im Vordergrund und weniger die Chancen, die ein Rückbau bietet. Darüber hinaus sind für einen

optimierten Rückbau genaue Kenntnisse auf Komponenten- und Werkstoffebene des Kraftwerks nötig (Spieth-Achtnich et al. 2024). Dieses Wissen zu sammeln und zu bewahren ist nicht zuletzt mit Blick auf Kernkraftwerke von hoher Bedeutung, da hier zunehmend ein immenser Verlust an Wissen von Fachpersonal droht.

FNK-SL-2: Fehlende Strategien für Recyclingziele beim Rückbau

Bisher gibt es keine auf das Recyclingpotenzial optimierte Strategie für den Rückbau. Dies beinhaltet über eine genaue Abschätzung des Sekundärrohstoffpotenzials hinaus ökonomische, ökologische und logistische Aspekte. Dabei sollte der Rückbau ganzheitlich betrachtet werden, auch mit Bezug auf behördliche Genehmigungen, die Flächennutzung und den Strukturwandel auf kommunaler Ebene sowie die Kapazitäten beteiligter Unternehmen.

FNK-SL-3: Überprüfung und Anpassung von Freigabeverfahren beim Rückbau von Kernkraftwerken

Die aufwändigen Freigabeverfahren stellen den Rückbau von Kernkraftwerken vor massive ökonomische und logistische Herausforderungen. Aufgrund der hohen Endlagerkosten und des großen ökologischen und ökonomischen Potenzials der betroffenen Werkstoffe sollten eine Überprüfung und Anpassung der Freigabeverfahren und des Recyclings gering kontaminierter Komponenten – unter Einsatz geeigneter Dekontaminationsverfahren - in Betracht gezogen werden (Spieth-Achtnich et al. 2024).

3.6.3 Fossile und nukleare Kraftwerke – Maßnahmen

Regulatorische Maßnahmen

FNK-R-1: Anpassung des regulatorischen Rahmens, um den Strukturwandel durch nachhaltige Flächennutzung zu fördern

Angesichts der erheblichen Flächeninanspruchnahme durch Großkraftwerke ist der Rückbau auch aus Sicht der Flächenrevitalisierung und -entsiegelung von zentraler Bedeutung. Die Sanierung der Flächen sollte als fester Bestandteil des Rückbauprozesses verankert und gezielt gefördert werden. Regulatorische Maßnahmen sollten frühzeitig darauf ausgerichtet werden, die Nachnutzung dieser Areale – etwa für den Ausbau erneuerbarer Energien oder die Errichtung von Batteriegroßspeichern – zu erleichtern, insbesondere unter Nutzung bestehender Infrastrukturen. Ein entsprechend angepasster Rechtsrahmen im Bereich der Strom- und Wärmeenergieerzeugung aus erneuerbaren Quellen sowie begleitende Effizienzstrategien können substantielle Beschäftigungsimpulse setzen und den Strukturwandel aktiv unterstützen.

FNK-R-2: Die Genehmigungsprozesse für Rückbauprojekte optimieren

Rückbauprojekte unterliegen zu Recht hohen Anforderungen in den Bereichen Nachhaltigkeit, Recycling, Kreislaufwirtschaft, Klimabilanz, Emissionsvermeidung und Sicherheit. Gleichzeitig sollte der regulatorische Rahmen so weiterentwickelt werden, dass unnötige Hürden abgebaut und Genehmigungsverfahren effizienter gestaltet werden – ohne dabei Umwelt- und Sicherheitsstandards zu senken. Eine beschleunigte Abwicklung trägt dazu bei, den Rückbau als Teil eines nachhaltigen Strukturwandels zeitgerecht umzusetzen.

FNK-R-3: Organisatorische Unterstützung bei technischen und logistischen Herausforderungen der Sekundärrohstoffnutzung

Für eine breitere Anwendung der Freigabe – insbesondere bei großen und relevanten Einzelkomponenten wie Dampferzeugern – sind in den kommenden Jahren erhebliche Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen u.a. zu Dekontaminationsverfahren erforderlich. Ziel ist es, zusätzliche Potenziale zur Reduzierung radioaktiver Abfallmengen zu erschließen. Diese Arbeiten sind mit hohen technischen und finanziellen Aufwendungen verbunden, versprechen jedoch im

Erfolgsfall signifikante wirtschaftliche Vorteile – insbesondere durch die Vermeidung von Endlagerkosten, die derzeit bei rund 30.000 €/m³ liegen und weiter steigen (Spieth-Achnich et al. 2024). Um fundierte Entscheidungen zwischen Dekontamination mit Freigabe und klassischer Endlagerung treffen zu können, sind jeweils umfassende Einzelfallprüfungen notwendig. Parallel dazu sollte frühzeitig in Kommunikationsmaßnahmen investiert werden, um gesellschaftliche Akzeptanz für Freigabeprozesse zu stärken und Vertrauen in transparente Sicherheitsstandards zu fördern.

Informatorische Maßnahmen

FNK-I-1: Aufbau einer zentralen digitalen Informationsplattform

Es wird die Einrichtung einer bundesweit zugänglichen digitalen Plattform als zentrale Anlaufstelle für Kommunen, Länder, Kraftwerksbetreiber*innen sowie Unternehmen mit werksinternen Kraftwerken empfohlen. Die Plattform soll den Rückbauprozess ganzheitlich abbilden, über rechtliche Rahmenbedingungen und genehmigungsrelevante Aspekte informieren und die ökologischen wie ökonomischen Potenziale – insbesondere die Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen und mögliche Anschlussnutzungen der Flächen – verständlich aufbereiten. Ziel ist es, Transparenz zu schaffen, Wissen zu bündeln und Akteur*innen zu vernetzen.

FNK-I-2: Dokumentation laufender Rückbauvorhaben und Aufbau einer Best-Practice-Sammlung

Es wird die Begleitung und systematische Dokumentation aktueller Rückbauprojekte empfohlen, um eine praxisnahe Best-Practice-Datenbank zu entwickeln. Dabei sollen auch Unterschiede zwischen verschiedenen Kraftwerkstypen berücksichtigt werden. Durch eine detaillierte Erfassung bis auf die Komponentenebene kann ein Wissenstransfer auch zwischen unterschiedlichen Kraftwerksformen (z. B. Kohle, Erdgas, Kernenergie) ermöglicht werden. Die gewonnenen Erkenntnisse können in die digitale Plattform (FNK-I-1) integriert und regelmäßig aktualisiert werden.

FNK-I-3: Aufbau eines zentralen Materialregisters zur Erfassung des Rohstoffpotenzials

Es wird die Entwicklung eines bundesweiten Materialregisters zur Abschätzung des Sekundärrohstoffpotenzials der deutschen Kraftwerksflotte empfohlen. Basis ist die systematische Erhebung von Materialien mit hohem Rückbauwert aus repräsentativen Kraftwerkstypen. Über Skalierung anhand der installierten Bruttoleistung lassen sich belastbare Hochrechnungen auf den Gesamtbestand vornehmen. Die Aussagekraft des Registers steigt mit der Vielfalt und Tiefe der Datengrundlage – insbesondere durch die Berücksichtigung unterschiedlichster Kraftwerkstypen und -größen. Das Register könnte in die digitale Plattform (FNK-I-1) integriert werden.

Ökonomische Maßnahmen

FNK-Ö-1: Stärkung der Kreislaufwirtschaft im Kraftwerksrückbau

Zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft im Kraftwerksrückbau sollten gezielte Förderinstrumente bereitgestellt werden, die den Mehraufwand für eine rohstoffschonende Rückbauweise ausgleichen. Diese sollen sich insbesondere der finanziellen Unterstützung der zusätzlichen Arbeitsleistungen, qualitätsorientierter Materialtrennung sowie dem erhöhten Bedarf an Zwischenlager- und Logistikflächen widmen. Rückbauvorhaben, die das Sekundärrohstoffpotenzial konsequent ausschöpfen und die Qualität der zurückgewonnenen Materialien steigern, sollen vorrangig gefördert werden. Ziel ist es, wirtschaftliche Anreize für nachhaltige Rückbaupraktiken zu schaffen und gleichzeitig die inländische Rohstoffverfügbarkeit zu erhöhen.

FNK-Ö-2: Förderung des Rückbaus beim Einhalten bestimmter Recyclingquoten

Zur gezielten Nutzung der im Rückbau von Kraftwerken anfallenden Rohstoffe sollten Fördermittel an das Erreichen definierter Recyclingquoten gekoppelt werden. Rückbauprojekte, die nachweislich hohe Wiederverwertungsraten erzielen und wertvolle Sekundärrohstoffe effizient zurückführen, erhalten eine finanzielle Unterstützung. Dies schafft Anreize für eine ressourceneffiziente Rückbaupraxis und trägt zur Reduktion von Primärrohstoffbedarf und Deponievolumen bei Förderung der Sanierung von alten Flächen. Die Maßnahme sollte über gestaffelte Fördersätze mit der Maßnahme FNK-Ö-1 kombiniert werden.

FNK-Ö-3: Förderung des Rückbaus zur Unterstützung des Strukturwandels durch nachhaltige Flächennutzung

Der Rückbau von Kraftwerksstandorten bietet die Chance, wertvolle Flächen für neue Nutzungen zu erschließen und gleichzeitig zur Erreichung der Flächennutzungsziele der Bundesregierung beizutragen. Um diesen Transformationsprozess zu unterstützen, sollten Rückbauprojekte finanziell gefördert werden, die eine umweltgerechte Flächensanierung zum Ziel haben. Dies schließt die sachgerechte Behandlung von Gebäudeschadstoffen sowie den Umgang mit Boden- und Grundwasserkontaminationen ein. Die Förderung soll gezielt Maßnahmen unterstützen, die eine Baureifmachung ermöglichen und somit die Grundlage für eine nachhaltige Nachnutzung der Standorte schaffen – etwa für erneuerbare Energien, Gewerbe oder Infrastrukturprojekte.

3.7 Aktionsfeld „Mineralische Baustoffe im Hochbau sowie in Straßen und Brücken“

Die Verfügbarkeit mineralischer und nicht-metallischer Sekundärrohstoffe aus und für den Hoch- und Tiefbau wird in den nächsten Jahrzehnten voraussichtlich signifikant steigen (s. Anlage Steckbrief A.7). Somit ist es für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft unerlässlich, die Verwertung dieser Sekundärmaterialien zu optimieren. Dies umfasst nicht nur die Sicherstellung der Verfügbarkeit ausreichend großer Materialmengen, sondern auch deren Qualität, sodass diese Materialien zu möglichst anspruchsvollen Anwendungszwecken eingesetzt werden können. Nur mit einer großen technischen Vielfalt an gütegesicherten Einsatzweisen können nachhaltige regionale Baustoffkreisläufe unter sehr individuellen regionalen Angebots- und Nachfragesituationen gefestigt werden. Die strategischen Ziele umfassen daher die Qualitätssteigerung der Sekundärrohstoffe ebenso wie die Mengensteigerung, die Stärkung insbesondere regionaler Verwertungssysteme und die Steigerung der Akzeptanz von RC-Baustoffen.

3.7.1 Mineralische Baustoffe - Strategische Ziele

MB-SZ-1: Qualitätssteigerung Sekundärrohstoffe

Die Qualität und somit die Verwertungseigenschaften der zur Verfügung stehenden Sekundärrohstoffe müssen verbessert werden. Das jährliche Aufkommen an gemischtem Bauschutt sollte bis 2045 gegenüber 2025 um die Hälfte reduziert werden. Das hat zur Folge, dass das anfallende Material in höherer Reinheit vorliegt. Der Anteil an Schad- und Störstoffen, welche die Qualität und Sicherheit des Materials beeinträchtigen könnten, wird minimiert bzw. deutlich reduziert. Die Qualitätssteigerung ist die Grundlage dafür, dass vorhandenes Material hochwertigen Verwertungswegen zugeführt werden kann.

MB-SZ-2: Mengensteigerung Sekundärrohstoffe

Die Menge verwendeter Sekundärrohstoffe wird signifikant gesteigert, insbesondere für hochwertige bautechnische Anwendungen. Dazu ist der Einsatz solcher Materialien sowohl im Hoch- als auch im Tiefbau deutlich und kontinuierlich auszuweiten.

MB-SZ-3: Stärkung regionaler Verwertungssysteme

Materialkreisläufe im Bauwesen sind regional, wo möglich auf der Ebene von Städten und Stadtregionen, entwickelt, um Transportentfernungen zu verringern und die dafür notwendige Logistik zu vereinfachen. Die Verfügbarkeit von sekundären Materialquellen und deren Einsatzpotenziale sind jeweils zeitnah und regionspezifisch aufeinander abgestimmt. Durch eine einfachere Verfügbarkeit mit geringen Transaktionskosten und kurze Transportwege treten ökonomische und ökologische Vorteile von Sekundärmaterial hervor.

MB-SZ-4: Steigerung der Akzeptanz von RC-Baustoffen

Die Akzeptanz von Sekundärrohstoffen als Rohstoffe im Neubau soll signifikant gesteigert werden. Akzeptanzsteigerung meint dabei eine möglichst weit verbreitete und grundsätzlich als Selbstverständlichkeit akzeptierte Nutzung von RC-Baustoffen in Bauprojekten sowohl im öffentlichen als auch privaten Sektor. RC-Baustoffe sind somit im Jahr 2045 „normale Rohstoffe“ für hochwertige Bauvorhaben im Hoch- und Tiefbau.

3.7.2 Mineralische Baustoffe - Strategische Lücken

Die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie NKWS legt den Schwerpunkt auf die Weiterentwicklung ordnungsrechtlicher Instrumente. Diese sollen durch die vorliegende Urban Mining Strategie punktuell ergänzt werden. Dazu wurden die folgenden strategischen Lücken identifiziert.

MB-SL-1: Informationsbedarf bei allen beteiligten Akteur*innen

Es besteht ein erheblicher Bedarf an mehr und umfassenderen Informationen bei allen am Bau beteiligten Akteur*innengruppen. Diese betreffen nicht nur die verfügbare Quantität und Qualität verfügbarerer Sekundärrohstoffe, sondern erstrecken sich auf technisch tiefergehende Informationen wie technische Einsatzmöglichkeiten und Umweltvorteile. Auch Kenntnisse über die beispielhafte Nutzung von Sekundärrohstoffen und damit einhergehend Best Practices sind unzureichend verfügbar. Ebenso gibt es für die Beschaffung von Informationen über regionale Bedarfe und Angebote keine ausreichenden Strukturen.

MB-SL-2: Ineffektive Nutzung ökonomischer Anreize

Obwohl hinlänglich bekannt ist, dass ökonomische Anreize eine häufig ausschlaggebende Entscheidungshilfe sind, werden diese im Bereich der Sekundärrohstoffe im Hoch- und Tiefbau bisher nicht effektiv genutzt. Der Ausgleich von bisher bestehenden Kostennachteilen bei der Beschaffung von Sekundärrohstoffen, parallel zur Reduktion von Kostenvorteilen einfacher Entsorgungsverfahren von Bau- und Abrissabfällen, stellt einen solchen Anreiz dar. Gleichzeitig werden Nachhaltigkeitsvorteile durch die Nutzung von Sekundärrohstoffen nicht ausreichend (finanziell) gewürdigt.

MB-SL-3: Fehlende organisatorische Unterstützung bei technischen und logistischen Herausforderungen der Sekundärrohstoffnutzung

Die Gewinnung, der Transport, die Lagerung und die Nutzung von Sekundärrohstoffen bringen spezifische logistische und technische Herausforderungen mit sich. Es besteht weiterhin eine signifikante Lücke an organisatorischen Maßnahmen, durch die diese berücksichtigt werden können.

3.7.3 Mineralische Baustoffe - Maßnahmen

Informatorische Maßnahmen

Bausteine mit modularem Aufbau im Kontext der Digitalisierung

Um sowohl die Akzeptanz als auch die Nutzungsmengen von Sekundärrohstoffen im Neubau zu erhöhen, ist es notwendig, Informations- und Wissensdefizite zum anthropogenen Lager und dessen Dynamik sowie zur Verfügbarkeit und dem Bedarf nach Sekundärmaterialien aufzufüllen. Dies betrifft ein weites Spektrum an Informationen von hoher Komplexität. Ein modularer Aufbau des Informationssystems ist daher wichtig. Die so bereitgestellten Informationen fließen dann in die relevanten Planungsbereiche zum Beispiel der öffentlichen Hand (beispielsweise in die Rohstoff-, Bauleit- und Abfallwirtschaftsplanung) sowie der Bau- und Recyclingwirtschaft ein.

MB-I-1: Erstellung regionaler Materialkataster

Regionale Materialkataster mit digitaler Identität (sog. Digital Twins) werden entwickelt. Ein entsprechendes disaggregierbares, öffentlich gefördertes (und damit zentral und niedrigschwellig zur Verfügung stehendes) Kataster, das GIS-Daten und KI zur Materialbeschaffenheit integriert und schlank und forschungsgetrieben aufgebaut ist, kann Informations- und Wissensdefizite zum anthropogenen Lager reduzieren.

MB-I-2: Öffentliche Förderung der Datenerhebung

Die Daten, die in dieses Kataster eingespeist werden, sind spezifisch und detailliert. Die Gewinnung dieser Daten wird öffentlich gefördert, da generische, mithilfe statistischer Methoden errechnete Daten insbesondere in der Bilanzierung von Bauweisen weniger spezifisch sind als nötig.

MB-I-3: Bereitstellung von Best-Practice-Sammlungen

Ergänzend zu den Daten werden Best-Practice-Sammlungen bereitgestellt, um möglichen Nutzer*innen Potenziale und Optionen der Integration von Sekundärrohstoffen in Bauvorhaben aufzuzeigen. Diese Informationen machen die Nutzung von RC-Materialien leichter nachvollziehbar.

Ökonomische Maßnahmen

Kostennachteile ausgleichen, Nachhaltigkeitsvorteile würdigen

Spezifische potenzielle Kostennachteile der Sekundärrohstoffnutzung, das bedeutet Kostenstrukturen, die durch die öffentliche Hand direkt und zielgerichtet verändert werden können, erfordern den Einsatz ökonomischer Instrumente, um die Nutzung von RC-Stoffen zu fördern. Neben dem Ausgleich von Kostennachteilen beziehen sich die vorgeschlagenen ökonomischen Maßnahmen auch auf die (finanzielle) Würdigung von Nachhaltigkeitsvorteilen.

Die vorgeschlagenen Maßnahmen mit ökonomischem Hintergrund sind damit.

MB-Ö-1: Kostenerhöhung für Verfüllung und Ablagerung

Die anfallenden Kosten für die Verfüllung und Ablagerung ungefährlicher Baustoffe werden nach oben korrigiert. Hierdurch steigt die Attraktivität der Verwertung mineralischer Baustoffe.

MB-Ö-2: Bevorzugung von Sekundärrohstoffeinsatz

In öffentlichen Ausschreibungen soll der Einsatz von Sekundärrohstoffen besonders betont und bevorzugt werden. Der Angebotspreis soll mithin nicht als einziges Zuschlagskriterium angesetzt werden.

MB-Ö-3: Begründungspflicht für den Einsatz von Primärmaterialien

Für den Einsatz von Primärmaterialien in Projekten der öffentlichen Hand soll eine Begründungspflicht bestehen. Damit soll erreicht werden, dass Primärmaterialien nur im Ausnahme- und nicht als Standardfall genutzt werden und die Verwendung von Sekundärmaterialien erhöht wird.

MB-Ö-4: Förderung von Best-Practice-Beispielen

Zur Erhöhung der Sichtbarkeit und zum Abbau von internalisierten Ressentiments soll in möglichst vielen Kommunen die Umsetzung von Best-Practice-Beispielen gefördert und in einem öffentlichen Portal dokumentiert werden. Dabei müssen diese für Praxisakteur*innen ausreichen erläutert werden.

Organisatorische Maßnahmen

Infrastrukturleistungen des Staates und der Kommunen

Da das Recycling, auch von Baumaterialien, bisher hauptsächlich in der Hand privater Akteur*innen liegt, sind zur Steuerung des Geschehens zusätzliche Infrastrukturleistungen erforderlich. Ein adaptiertes Modell der Wertstoffhöfe soll organisatorische und finanzielle Fragen zur Lagerhaltung lösen und damit zur Senkung von Transaktionskosten der RC-Materialnutzung beitragen. Hierbei müssen regionsspezifische Gegebenheiten berücksichtigt werden.

MB-O-1: Vereinfachung von Genehmigungsprozessen für lokale Aufbereitungsanlagen

Der Genehmigungsprozess für die Einrichtung ortsnaher Aufbereitungsanlagen und Lagerplätze zur Reduktion von Transportwegen im Aufbereitungsprozess von Sekundärrohstoffen soll signifikant vereinfacht werden.

MB-O-2: Erstellung einer digitalen Vernetzungsplattform

Um (lokales) Angebot mit der bestehenden und potenziellen Nachfrage zu verknüpfen und ein leistungsfähiges und zuverlässiges „just in time“-System aufzubauen, soll eine digitale Plattform aufgebaut und zur Verfügung gestellt werden.

MB-O-3: Förderung bereichsübergreifender Kommunikation

Die bereichs- und sektorübergreifende Kommunikation wird verstärkt gefördert. Hierzu werden insbesondere definitorische Unterschiede und Auslegungen von technischen Standards, Normen und Praktiken der Fachbereiche identifiziert und harmonisiert. Eine Einigung über die Bedeutung gemeinsam benutzter Begriffe soll erreicht werden. Dieser Prozess wird nicht nur in Fachbehörden, sondern innerhalb von öffentlichen Verwaltungen insgesamt angestoßen.

MB-O-4: Durchsetzung relevanter vorhandener Gesetzgebung

Der Vollzug von Gesetzgebung, die maßgeblich das Urban Mining begünstigen soll, muss angepasst und hinsichtlich Anforderungen zur Qualitäts- und Mengensteigerung gestärkt werden (beispielsweise GewAbfV, ErsatzbaustoffV, BBodSchV, DepV).

MB-O-5: Anpassung von Abfallschlüsselnummern

Abfallschlüsselnummern verwertungsrelevanter Bauabfälle werden weiter differenziert, beispielsweise hinsichtlich der Kalksandstein- und Porenbetonabfälle, um die Getrennterfassung zu unterstützen.

3.8 Aktionsfeld „Kunststoffe im Hoch- und Tiefbau“

Aufgrund ihrer hohen Haltbarkeit, Stabilität und vielseitiger Einsatzmöglichkeiten bei gleichzeitig niedrigem Gewicht sind Kunststoffe aus dem modernen Bausektor nicht mehr wegzudenken.

Doch auch Kunststoffe haben eine technische Lebensdauer, werden mit der Zeit spröde und müssen somit ersetzt werden. Insbesondere die im Baubereich verwendeten Kunststoffe verbleiben lange im anthropogenen Lager. Theoretisch können Kunststoffe geschreddert, geschmolzen und wieder in neue Formen gegossen werden. Praktisch wird dieses Potenzial nicht ausgeschöpft, Gründe dafür sind in den strategischen Lücken dargestellt.

Recycling von fossilen und biobasierten Kunststoffen

Kunststoffabfälle stellen global eine besondere Herausforderung dar. Sie sind ein maßgeblicher Faktor der Umweltverschmutzung, bedrohen die Biodiversität und insbesondere Mikroplastikpartikel bilden ein Gesundheitsrisiko für Mensch und Tier. Da die meisten Kunststoffe aus fossilen Rohstoffen hergestellt werden, ist deren Produktion an die Verfügbarkeit dieser fossilen Ressourcen geknüpft. Allerdings gibt es auch Ansätze für die Nutzung biobasierter Kunststoffe im Baubereich. Diese können jedoch bisher viele bauspezifische Anforderungen wie z. B. Brandschutzanforderungen nicht erfüllen. Darüber hinaus haben biobasierte Kunststoffe für das Recycling nur eine untergeordnete Rolle. Aus diesem Grund wird sich für die hier dargestellten Ziele, strategischen Lücken und Maßnahmen auf das Recycling fossiler Kunststoffe fokussiert.

3.8.1 Kunststoffe im Hoch- und Tiefbau - Strategische Ziele

KB-SZ-1: Qualitätssteigerung Sekundärrohstoffe

An Kunststoffe werden häufig hohe Qualitätsanforderungen gestellt. Durch die Gewährleistung einer höheren Qualität bei Sekundärrohstoffen könnten diese höheren Anforderungen erfüllen und somit in mehr Anwendungsbereiche vordringen.

KB-SZ-2: Mengensteigerung Sekundärrohstoffe

Die Produktion fossiler Kunststoffe ist an das Gewinnen und die Raffination fossiler Brennstoffe gekoppelt. Zudem ist das Volumen bereits vorhandener Kunststoffe enorm hoch und stellt eine akute Umweltbelastung dar. Im Baubereich getrennt erfasste Kunststoffe wie Altrohre müssen konsequent dem Recycling zugeführt werden. Darüber hinaus müssen Kunststoffprodukte, die als Baumischabfall erfasst werden vermieden und der Anteil getrennt erfasster Kunststoffe gesteigert werden.

KB-SZ-3: Steigerung der Akzeptanz von Recyclingkunststoffen

Wie bei vielen anderen Sekundärrohstoffen gibt es auch beim Einsatz von Recyclingkunststoffen ungerechtfertigte Vorbehalte. Diese müssen aufgeklärt und entkräftet werden, sodass diese für unbedenkliche und geeignete Einsatzzwecke uneingeschränkt genutzt werden können.

KB-SZ-4: Stärkung regionalisierter Verwertungswege

Auch bei Kunststoffen ist aufgrund eines verhältnismäßig geringen Materialwerts zumindest eine teilweise regionale Verwertung für die Hauptfraktionen anzustreben. Kunststoffprodukte haben in der Regel ein großes Volumen und sind daher ungeeignet für den Transport. Kunststoffgranulate wiederum kommen eher für einen Transport infrage.

3.8.2 Kunststoffe im Hoch- und Tiefbau - Strategische Lücken

KB-SL-1: Qualitätsverlust durch lange Nutzungsdauer

Aufgrund langer Verweildauern und hoher Materialbeanspruchungen mechanischer Art oder auch durch UV-Strahlung, Feuchtigkeit, Sauerstoff und Wärme erleiden Kunststoffe Qualitätsverluste. Diese führen häufig dazu, dass das Material fürs Recycling als ungeeignet eingestuft wird oder das RC-Material nur noch geringere Qualitätsstandards erfüllen kann.

KB-SL-2: Qualitätsgarantien und -gewährleistung für Recyclingprodukte

Im Baubereich gelten häufig hohe Sicherheitsanforderungen an Kunststoffprodukte. Die Gewährleistung dieser Anforderungen und Qualitäten ist bei Recyclingmaterial in vielen Anwendungen häufig mangels Erfahrung noch nicht gegeben.

KB-SL-3: Zukünftiges hohes Aufkommen an Kunststoffabfällen in Form von fossilen Dämmstoffen

Energetische Sanierungen sind wichtig für die Verbesserung der Energieeffizienz und CO₂-Bilanz unseres Gebäudebestandes. Diese werden in Zukunft zunehmen, wodurch das Abfallaufkommen an ausgebautem Dämmmaterial stark ansteigt. Gleichzeitig stehen bislang keine zirkulären Verwertungswege für diese zur Verfügung.

KB-SL-4: Schwierigkeiten im Handling von Verbundwerkstoffen und additivierten Kunststoffen

Verbundwerkstoffe erfüllen mittels gezielter Kombination verschiedener Materialien und deren Eigenschaften sehr spezifische Funktionen. Diese liegen im Baubereich z.B. als Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) vor. Hierfür gibt es noch keinerlei Recyclingmöglichkeiten, da passende Verfahren und Technologien zur Trennung und Aufbereitung fehlen. Darüber hinaus erschweren auch Kunststoffe, häufig Dämmstoffe, die Brandschutzanforderungen erfüllen das Recycling, da enthaltene Flammschutzmittel mittlerweile ein Gesundheitsrisiko darstellen.

KB-SL-5: Kunststoffrecycling hat ökonomische Schranken

Für viele Kunststoffprodukte gibt es keine zirkulären Verwertungswege, da neuer Kunststoff in großen Mengen und preisgünstig zur Verfügung steht und Kunststoffabfälle günstig exportiert oder Verbrennungsanlagen zugeführt werden können. Sobald Sortierverfahren, kompliziertere Aufbereitungsverfahren oder Verfahren zur Schadstoffentfrachtung notwendig werden, hemmen die Verfahrensaufwendungen die Wirtschaftlichkeit des Recyclings. Durch günstige Preise von Neumaterial und Entsorgung sind die wirtschaftlichen Anreize für Forschung und Entwicklung neuer Verfahren gehemmt.

KB-SL-6: Komplexität des Akteur*innennetzwerks

Aufgrund einer hohen Komplexität des Akteur*innennetzwerks wird eine sektorübergreifende Zusammenarbeit über den gesamten Produktlebenszyklus erschwert. Ebenso wird aufgrund dessen die Informationsgrundlage über die Zusammensetzung der jeweiligen Kunststoffe und mögliche Verunreinigungen undurchsichtig.

3.8.3 Kunststoffe im Hoch- und Tiefbau - Maßnahmen

Regulatorische Maßnahmen

KB-R-1: Rezyklateinsatzquote bei Kunststoffen

Erzeugung eines nachfrageseitigen Pull-Effekts durch den Einsatz einer Rezyklateinsatzquote zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit. Diese kann wie beispielsweise für PET-Flaschen bereits umgesetzt, produktspezifisch sein (25 % Rezyklatanteil für PET-Flaschen seit Januar 2025, 30 % ab Januar 2030 (VerpackG 2023)). Bei massentechnisch relevanten und sortenrein erfassbaren Kunststoffprodukten erhöht dies den Anreiz die jeweiligen Kunststoffe zu sammeln und zu rezyklieren um die neu geschaffene Nachfrage nach Rezyklat zu bedienen. Kunststoffabfälle aus dem Baubereich sind hierfür interessant, da häufig große Mengen eines Produkts oder Kunststoffes anfallen, während der Einsatz von Kunststoffrezyklaten im Baubereich bereits praktiziert wird.

Informatorische Maßnahmen

KB-I-1: Verbesserung der Datengrundlage

Es wird eine bessere Datengrundlage sowohl für Angebot und Nachfrage von RC-Material als auch über die Zusammensetzung von Kunststoffprodukten benötigt, um ein hochwertiges Recycling zu ermöglichen. Diese Daten müssen erfasst und über den gesamten Zyklus des Materials zuverlässig zur Verfügung stehen.

KB-I-2: Information über geeignete Einsatzmöglichkeiten von Recyclingkunststoffen im Baubereich

Während einige Anforderungen an Kunststoffprodukte im Baubereich wie im Trinkwasser- und Druckanwendungsbereich noch nicht erfüllt werden können, gibt es zahlreiche Anwendungsbereiche, in denen die Verwendung von Recyclingkunststoffen geeignet und zugelassen ist. Hierzu muss Wissen an Planende und Bauherr*innen übermittelt werden, sodass diese auf geeignete Verwertungsmöglichkeiten zurückgreifen können.

Ökonomische Maßnahmen

KB-Ö-1: Ökonomische Vorteile für Getrennterfassung und Verwertung schaffen

Die finanziellen Nachteile, die bislang noch bei der Getrennterfassung und beim Kunststoffrecycling entstehen, müssen ausgeglichen werden. Eine Produktionsbeschränkung von Neumaterial, die es ökonomisch attraktiver machen würde, Recyclingmaterial zu nutzen, ist kürzlich erst auf EU-Ebene gescheitert, sollte aber weiterverfolgt werden. Darüber hinaus muss sowohl die Entsorgung als Gemisch, als auch die thermische Verwertung für Produkte, die auch recycelt werden können, finanziell unattraktiver werden.

KB-Ö-2: Forschung und Entwicklung fördern

Der Forschungs- und Entwicklungsaufwand insbesondere im Bereich von Trennverfahren, aber auch im Bereich ökonomisch und ökologisch sinnvoller Aufbereitung von Kunststoffzyklen soll weiter vorangetrieben und gefördert werden.

Organisatorische Maßnahmen

KB-O-1: Qualitätssteigerung durch Getrennterfassung

Durch eine Getrennterfassung direkt auf der Baustelle können mehr Kunststoffe dem Recycling zugeführt werden und für diese können höhere Qualitäten erzielt werden. Die Getrennterfassung sollte auch für kleinere Mengen Kunststoff angewendet werden. Hierfür ist auch die Unterscheidung zwischen Abfällen von Kunststoffverpackungen auf der Baustelle und Abfällen aus ausgebauten Kunststoffbauteilen notwendig. Verschmutzungen spielen bei Ersterem eine wesentlich geringere Rolle.

KB-O-2: Bevorzugung von Recyclingkunststoffen in öffentlichen Ausschreibungen

Es gibt viele Bauprodukte, in denen die Verwendung von Recyclingkunststoffen unbedenklich ist. Hierfür sollte insbesondere in öffentlichen Ausschreibungen im Sinne einer Signalwirkung auch auf entsprechende Produkte zurückgegriffen werden.

KB-O-3: Ausbau geeigneter Rücknahmesysteme und Standardisierung

Sammel-, Sortierungs- und Aufbereitungsverfahren können durch Standardisierung und Benchmarking eine höhere Effektivität erreichen. Bestehende Verfahren müssen verbessert und weiterentwickelt werden, um z.B. bessere Sortierergebnisse zu erzielen und somit die Outputmengen für hochwertigeres RC-Material zu steigern.

KB-O-4: Erweiterte Herstellerverantwortung

Indem Produzierende für die Entsorgung, bzw. die Rücknahme und das Recycling von Produkten verantwortlich gemacht werden, könnten Kunststoffabfälle reduziert und die Recyclingquote erhöht werden. Für manche Bauteile wie z.B. Kunststofffenster und Kunststoffrohre wird das bereits umgesetzt, das gilt es auf sämtliche andere Kunststoffprodukte wie zum Beispiel Dämmstoffe auszuweiten, die im Baubereich in nennenswerten Mengen eingesetzt werden.

KB-O-5: Regionale Bereitstellung beweglicher Schreddersysteme

Kunststoffprodukte, die auf der Baustelle in großen Mengen anfallen, könnten direkt vor Ort geschreddert werden, sodass sortenreine Granulate entstehen, die für ein weiteres Recycling attraktiv sind. Eine räumliche Nähe zu Verbrennungsanlagen kann den Anreiz zum Recycling untergraben, weswegen es gilt Strukturen zu schaffen, in denen das Recycling mindestens genauso gut umsetzbar ist, wie eine thermische Verwertung.

4 Prioritäre Querschnittsthemen der Urban Mining Strategie

Im Laufe des Vorhabens „Kartierung des Anthropogenen Lagers V -Strategieentwicklung für einen nationalen Urban Mining Prozess“ wurden im Dialog mit Fachleuten drei Querschnittsthemen als prioritär für einen erfolgreichen nationalen Urban Mining Strategie-Prozess identifiziert. Sie behandeln Fragestellungen und strategische Lücke, die sich in allen Aktionsfeldern in unterschiedlicher Ausprägung als Herausforderung stellen. Dies sind:

- ▶ Schadstoffregulierung
- ▶ Regionalisierung
- ▶ Digitalisierung.

In den folgenden Unterabschnitten wird zu diesen drei Querschnittsthemen auf wichtige Potenziale und Handlungserfordernisse zur Stärkung des Urban Mining fokussiert.

4.1 Schadstoffregulierung

Schadstoffe sind in allen Industriesektoren von Bedeutung. Sie liegen entweder ungewollt in Produkten vor, wurden erst später als solche bewertet, oder sie wurden bewusst zum Erzielen gewünschter Eigenschaften bei Produktion und Fertigung eingesetzt. Allein im Bausektor stellen Stoffe wie Asbest, künstliche Mineralfasern (KMF), polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS), polychlorierte Biphenyle (PCB), Schwermetalle wie Chrom VI oder Vanadium, chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW), Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW), Gips sowie Holzschutzmittel wie Lindan, Dichlordiphenyltrichlorethan (DDT) und Pentachlorphenol (PCP) signifikante Herausforderungen beim Urban Mining dar. Aufgrund langer Nutzungsdauern sind viele längst verbotene Substanzen noch immer im Bestand enthalten – das Maß der Kontamination ist oft unklar – und stellen daher eine große Herausforderung für das Urban Mining dar. Weiterhin gibt es wichtige Funktionsmaterialien, die unter bestimmten Bedingungen und Expositionsszenarien Schadstoffeigenschaften aufweisen können. So hat Kobalt neurotoxische Eigenschaften, ist aber ein wichtiges Funktionsmaterial als Legierungselement in Stahl oder im Kathodenmaterial von Lithium-Ionen-Batterien.

In diesem Abschnitt werden Spannungsfelder und Argumentationslinien beim Umgang mit Schadstoffen im Kontext von Urban Mining umrissen. Daraus ergeben sich Leitlinien, die für eine politische Auseinandersetzung mit dem Thema zu beachten sind.

Es werden keine Empfehlungen zu Instrumenten und Maßnahmen bezüglich des Umgangs mit Schadstoffen beim Urban Mining abgegeben. Ebenso werden konkrete Messverfahren oder Grenzwerte aufgrund der Stoffvielfalt im Rahmen dieser Strategie nicht diskutiert.

Schadstoffbegriff ist abhängig vom Kontext

Der Begriff "Schadstoff" ist nicht übergreifend einheitlich definiert und kann deshalb je nach Kontext unterschiedlich verstanden werden. Dies hängt auch damit zusammen, dass Stoffe mit schädlichen Eigenschaften oft spezielle Nutzen haben. Weiterhin sind Stoffe, die als Schadstoffe betrachtet werden, nicht immer inhärent toxisch. So ist z. B. Chrom nicht grundsätzlich toxisch, sondern nur in seiner Form als Cr(VI). Ob in einem Material enthaltenes Chrom also eine toxische Wirkung entfalten kann, ist von der Art des Einbaus, dem pH-Wert der Umgebung und weiteren Faktoren abhängig. Kupfer ist in geringen Mengen ein wichtiger Spurenstoff für die

Photosynthese von Pflanzen, wird im Kontext der Klärschlammverwertung in hohen Konzentrationen aber als Schadstoff betrachtet.

Non-toxic-environment vs. circular economy

Nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) müssen Abfälle grundsätzlich verwertet werden, sofern dies technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar (beides unbestimmte Rechtsbegriffe) ist. Gleichzeitig muss die Verwertung so geschehen, dass keine Gefährdung des Allgemeinwohls zu erwarten ist und keine Schadstoffanreicherung im Wertstoffkreislauf erfolgt. Hieraus resultiert das Spannungsfeld Rohstoffsicherung vs. Schadstoffentfrachtung (oder weiter gefasst: non-toxic-environment vs. circular economy). Es stellt sich also die Frage, bis zu welchem Grad Schadstoffe ggf. unter starker Beschneidung des Recyclings ausgeschleust werden sollten. Zwar besteht grundsätzlicher Konsens darüber, dass Grenzwerte wissenschaftlich hergeleitet werden sollten und dabei eine ganzheitliche Betrachtung von Umweltwirkungen und menschlicher Gesundheit zugrunde liegen muss. Es existieren in der Fachwelt und Praxis allerdings unterschiedliche, teilweise widersprüchliche Perspektiven dazu, wie Grenzwerte konkret festgelegt werden sollten: Darf Sekundärmaterial stärker verunreinigt sein als Primärmaterial? Unter welchen Bedingungen dürfen auch höhere Gehalte an „besonders überwachtungswürdigen“ Stoffen toleriert werden?

Ausschleusen oder überwachte Kreisläufe?

Eine These ist, dass Grenzwerte am rezyklathaltigen Produkt festgemacht werden sollten und nicht am zu recycelnden Material bzw. der Schadstoffherkunft. Dafür spricht, dass auch höher belastetes Material recycelt werden kann, wenn das entstehende Produkt die einschlägigen Grenzwerte einhält. Dies würde zu einer Stärkung von Stoffkreisläufen führen. Außerdem könnte dem Problem Rechnung getragen werden, dass geogene Hintergrundbelastungen erst relevant werden, wenn das Material recycelt wird. Auch ist eine Gefährdung durch einen Schadstoff von Einbau, Exposition und weiteren Faktoren abhängig. Dagegen spricht, dass Schadstoffe, die frühzeitig mit wenig Aufwand abzutrennen wären, nicht ausgeschleust würden, was zu einer Schadstoffverdünnung führen würde. Hierdurch blieben mehr Schadstoffe im Kreislauf, welche später schwieriger auszuschleusen wären. Gerade letzterer Aspekt könnte aber in vielen Fällen das gesamte Spannungsfeld vorzeitig auflösen, indem Schadstoffe so früh wie möglich abgetrennt werden. Eine Verschärfung der Grenzwerte kann hier Verbesserung bringen. Auch bergen Produkte mit geringem Expositionsrisiko, bei denen Schadstoffe erlaubt sind, bei erneutem Recycling wieder ein Risiko, z.B. bezüglich des Arbeitsschutzes als Gefahrstoff. Dies spricht dafür, dass Schadstoffe unabhängig vom geplanten Einsatz nach den technischen Möglichkeiten ausgeschleust werden sollten.

Pauschale Gefährdungsbetrachtung vs. Risikobewertung am Einsatzort

Eine weitere Möglichkeit des Umgangs mit schadstoffhaltigen Sekundärmaterialien wäre, diese an technisch geeigneter Stelle bzw. in technisch geeigneten Produkten zu verwerten und die Rückholbarkeit der Schadstoffe durch Information über ihren „Lagerort“ sicherzustellen. Eine solche Logik verfolgt beispielsweise die Ersatzbaustoffverordnung mit einem entsprechenden Kataster der Einbaucharakteristik. Bei einem solchen Vorgehen gibt es keine Fixierung auf die Gefährdungsbetrachtung, sondern eine Risikoabschätzung mit Bezug auf denkbare Einsatzorte. Damit werden unterschiedliche Grenzwerte je nach Anwendungsbereich möglich. Es könnte als weniger besorgniserregend angesehen werden, wenn ein Abwasserkanalrohr mit Blei belastet ist, als wenn dies auf ein Frischwasserrohr (oder ein Kinderspielzeug) zutrifft. In diesem Zusammenhang könnten bestimmte Abwendungsbereiche für Sekundärmaterial, z.B. rezyklierte Kunststoffe in direktem Kontakt mit dem Menschen, pauschal gesperrt werden (analog

Regelungen der Produktnormen zum Rezyklateinsatz in Kunststoffrohren für Trinkwasseranwendungen).

Anforderungen an Primärrohstoffe im Vergleich zu Sekundärrohstoffen

Sekundärrohstoffe könnten durch eine rechtliche Gleichbehandlung mit Primärrohstoffen Diskriminierungsfreiheit erreichen. Es kann allerdings eingewendet werden, dass hieraus ein deutlich erhöhter Prüfaufwand für Primärrohstoffe resultiert, was gesamtwirtschaftlich zu höheren Kosten führen würde. Eine Alternative könnte sein, den Abfallbegriff neu zu definieren, sodass die Abfalleigenschaft anhand der Materialeigenschaften bzw. Schadstoffgehalte festgelegt wird, nicht am Entledigungswillen. Dies führt dazu, dass rückführbares Material, gar nicht erst in das Abfallrecht eintritt und damit rechtliche Hürden für den späteren Wiedereinsatz vermieden werden könnten.

Fazit

Die oben ausgeführten Spannungsfelder und Argumentationslinien können aufgrund der Stoffvielfalt und den komplexen Wirkmechanismen nicht pauschal definiert oder abgewogen werden. Es bedarf einer Klärung mit einem breiten Beteiligungsangebot für alle Interessensgruppen. Es ergeben sich jedoch folgende Leitlinien, die als Schlüsselaspekte für die Auflösung der Spannungsfelder identifiziert worden sind:

► Harmonisierung von Begriffsdefinitionen und Rechtsbereichen

Zur Ermöglichung eines effektiven Umgangs mit Schadstoffen im Kontext des Urban Mining und darüber hinaus ist die Vereinheitlichung des Vokabulars, also der verwendeten Terminologie und deren Auslegung notwendig. Hier wird eine Vereinheitlichung über die verschiedenen Rechtsbereiche (z.B. Produkt-, Chemikalien- und Abfallrecht) benötigt, um bestehende Sprachbarrieren abzubauen und eine unmissverständliche Kommunikation über die gesamte Wertschöpfungskette sowie alle Hierarchieebenen der Gesetzgebung und des Vollzugs zu ermöglichen.

Weiterhin ist die Angleichung verschiedener die UMS betreffender Rechtsbereiche über die gesamte Wertschöpfungskette auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene notwendig. Hier könnte z.B. der Schutzgedanke des Abfallrechts ausgegliedert und mit dem Chemikalienrecht zusammengebracht werden.

► Interdisziplinäre Zusammenarbeit

Das Urban Mining beinhaltet verschiedene Phasen, die gemeinsam und über Fachgrenzen hinaus betrachtet werden müssen. Die Erfassung und Weitergabe von Informationen über Schadstoffe über die gesamte Wertschöpfungskette ist notwendig, um z.B. eine robuste Risikoabschätzung am Arbeitsplatz zu gewährleisten. Wissen über in den verarbeiteten Materialien enthaltene Schadstoffe ist relevant für das Design neuer Arbeitsplätze im Rahmen des Urban Mining. Auch ist bei der Aufbereitung die Sicherheit des dort hergestellten Materials zu gewährleisten. Es gilt ein interdisziplinäres Denken und Zusammenarbeiten zu etablieren, um sämtliche Wirkungspfade der Stoffe zu berücksichtigen.

► Generierung und Verfügbarkeit von Informationen

Ziel ist die konsequente Generierung von Informationen über Schadstoffe und die für die gesamte Wertschöpfungskette zugängliche (und verständliche) Dokumentation. Eine Möglichkeit wurde mit der SCIP-Datenbank als Maßnahme der Europäischen Abfallrahmenrichtlinie geschaffen (Europäische Chemikalienagentur 2025), die Inverkehrbringer von Erzeugnissen,

die besonders besorgniserregende Stoffe (SVHC) enthalten, verpflichtet, diese zu registrieren. Allerdings ist diese für die großskalige Entsorgungswirtschaft derzeit wenig geeignet, um anhand dessen Abfallströme und deren Aufbereitungslinien mit Blick auf SVHC zu lenken. Der Digitale Produktpass kann ein adäquates Instrument darstellen, der solche Informationen ebenfalls abbildet. Dieser sollte hierzu auch für die Sekundärrohstoffwirtschaft praktikabel ausgestaltet und dessen Einführung schnell auf viele Produktgruppen ausgeweitet werden. Weiterhin ist auf EU-Ebene im Rahmen der “One Substance, One Assessment”-Strategie eine begrüßenswerte integrierte Datenplattform geplant, welche für verschiedene Rechtsbereiche und Organisationen Schadstoffinformationen transparent, harmonisiert und leicht verfügbar bündeln soll (Rat der Europäischen Union 2025).

Randbedingungen mitdenken

Die besten Schutz- und Aufbereitungsmaßnahmen sind wirkungslos, wenn sie nicht in die Praxis gebracht werden können oder nicht überwachbar sind. Bei allen Maßnahmen des Urban Mining sollten daher die Faktoren **Wirtschaftlichkeit**, **Umsetzbarkeit** und **Vollzugaufwand** mitgedacht werden. Der **Arbeitsschutz** und die **Produktsicherheit** stehen bei allen Maßnahmen zum Urban Mining im Vordergrund, damit unvorhergesehene negative Auswirkungen von eingesetzten Instrumenten und Maßnahmen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt vermieden werden.

4.2 Regionalisierung

Materialien, Regionen und Strukturen

Der überwiegende Teil des anthropogenen Lagers ist mittel- bis langfristig örtlich oder in Produkten gebunden. Insbesondere sehr langfristig örtlich gebundene Materialien wie sie in Gebäuden und Infrastruktur einschließlich Windkraft- und Photovoltaikanlagen sowie fossilen und nuklearen Kraftwerken vorliegen, prägen Kulturlandschaften maßgeblich mit – wie z.B. die Lauenburg, das Rheinische Braunkohlerevier oder städtische Umgebungen insgesamt. Solche Kulturlandschaften illustrieren die zahlreichen Umgebungen und Möglichkeiten der Kreislaufwirtschaft im Allgemeinen, des Urban Mining im Besonderen in und von Regionen – also der räumlichen Ebene oberhalb einzelner Städte und Gemeinden (Mathias et al. 2024):

- ▶ Regionale Wirtschaftsstruktur, regionale Konzentration und Agglomerationseffekte
- ▶ Regulatorische Rahmenbedingungen und Finanzierung
- ▶ Planung, Organisation und Zusammenarbeit
- ▶ Fachwissen, Fähigkeiten und Informationen
- ▶ Kulturelle Werte und Bewusstsein (Sensibilisierung, Basis/Motivation, „Mainstreaming“)

Diese gehen zurück auf verschiedene Ausgangsbedingungen der Regionen (z. B. peripher-ländlich vs. alt-industrialisiert vs. fragmentierte Metropolregion oder Bedingungen der nationalen und regionalen Versorgungssicherheit) (BMUV 2024; Tödtling & Trippel 2005) sowie deren Orientierung an Wachstums-, Nachhaltigkeits-, und Transformationszielen (Trippel et al. 2022).

Der Einfluss von Regionen mit ihrer jeweiligen Charakteristik auf die Regionalisierung von Stoffströmen und -kreisläufen wird daher in Studien und Strategiedokumenten immer wieder aufgegriffen (Mathias et al. 2024). Regionale sowie überregionale Konzepte und Initiativen werden immer häufiger genannt (BMUV 2024; EU COM 2025a; EU COM 2020; OECD 2020; OECD 2025).

Insbesondere die NKWS (BMUV 2024) regt die Regionalisierung von Rohstoffflüssen an und unterstützt den Aufbau regionaler Bauteilbörsen sowie regionaler Sekundärrohstoffzentren.

Verschiedene Regionen zeichnen sich unter anderem durch Unterschiede des Vorkommens sowohl von Flächen und Rohstoffen als auch des anthropogenen Lagers aus. Daran anknüpfend hat die Regionalisierung von Stoffkreisläufen den Vorteil, dass regionale Kontexte in die jeweiligen Kreisläufe mit einbezogen und entsprechend beachtet und genutzt werden können, beispielsweise urbane und ländliche Regionen, Tagebau-, Bergbau- sowie landwirtschaftlich genutzte Landschaften.

Implikationen von Transportentfernungen

Insbesondere bei großen Materiallagern und einer Rückbaudynamik von ist darauf zu achten, das Urban Mining ressourcenschonend auszugestalten. Hierbei sind insbesondere bei mineralischen Materialien nicht nur Gewinnung und Aufbereitung maßgeblich, sondern vor allem auch die Umweltauswirkungen durch den Transport der Sekundärmaterialien. Diese lassen sich insbesondere durch die Reduzierung von Transportwegen großer Materialmassen durch Vor-Ort-Verarbeitung signifikant beeinflussen. Eine Regionalisierung des Urban Mining, d.h. regionale Verarbeitung, Verwertung und Wiedereinsatz von wiedergewonnenen Materialien ist daher ein grundsätzliches Ziel der UMS

Regionalisierte Stoffströme und -kreisläufe haben außerdem den Vorteil, dass sie sich an eventuell vorhandenen regionalen Rohstoffstrategien orientieren können (s. Abschnitt 1.3). Kurze Transportwege reduzieren die lebenszyklusweiten Emissionen, insb. bei großen Massen von Materialien, deren Produktion, Aufbereitung und Wiederverwendung relativ unkompliziert ist (z. B. mineralische Baumaterialien). Außerdem erhöhen kurze Transportwege die Flexibilität der logistischen Abläufe, was lange Lagerhaltung und damit die zwingende Vorhaltung von Lagerflächen reduziert. Dieses Just-in-Time-Prinzip funktioniert bereits und kann für weitere regionalisierte Logistikprozesse genutzt werden.

Abbau- und Lagerflächen

Das Vorkommen von Abbaufächen von Rohstoffen sowie Flächen für Zwischenlager von aufzubereitenden Materialien aus langlebigen Gütern unterscheidet sich regional, ebenso wie die relevante Wirtschaftsstruktur. Dies umfasst auch technische Sortier- und Aufbereitungsmöglichkeiten durch und die Abfall- und Recyclingwirtschaft sowie die regionale Transport- und Logistikwirtschaft. Bei Vorhandensein dieser Struktur ergibt sich ein ökonomischer Vorteil durch Einsparung von Transportkosten sowie sozial-ökonomische Vorteile durch sozialen Zusammenhalt und endogene Regionalentwicklung. Beispielsweise können durch sowohl direkte Interaktion auf Akteursebene als auch durch indirekte Interaktion und räumliche kollektive Nähe Ressourceneinsparungen angestoßen werden. (Fromhold-Eisebith 2022).

Manche Regionen haben Schwierigkeiten mit der regionalen Versorgung mit Primärrohstoffen, die durch die regionale Nutzung der bereits vorhandenen Materialien abgemildert werden können. Dies leistet einen wichtigen Beitrag zur autarken Rohstoffversorgung. Entsprechend wird die Regionalisierung von Stoffströmen und -kreisläufen nicht nur als Mittel, sondern auch als Ziel betrachtet, soweit dem nicht einschlägige (bspw. ökonomische oder politische) Argumente für interregionalen Austausch entgegenstehen. Solche Argumente könnten zum Beispiel Wettbewerbsstärkung oder die Einhaltung von Umweltzielen sein. So könnte zum Beispiel die gemeinsame Einrichtung eines produktspezifischen Rücknahmesystems über Regionen hinweg ökonomisch und ökologisch sinnvoller sein, als mehrere solcher Systeme auf regionaler Ebene einzurichten.

Bereitstellung von Informationen

Die Regionalisierung von Stoffkreisläufen setzt die Verfügbarkeit von Materialinformationen voraus. Diese müssen in harmonisierter Form, möglichst zentral und niedrigschwellig zur Verfügung gestellt werden. Hierzu eignen sich z.B. Materialkataster oder Gebäude- und Anlagenpässe. So kann das (regionale) Vorhandensein verwertbarer Materialien kommuniziert und abgerufen werden, was die kurz- und mittelfristige Wiederverwendung bei gleichzeitig optimierten Transportdistanzen ermöglicht. Darüber hinaus gewinnen sogenannte Digital Twins – digitale Modelle von Gebäuden – insbesondere in der Bauwirtschaft mehr und mehr an Bedeutung. Diese ermöglichen Informationen über verbaute Materialien in höchstmöglicher Auflösung. Die genannten Instrumente können maßgeblich dazu beitragen, Entscheidungen im Lebenszyklus von Bauwerken auf eine rohstoffschonende und kreislauforientierte Bewirtschaftung der Materialien auszurichten und strategische Planungsprozesse im Ressourcenmanagement zu unterstützen. Die Anwendung regionaler, möglichst dynamischer Materialkataster eröffnet strategische Gestaltungsmöglichkeiten mit immenser Tragweite und Hebelwirkung zum Urban Mining einschließlich des enorm an Bedeutung gewinnenden Klimaschutzes sowie der regionalen Rohstoffsicherung. (Schiller et al. o. J.) Regionalisierung ist damit in hohem Maße mit dem Querschnittsthema der Digitalisierung verknüpft. Die Digitalisierung stellt dabei eine Umsetzungshilfe für das Urban Mining da, während die Regionalisierung von Stoffströmen und -kreisläufen eine Voraussetzung für die Umsetzung desselben ist.

Regionale Entwicklungsziele des Urban Mining

Gut funktionierende regionale Stoffkreisläufe hängen davon ab, dass regionale Akteur*innen sich auf gemeinsame Entwicklungsziele verständigen (Mathias et al. 2024). Eines dieser Entwicklungsziele sollte die Regionalisierung dieser Kreisläufe selbst darstellen, da die Verantwortung für die Umsetzung des Urban Mining maßgeblich bei den Regionen und Kommunen selbst liegt. Weitere materialspezifischere Ziele sind in den Maßnahmenpaketen der einzelnen Aktionsfelder dieses Strategiedokuments formuliert. Je nach wirtschaftlicher Struktur und Ressourcenverfügbarkeit sind die Regionen angehalten, eigene und spezifische Prioritäten zu setzen. Prioritäten können sich auf einzelne Aktionsfelder, strategische Ziele oder auch ausgewählte Maßnahmen beziehen, die die lokalen und regionalen Akteure in den Vordergrund stellen. Dabei kann einzelnen Regionen durch solche Zielsetzungen und die Umsetzung von spezifischen Maßnahmen eine Leuchtturmfunktion zukommen, die wiederum der Skalierung von Lösungen über die jeweilige Region hinaus zugutekommen kann.

Organisation der Zusammenarbeit

Regionalisierte Beiträge zum Urban Mining bedürfen Personen und Organisationen, die sich aktiv, strategisch und kontinuierlich dafür einsetzen. Regionalisierung im Sinne des Urban Mining beruht auf dem Einsatz von Promotor*innen, wobei typischerweise zwischen Fach-, Macht- und Prozesspromotor*innen unterschieden wird:

- ▶ Fachpromotor*innen konkretisieren die Inhalte der strategischen Ziele und Maßnahmen unter Berücksichtigung regionaler Rahmenbedingungen. Hierzu gehören zum Beispiel Wissenschaft und Expert*innen, die (regionale) Strategien erstellen.
- ▶ Machtpromotor*innen sorgen dafür, dass Ziele und Maßnahmen tatsächlich umgesetzt werden. Hier sind beispielsweise lokale, regionale und überregionale Entscheidungsträger*innen gemeint, die mit der Macht, entsprechende Prozesse in Gang zu setzen, ausgestattet sind.
- ▶ Prozesspromotor*innen organisieren die Zusammenarbeit, die für ein regionalisiertes Urban Mining erforderlich ist unter Berücksichtigung öffentlicher, privater und intermediärer

Akteur*innen. Hierbei kann es sich zum Beispiel um Akteur*innen der Privatwirtschaft, aber auch um Vertreter*innen von Fachverbänden handeln.

Im Rahmen der Erstellung der Urban Mining Strategie wurden Vertreter*innen all dieser Promotor*innengruppen mit einbezogen (vgl. Abschnitt 2).

Entsprechend den Herausforderungen des Urban Mining muss der Strategieentwicklungsprozess auch regional organisiert werden, beispielsweise durch eine dafür eingerichtete Koordinierungsstelle (vgl. Mathias et al. 2024; Fromhold-Eisebith 2022). Die organisatorisch-institutionelle *regionale Einbettung* ist bedeutsam für die Wirksamkeit, ebenso wie die Nutzung von Schnittstellen mit dem Querschnittsthema Digitalisierung (s.u.). So können beispielsweise neue digitale Informationsangebote und Instrumente zum Urban Mining realisiert und angewendet werden (BMUV 2024).

Regionalisierung bezieht lokale Entscheidungsträger*innen ein, die über regionalspezifische Kenntnisse verfügen und zügige Genehmigungsprozesse sowie best-practice-Vorhaben auf kommunaler Ebene realisieren können. Voraussetzung dafür sind Wissen und Befähigung dieser lokalen Entscheidungsträger*innen zum Urban Mining, worin derzeit noch ein Engpass liegt.

Dies zeigt sich unter anderem an der niedrigen Zahl an deutschen Partnerkommunen/-regionen der *Circular Cities and Regions Initiative* (CCRI) (11) sowie an Fallstudienregionen und -kommunen, die bereits Pilot- oder Modellprojekte vorweisen können (Mathias et al. 2024). Entsprechend müssen öffentliche Akteur*innen generell Wissen, Fähigkeiten und Erfahrungen zur Kreislaufwirtschaft und das Urban Mining entwickeln – auch, um regionale Privatakteur*innen, Unternehmen und kommunale Eigenbetriebe für solche Pilotvorhaben gewinnen zu können. Regionsspezifische Probleme können auf regionaler Ebene am besten gelöst sowie regionale Potenziale in derselben Region am besten genutzt werden (Fromhold-Eisebith 2022). Entsprechend sollte dafür gesorgt werden, bestehende Expertise und regionale Netzwerke zu halten und zu stärken.

Partnerschaften aus Kommune, Wirtschaftsförderung und lokalen Unternehmen werden als gute Akteur*innen-Kombination erfahren. Sie binden Akteur*innen mit wirtschaftlichem Interesse an der Kreislaufwirtschaft ein. So wird das Urban Mining von der politisch und wissenschaftlich dominierten Ebene in die Zivilgesellschaft und den privaten Sektor „transferiert“. Unterstützend zu regionalen Akteur*innen könnten insbesondere Programme wie *Wandel durch Innovation in der Region* (WIR! 2019) des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt sowie das Kompetenzzentrum für zirkuläre Wirtschaft und Ressourceneffizienz im BMUKN (VDI ZRE) als beratende*r Akteur*in bzw. Knowledge Hub herangezogen werden.

4.3 Digitalisierung

Die Entwicklung und Umsetzung einer nationalen Urban Mining Strategie als wesentlicher Beitrag zur Kreislaufwirtschaft ist eng mit der Transformation durch digitale Technologien verbunden. Der Koalitionsvertrag der 21. Legislaturperiode sieht folgerichtig eine Digitalisierungsinitiative zur Schließung von Stoffkreisläufen vor (KoaV 2025, Zeile 305). Die Kreislaufwirtschaft insgesamt und Urban Mining im Speziellen bedingen das Vorhalten und den Austausch von Daten entlang der Wertschöpfungsketten mitsamt den damit einhergehenden Verzögerungen, die sich nach den teils jahrzehntelangen Verweilzeiten der betreffenden Produkte und Güter richten. Hierfür sind neue Datenökosysteme mit einer Vielzahl digitaler Instrumente in der Entwicklung. Darüber hinaus gestatten es digitale Technologien und Anwendungen, Prozesse der Prospektion, Exploration sowie der Ausbeutung und Aufbereitung anthropogener Materialströme sehr viel vorausschauender und effektiver durchzuführen. Dies umfasst u.a. KI, Prozesssimulation, Cloud Computing, Robotik, Internet of things, Distributed Ledger Technologien, cyber-

physische Systeme, Datenräume und Kommunikationstechnologien. (Schmidt & Weber 2024) Diese ermöglichen auch eine verlässliche Planbarkeit und deutlich sinkende Transaktionskosten, die eine Vielzahl von Hemmnissen bei der Etablierung von ressourcenschonenden, umweltverträglichen Stoffkreisläufen und dem Einsatz von Sekundärrohstoffen zu überwinden helfen.

Zwei Bereiche versprechen für die Zukunft einen sehr großen Stellenwert zum Urban Mining. Zum einen werden an digitale Produktpässe große Erwartungen geknüpft und diese in den Mittelpunkt einer nachhaltigen europäischen Produktpolitik gestellt (EU COM 2025c; ESPR 2024). Daran angeknüpft sind skalierte Modelle und Datenbanken wie Produkt- und Materialkataster, insbesondere im Bauwesen. Zum anderen eröffnen spektroskopische Sensorik und KI-gestützte Erkennungssysteme in Kombination mit Innovationen in der Robotik interessante Perspektiven für eine optimierte Zerlegung von End-of-Life-Produkten und der Sortierung von Komponenten und Materialgruppen. Damit werden wesentliche Anforderungen an eine bessere Verwertung von komplexen End-of-Life-Produkten adressiert.

Digitale Produktpässe für Urban Mining nutzen

Mit Verabschiedung der Europäischen Batterieverordnung (BattVO 2023), die u.a. für diverse Batterietypen wie Antriebsbatterien von Elektrofahrzeugen bei Inverkehrbringung ab Februar 2027 eine elektronische Akte, den „Batteriepass“ verbindlich vorschreibt und deren Umsetzung in nationales Recht mit dem Batterie-Durchführungsgesetz (BattDG) sind digitale Produktpässe in den Fokus von Fachdiskussionen gerückt. Auch wenn eine Reihe von Details beim Batteriepass noch erarbeitet und abgestimmt werden müssen und die EU Kommission noch zugeordnete Durchführungsrechtsakte beschließen muss, ist bereits bekannt, dass mit Hilfe digitaler Unterstützung über QR-Codes, die auf den Batterien aufgebracht sind, Marktteilnehmern wie Reparaturbetrieben, Wiederverwertern, Nutzern von Second-Life-Batterien und Recyclingbetreibern wichtige Informationen zur Optimierung ihrer Aktivitäten an die Hand gegeben werden sollen. Der Batteriepass ist der erste auf europäischer Ebene eingeführte digitale Produktpass. Er fungiert als Pilot für weitere Produktgruppen, die sich in der Planung und Erarbeitung befinden.

In den Fachgesprächen zu Fahrzeugen, Windkraftanlagen sowie PV-Anlagen im Zuge der Strategieerarbeitung wurden digitale Produktpässe von den Teilnehmenden als innovative Maßnahmen zur Förderung des Urban Mining bei diesen Produktgruppen bzw. Gütern stark favorisiert. Auf regulatorischer Ebene zeichnet sich die Einführung weiterer digitaler Produktpässe (nach dem Batteriepass) durch die Verabschiedung der neuen EU-Verordnung für das Ökodesign nachhaltiger Produkte (ESPR 2024) in den nächsten Jahren klar ab (Umweltbundesamt 2024). Die EU-Kommission hat hierzu bereits einen Fahrplan vorgelegt, der unter anderem auch Stahl, Aluminium, Reifen, Möbel und Textilien als die kommenden Pilotsegmente vorsieht. Langfristig soll der DPP für alle Produktgruppen verbindlich werden.

Die Details für die digitalen Produktpässe für die unterschiedlichen Produktgruppen werden in den nächsten Jahren sukzessive über zugeordnete Durchführungsrechtsakte konkretisiert. Für die nationale Urban Mining Strategie ergeben sich durch diese weitgehenden Rahmensetzungen, die es so mitzugestalten gilt, dass die DPP ihre Potenziale entfalten können, aussichtsreiche Perspektiven. Die konkrete Umsetzung und Anwendung der digitalen Produktpässe in Deutschland wird ungeachtet der unmittelbaren Gültigkeit der ESPR in den Mitgliedstaaten eine anspruchsvolle Herausforderung für die administrativen Akteure und die in den jeweiligen Wertschöpfungsketten betroffenen Unternehmen in Deutschland darstellen. Wichtig ist hierbei, die DPP praktikabel und entsprechend den entscheidungsrelevanten Informationsbedarfen der Akteure zu konzipieren. Darüber hinaus kann Einfluss auf das zügige Ausdehnen auf weitere Produktgruppen wie wichtige Industriegüter (insb. WEA) genommen werden.

Einsatz von KI-gestützten Erkennungssystemen in Kombination mit Robotik

Eine der größten Herausforderungen für die reale Erschließung weiterer Sekundärrohstoffpotenziale im Rahmen des Urban Mining liegt in der hohen Komplexität und Heterogenität vieler Produkte und Güter begründet. Am Ende ihrer Nutzungsphase gelangen diese Produkte und Güter idealerweise in eine geordnete Entsorgungswirtschaft und stellen die dortigen Akteur*innen bzgl. effizienter Zerlegung und Sortierung in möglichst homogene, qualitätsgerechte Materialgruppen vor erhebliche Probleme. Dies gilt für heterogene Bauabbruchfälle, elektronische Geräte jeder Art, Fahrzeuge und viele andere End-of-Life-Produkte. Sehr aufwendigen manuellen Zerlegungsprozessen sind in einem Land mit relativ hohen Lohnkosten wie Deutschland betriebswirtschaftlich enge Grenzen gesetzt.

Als Lösungen bieten sich aufgrund der sehr hohen Innovationsdynamik im Bereich KI sowie Robotik zunehmend automatisierte Teilschritte für die Zerlegung und Materialsortierung an. So können KI-gestützte optische Erkennungssysteme unterstützt mit immer leistungsfähigeren Ansätzen aus der Datenfusion, der modelprädiktiven Regelung und dem Deep-Learning beispielsweise post-consumer-Kunststoffe erheblich besser sortiert und damit dem werkstofflichen Recycling zugänglich gemacht werden (Fraunhofer IOSB 2025). Das mit der weiteren Entwicklung von KI-gestützten Erkennungssystemen (in Kombination mit entsprechender Datenverarbeitung, Sensor- oder durch Robotik-gestützten Trennverfahren) erwartbare immense Potenzial für das Urban Mining wird bereits von mehreren Bundesministerien durch das Aufsetzen zugechnittener Förderprogramme zur Forschungs- und Entwicklung unterstützt (BMFTR 2024b, BMW 2025). Für die Realisierung der nationalen Urban Mining Strategie ist in den kommenden Jahren eine verstärkte Förderung entsprechender Innovationen durch die jeweiligen Bundesressorts von eminenter Bedeutung.

5 Strategiestatus und Perspektiven

Das vorliegende Dokument soll als Nucleus einer thematischen Strategie zum Urban Mining in der Bundesrepublik Deutschland dienen. Mit dessen Erarbeitung wurde bereits ein umfassender Strategieprozess initiiert. Der Strategiebericht bildet die Vorbereitungs- und Entwicklungsphasen derselben ab (siehe Abbildung 7).

Dabei wurden der Gegenstandsbereich und die grundsätzlichen Ziele der Urban Mining Strategie abgesteckt, die Wissensstände der Vorarbeiten erhoben, Aktionsfelder priorisiert und analysiert, hieran anknüpfend Ziele und aussichtsreiche Maßnahmen abgeleitet. Einen großen Stellenwert hatte hierbei die Einbindung und Aktivierung von relevanten Akteuren - sowohl mit der institutionellen Einrichtung eines Steuerungsbegleitkreises als auch mit thematischen Fachgesprächsformaten. Hiermit wurde nicht nur für die Notwendigkeit des Urban Mining sensibilisiert, sondern auch die Legitimation des Strategieberichts gestärkt und ein Netzwerk an neuralgischen Multiplikatoren geschaffen.

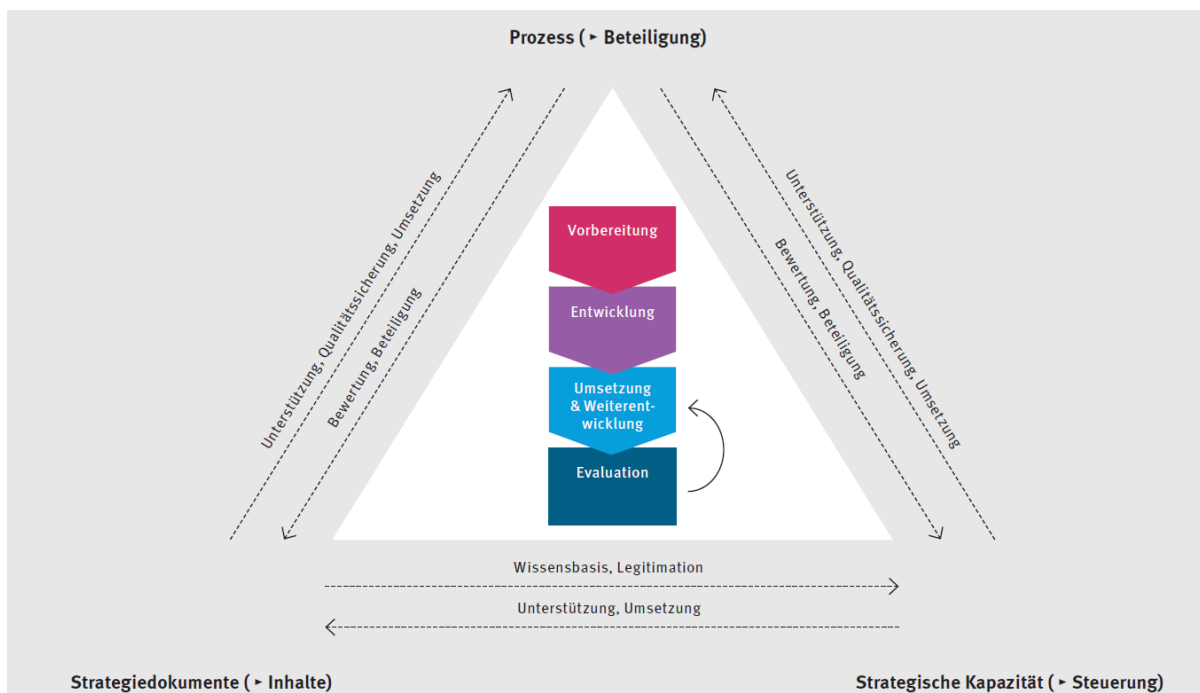
Der Bericht bildet das Bindeglied zur Umsetzung der Strategie und der Stärkung und Verstärkung des Prozesses. Angesichts der partizipativen und logischen Systematik ist der Strategiebericht geeignet, einen robusten Orientierungsrahmen für die langfristigen Ziele des Urban Mining zu geben. Dieser erfährt ein außerordentlich hohes Maß an Zustimmung in der Gesellschaft und der Wirtschaft. Darunterliegend wurden in den Aktionsfeldern Betrachtungsebenen aufgebaut, die geeignet sind, das kurz- bis mittelfristige Handeln relevanter Akteure anzuleiten und zu koordinieren. Im Wissen um sich schnell verändernde Rahmenbedingungen und Umfeldbedingungen der Rohstoffpolitik und der Kreislaufwirtschaftspolitik insgesamt bietet die Systematik eine große Flexibilität, um zukünftig im Strategieprozess neue Aktionsfelder für weitere wichtige Kompartimente des anthropogenen Lagers aufzunehmen. Ebenso lassen sich neue oder veränderte strategische Ziele definieren oder normativ ableiten sowie weitere Akteure mit ihren Handlungszielen aufnehmen.

Um die Urban Mining Strategie als einen solchen thematischen Lern- und Entwicklungsprozess zu begreifen, soll diese eine regelmäßige Bestandsaufnahme und Evaluation erfahren. Neben der Umsetzung und Weiterentwicklung des Prozesses in den jeweiligen Aktionsfeldern ist ein Monitoring und Sichtbarmachen der Aktivitäten zum Verfolgen der Strategieziele in ihrer ganzen Breite wichtig. So können weitere Umsetzungsakteure sensibilisiert und aktiviert werden. Desgleichen sind Analysen zu den Querschnittsthemen wichtig, um Potenziale und Risiken des Urban Mining hinreichend abbilden und berücksichtigen zu können.

Es wurden die Voraussetzungen geschaffen, um Urban Mining als effektiven, zielgerichteten und langfristigen Prozess in der Bundesrepublik zu implementieren, der die Rohstoffsouveränität steigert, die Schonung natürlicher Ressourcen stärkt, Umweltbelastungen national und in der globalen Dimension der deutschen Volkswirtschaft reduziert sowie ein vorausschauendes und effektiveres Abfallmanagement ermöglicht. Hierfür sind administrative, organisatorische und fachliche Kapazitäten vorzusehen (siehe Abbildung 7).

Für die Koordination des Strategieprozesses ist ein strategisches Zentrum vielversprechend, das die Prozessverantwortung trägt, als Anlaufstelle fungiert, fachliche Unterstützung bündelt und die Transmission der Strategie in anderen Ressorts und Politikebenen vertritt und Impulse von ebenda aufgreift.

Abbildung 7: Einordnung des Strategieprozesses



Quelle: Jacob & Graaf (o. J.)

5.1 Kohärenz mit weiteren Strategien

Die Strategieentwicklung für einen nationalen Urban Mining Prozess muss zahlreiche weitere Strategien und damit verbundene gesetzliche und sonstige Rahmenseetzungen und Operationalisierungen (z.B. über Verordnungen zu definierten Produktgruppen) auf nationaler und EU-Ebene berücksichtigen. Dabei sollen die vielfältigen, sich für die nächsten Jahren abzeichnenden Veränderungen und neuen Entwicklungen im Blick behalten werden.

Das Ziel soll eine große Kohärenz mit diesen anderen Strategien sein. Hierzu muss sich die Urban Mining Strategie neben diesen verorten und einordnen, Ziele, Impulse und Anforderungen in die anderen Strategien geben und gleichsam Rückkopplungen aufnehmen. Weniger geht es hierbei um Abgrenzung als um das Darstellen von Synergien und unterschiedliche Relationen der Betrachtungs- und Handlungstiefen.

Im Anhang B zu diesem Dokument sind wichtige nationale und europäische Strategien und Initiativen aufgelistet, die Schnittstellen und Synergien zur Strategieentwicklung für einen nationalen Urban Mining Prozess aufweisen. Da Urban Mining alle Segmente des anthropogenen Lagers adressiert, sind entsprechende Schnittstellen mannigfaltig.

Wie bereits in Abschnitt 1.3 hervorgehoben, bestehen auf nationaler Ebene vor allem mit der NKWS signifikante Schnittstellen und Synergien (BMUV 2024). Die Urban Mining Strategie, deren Erarbeitungsprozess sich schon länger als die NKWS entspannt, ist als thematische Konkretisierung und gleichermaßen Umsetzung und Fortentwicklung der NKWS mit Blick auf das Schließen von Stoffkreisläufen mittels Recyclings und das Erschließen des Sekundärrohstoffpotenzials des anthropogenen Lagers zu sehen. Sie dient hierbei auch als Evaluations- und Auswertungsebene, im Sinne einer Material- und Güterübergreifenden Querschnittsstrategie, um die Rohstoffsouveränität mithilfe von Sekundärrohstoffen zu steigern.

Dabei ergänzt die Urban Mining Strategie in der Prozesskette zum Recycling die Perspektiven der Prospektion und Exploration anthropogener Lagerstätten sowie deren Ausbeutung und

Nutzbarmachung (Gewinnung der Sekundärrohstoffe) neben der darauffolgenden Aufbereitung und dem Wiedereinsatz im produzierenden Gewerbe. Dabei beinhaltet das vorliegende Strategiedokument mitsamt seinen Anhängen bereits die wesentliche Arbeit zur Prospektion der anthropogenen Lagerstätten in den Aktionsfeldern. Die Urban Mining Strategie kann die NKWS, die als umfassende Strategie zirkulären Wirtschaftens einen weitaus größeren Betrachtungshorizont und damit den Charakter einer Dachstrategie besitzt, durch ihren tiefgegliederten und fachlich ausdifferenzierten thematischen Strategieansatz relevant unterlegen, unterstützen und ergänzen und so ein maßgeblicher Erfolgsfaktor der NKWS sein. Hierzu sollte eine Anbindung des langfristig angelegten Urban Mining Strategieprozesses an die Austauschplattform der NKWS erfolgen, um das Vorhandensein und den Abgleich von Agenda und Zeitplanung sowie Kommunikationsformaten und -kanälen zu gewährleisten. So könnte der Urban Mining Strategieansatz in einem ersten Schritt auch bei den Stakeholderdialogen sowie den Arbeitsgruppen der NKWS Berücksichtigung finden und in ebene Impulse geben. Wichtig ist hierbei auch, die bereits aktivierten, vielfältigen Akteure einzubinden und so Kontinuität und Bestärkung im initiierten Urban Mining Strategieprozess zu wahren.

Als Querschnittsstrategie wird der nationale Urban Mining Prozess außerdem automatisch viele EU-Strategien synergistisch unterstützen (vgl. Abschnitt 1.3). Auf Ebene der konkreten Aktionsfelder (siehe Abschnitt 3) sind Schnittstellen zu produktspezifischen EU-Verordnungen bzw. Richtlinien gegeben. Im Falle der Aktionsfelder, die Batterien umfassen, ist die neue Batterieverordnung (BattVO 2023) zu nennen. Für andere Aktionsfelder wie Fahrzeuge oder Elektro/nikgeräte sind die entsprechenden EU-Richtlinien aktuell in den aufwendigen Revisionsprozessen. Auch hierbei kann der Urban Mining Strategieprozess wichtige Positionen und Anforderungen einbringen, für die vorab bereits eine Auswahl, Diskussion und Einordnung auf fachlicher Ebene erfolgt ist. Gleichsam lassen sich die erfolgenden Revisionen vor dem Hintergrund der Urban Mining Strategieziele evaluieren.

Von großer Relevanz für zahlreiche Aktionsfelder ist die neue EU-Verordnung für das Ökodesign nachhaltiger Produkte (ESPR 2024). Die darin vorgesehenen digitalen Produktpässe können zukünftig eine wichtige Unterstützung für die Erfüllung strategischer Ziele im Rahmen eines nationalen Urban Mining Prozesses leisten. Der Anwendungsbereich der ESPR erfasst alle Produkte i. S. v. Art. 2 Nr. 1 ESPR. Diese sind „alle physischen Waren, die in Verkehr gebracht oder in Betrieb genommen werden“. Der erste Arbeitsplan wurde veröffentlicht (EU COM 2025d). Von den dort genannten Produktgruppen bzw. den Zwischenprodukten sind folgende für das Urban Mining relevant (inkl. vorläufiger Zeitplan für die Annahme): Eisen und Stahl (2026), Aluminium (2027), Elektro- und Elektronikgeräte⁴.

Darüber hinaus können über die BauPVO auf EU-Ebene für den Bausektor Produkthanforderungen in harmonisierten technischen Spezifikationen oder durch einen Durchführungsrechtsakt festgelegt werden. Es soll bis spätestens Januar 2026 der erste Arbeitsplan veröffentlicht werden, in welchem die Reihenfolge der Erarbeitung festgelegt wird. (BauPVO 2024)

5.2 Maßnahmen, Akteur*innen, Adressat*innen und Zeitrahmen

In Abschnitt 3 werden für die ausgewählten Aktionsfelder verschiedene Maßnahmen empfohlen, mit deren Hilfe für die identifizierten strategischen Lücken die entsprechenden Potenziale im Rahmen eines nationalen Urban Mining Prozesses erschlossen werden sollen. Nachfolgend sind in tabellarischen Übersichten für die acht Aktionsfelder die Maßnahmen, die für die Initiierung zuständigen Akteur*innen, die für die Umsetzung wesentlichen Adressat*innen und

⁴ Dabei geht es vor allem um den Rezyklatanteil und die Recyclingfähigkeit von Elektro- und Elektronikgeräten, wobei Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT-Produkte) noch einmal zusätzlich adressiert werden.

Einschätzungen für die zeitliche Verortung (Zeitfenster für Start der Maßnahme) aufgelistet. Die zeitliche Verortung der Maßnahmen ist unterteilt in die Kategorien

- ▶ Kurzfristig: Start der Einführung in den Jahren 2026-2029,
- ▶ Mittelfristig: Start der Einführung in den Jahren 2030-2034 und
- ▶ Langfristig: Start der Einführung im Jahr 2035 oder später.

Die Einteilung von Maßnahmen in die Kategorien kurzfristig, mittelfristig oder langfristig hängt von weiteren Kriterien ab. Neben einer besonderen Dringlichkeit für die Erschließung von Potenzialen spielen Aspekte wie die Komplexität des Vorlaufs bis zur Einführung der Maßnahme, die Fragen von Zuständigkeiten (ggf. mehrere Akteur*innenebenen involviert) und die Berücksichtigung parallellaufender Prozesse (z.B. Revisionsprozesse zu EU-Richtlinien) eine Rolle. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die konkreten Wirkungen der Maßnahmen zur Stärkung des Urban Mining in der Regel erst nach einigen Jahren messbar sein können. Daher ist ein konsequentes Monitoring der Maßnahmen und Handlungsansätze neben der Erfolgskontrolle (Evaluation) (siehe Abschnitt 5.3) sehr relevant.

Nähere Informationen zu den Aktionsfeldern und den vorgeschlagenen Maßnahmen selbst finden sich in Abschnitt 3 sowie den zugeordneten Steckbriefen zu den Aktionsfeldern im Anhang.

Tabelle 2: Aktionsfeld Elektro/-nikgeräte: Maßnahmen, Akteure, Adressaten und Zeitrahmen

Code Maßnahme	Maßnahme	Akteure	Adressaten	Zeitfenster Einführung
EG-R-1	Überarbeitung der Sammelquotenmethodik und Sammelsystem	Bundesregierung/EU	Hersteller	Mittelfristig
EG-R-2	Niedrigschwellige Rückgabe ermöglichen	Bundesregierung/ EU	Rücknahmestellen	Kurzfristig
EG-R-3	Erweiterte Herstellerverantwortung im ElektroG ausweiten	Bundesregierung/ EU	Hersteller	Kurzfristig
EG-R-4	Einführung separater Recyclingquoten für Kunststoffe und Technologiemetalle	Bundesregierung/ EU	Recyclingunternehmen	Mittelfristig
EG-R-5	Vollzug des Exportverbots von nicht funktionsfähigen Geräten	Bundesregierung/ EU	Zollbehörden, Exporteure	Kurzfristig
EG-I-1	Informations- und Aufklärungskampagnen	Bundesregierung	Nutzer	Kurzfristig
EG-I-2	Förderung gezielter Sammelaktionen inkl. Sensibilisierung und Aufklärung	Bundesregierung	Entsorgungsbetriebe, öffentliche Einrichtungen	Kurzfristig
EG-I-3	Zentrale Informationsplattform zu allen Rückgabestellen	Bundesregierung	Sammelstellen, Nutzer	Mittelfristig

Code Maßnahme	Maßnahme	Akteure	Adressaten	Zeitfenster Einführung
EG-Ö-1	Einführung eines Pfandsystems für bestimmte Produktgruppen	Bundesregierung/EU	Hersteller, Sammelstellen, Nutzer	Mittelfristig

Aktionsfeld Elektro/-nikgeräte: Um die Sammelstrukturen zu stärken und die europäischen Vorgaben zu erreichen, sind die Hersteller*innen verstärkt gefordert – sowohl im Aufbau von Sammelsystemen als auch in der Finanzierung von Informationskampagnen und punktuellen Sammelaktionen. Je besser die Sammelstruktur, desto weniger Geräte werden illegal im In- und Ausland entsorgt. Hier profitieren die Maßnahmen voneinander. Die Ausgestaltung der Optimierung der Sammelstrukturen sollte zeitnah angegangen werden, um mittelfristig Erfolge erzielen zu können. Insgesamt wirken die priorisierten Maßnahmen vor allem auf die Verbesserung der Ausbeutung anthropogener Lagerstätten durch Optimierung der Gewinnung, ferner auf die Exploration.

Tabelle 3: Aktionsfeld Fahrzeuge: Maßnahmen, Akteure, Adressaten und Zeitrahmen

Code Maßnahme	Maßnahme	Akteure	Adressaten	Zeitfenster Einführung
FZ-R-1	Export von Gebrauchtfahrzeugen nur bei gültiger Straßenzulassung in der EU	EU/ Bundesregierung	Zollbehörden, Exporteure	Mittelfristig
FZ-R-2	Separationspflicht für bestimmte Bauteile	EU/ Bundesregierung	Verwerter/ATFs*	Kurzfristig
FZ-R-3	Stoffspezifische Rezyklateinsatzquoten	EU/ Bundesregierung	OEMs, Zulieferer	Mittelfristig
FZ-I-1	Digitaler Kreislaufpass für Fahrzeuge	EU/ Bundesregierung	Alle Akteure der Wertschöpfungskette	Mittelfristig
FZ-Ö-1	Abgabe bei Inverkehrbringung eines Fahrzeugs zur Finanzierung der Recyclingsysteme bestimmter Komponenten	EU/ Bundesregierung	OEMs, Zulieferer	Mittelfristig
FZ-Ö-2	Staatliche Förderung des Aufbaus von Kapazitäten hochwertiger Recyclingprozesse	EU/ Bundesregierung	Recyclingunternehmen	Kurzfristig

* ATF = Authorized Treatment Facility

Aktionsfeld Fahrzeuge: Die meisten der vorgeschlagenen Maßnahmen sollten zügig in den nächsten Jahren vorbereitet und gestartet werden. Dabei sind die zeitlich parallel ablaufenden Entwicklungen im Zusammenhang mit der neuen EU-Verordnung für das Ökodesign nachhaltiger Produkte (ESPR 2024) hinsichtlich Produktpässen sowie der vorgesehenen neuen EU-Altfahrzeug-Verordnung (AltfahrzeugVO-Entwurf 2023) zu berücksichtigen. Die Maßnahmen erstrecken sich entlang der Prozesskette von Exploration über die Gewinnung, Aufbereitung und den Wiedereinsatz von Sekundärrohstoffen.

Tabelle 4: Aktionsfeld Lithium-Ionen-Batterien: Maßnahmen, Akteure, Adressaten und Zeitrahmen

Code Maßnahme	Maßnahme	Akteure	Adressaten	Zeitfenster Einführung
LIB-R-1	Einschränkung des Exports von Schwarzmasse in nicht-EU-Länder	EU/ Bundesregierung	Zollbehörden, Recyclingindustrie	Kurzfristig
LIB-I-1	Ausgestaltung des Batteriepass.	EU/ Bundesregierung	Alle Akteure der Lieferkette	Kurzfristig
LIB-Ö-1	Förderung des Kapazitätsaufbaus für hochwertiges Recycling	EU/ Bundesregierung	Recyclingindustrie	Kurzfristig
LIB-Ö-2	Finanzierung des Recyclings durch Abgabe bei Inverkehrbringung	EU/ Bundesregierung	Inverkehrbringer	Mittelfristig

Aktionsfeld Lithium-Ionen-Batterien: Da der Aufbau einer konkurrenzfähigen Recyclingindustrie für LIB an sich einige Zeit in Anspruch nehmen wird, sollten die entsprechenden Maßnahmen, die diesen anstoßen sollen, zeitnah realisiert werden. Insbesondere im Fall der Ausgestaltung des Batteriepasses (BattVO 2023) sowie der Einschränkung des Exports von Schwarzmasse sind die entsprechenden Prozesse bereits gestartet. Der Schwerpunkt der Instrumente liegt auf der Aufbereitung der gewonnenen Sekundärrohstoffe.

Tabelle 5: Aktionsfeld Windenergieanlagen: Maßnahmen, Akteure, Adressaten und Zeitrahmen

Code Maßnahme	Maßnahme	Akteure	Adressaten	Zeitfenster Einführung
WEA-R-1	Verpflichtender Ausbau und Recycling von Permanentmagneten	EU/ Bundesregierung	Rückbau-Verantwortliche, Recycler	Mittelfristig
WEA-I-1	Digitaler Kreislaufpass für Windkraftanlagen	EU/ Bundesregierung	Alle Akteure der Lieferkette	Mittelfristig
WEA-I-2	Kennzeichnungspflicht für Kohlenstoffverstärkte Kunststoffe	EU/ Bundesregierung	Inverkehrbringer/ Zulieferer	Kurzfristig
WEA-Ö-1	Abgabe bei Bau einer Windkraftanlage für das Recycling	EU/ Bundesregierung	Inverkehrbringer	Mittelfristig
WEA-Ö-2	Finanzielle Förderung von innovativen Recycling- und Produktionsprozessen für hochwertige Sekundärprodukte	EU/ Bundesregierung	Recycler	Mittelfristig
WEA-Ö-3	Förderung von Forschung zur Verbesserung des Recyclings von Rotorblättern	EU/ Bundesregierung	Recycler, Forschung	Kurzfristig

Aktionsfeld Windenergieanlagen: Zwei der priorisierten strategischen Lücken im Aktionsfeld - das Recycling von Permanentmagneten sowie Faserverbundstoffen aus Rotorblättern - beinhalten die Entwicklung neuer Strukturen und Verfahren. Die entsprechenden Maßnahmen

sollten deshalb möglichst zeitnah eingeleitet werden, um die langfristige Wirkung zu gewährleisten, da die Umsetzung bis zur flächendeckenden Realisierung einen langen Vorlauf bedingt. Die Instrumente legen einen Schwerpunkt auf die Verbesserung der Exploration sowie die Aufbereitung der Sekundärrohstoffe.

Tabelle 6: Aktionsfeld Photovoltaikanlagen: Maßnahmen, Akteure, Adressaten und Zeitrahmen

Code Maßnahme	Maßnahme	Akteure	Adressaten	Zeitfenster Einführung
PVA-R-1	Rückgewinnungsquoten für Glas, Silber und Silizium aus PV-Anlage	EU/ Bundesregierung	Recycler	Mittelfristig
PVA-I-1	Standardisierung von Identifizierungsnummern, Digitaler Kreislaufpass für PV-Anlagen	EU/ Bundesregierung	Alle Akteure der Lieferkette	Mittelfristig
PVA-I-2	Entsorgungsinformationen für Nutzer	Bundesnetz-agentur	Nutzer	Kurzfristig
PVA-Ö-1	Finanzielle Förderung von innovativen Recycling- und Produktionsprozessen für hochwertige Sekundärprodukte	EU/ Bundesregierung	Recycler	Kurzfristig

Aktionsfeld Photovoltaikanlagen: Es lassen sich die Maßnahmen, die auf die effizientere Sammlung von EoL-Modulen abzielen, kurzfristig umsetzen, da sie hauptsächlich organisatorischer Art sind. Die Verbesserung der Verarbeitung im Recycling lässt sich dann als zweiter Schritt auf mittelfristiger Zeitskala anschließen, wenn mehr besser sortierte Module in die Verwertung gegeben werden. Die Maßnahmen setzen bei Exploration, Gewinnung und Aufbereitung an.

Tabelle 7: Aktionsfeld Fossile und Nukleare Kraftwerke: Maßnahmen, Akteure, Adressaten und Zeitrahmen

Code Maßnahme	Maßnahme	Akteure	Adressaten	Zeitfenster Einführung
FNK-R-1	Anpassung des regulatorischen Rahmens, um den Strukturwandel durch nachhaltige Flächennutzung zu fördern	Bundesregierung, Regierungen der Länder	Kommunen, öffentliche Stellen, Planer*innen	Mittelfristig
FNK-R-2	Die Genehmigungsprozesse für Rückbauprojekte optimieren	Bundesregierung, Regierungen der Länder	Kommunen, öffentliche Stellen, Planer*innen, Rückbau-Verantwortliche	Kurzfristig
FNK-R-3	Optimierung des Freigabeprozesses für rückgebaute Komponenten	Bundesregierung, Regierungen der Länder	Kommunen, öffentliche Stellen, Planer*innen, Rückbau-Verantwortliche, Recycler	Kurzfristig

Code Maßnahme	Maßnahme	Akteure	Adressaten	Zeitfenster Einführung
FNK-I-1	Aufbau einer zentralen digitalen Informationsplattform	Bundesregierung	Planer*innen, Wissenschaftler*innen, Rückbau-Verantwortliche	Mittelfristig
FNK-I-2	Dokumentation laufender Rückbauvorhaben und Aufbau einer Best-Practice-Sammlung	Bundesregierung, Regierungen der Länder	Kommunen, öffentliche Stellen, Planer*innen, Rückbau-Verantwortliche	Kurzfristig
FNK-I-3	Aufbau eines zentralen Materialregisters zur Erfassung des Rohstoffpotenzials	Bundesregierung	Planer*innen, Wissenschaftler*innen, Rückbau-Verantwortliche	Kurzfristig
FNK-Ö-1	Stärkung der Kreislaufwirtschaft im Kraftwerksrückbau	Bundesregierung	Rückbau-Verantwortliche, Recycler	Mittelfristig
FNK-Ö-2	Förderung des Rückbaus beim Einhalten bestimmter Recyclingquoten	Bundesregierung	Rückbau-Verantwortliche, Recycler	Mittelfristig
FNK-Ö-3	Förderung des Rückbaus zur Unterstützung des Strukturwandels durch nachhaltige Flächennutzung	Bundesregierung, Regierungen der Länder	Kommunen, öffentliche Stellen, Planer*innen	Mittelfristig

Aktionsfeld Fossile und Nukleare Kraftwerke: Für das Aktionsfeld gilt es zunächst die Materialinventare der großen Kraftwerke umfassender und detaillierter zu erfassen und die gewonnenen Daten in Materialregistern und Informationsplattformen einzuspeisen. Optimierte Rückbauprozesse sollen über finanzielle Förderungen und effizientere Genehmigungsprozesse unterstützt werden, um eine optimale Erschließung der Sekundärrohstoffpotenziale sicherzustellen. Im Falle des Rückbaus Nuklearer Kraftwerke ist die Optimierung der Freigabeprozesse für rückgebaute Komponenten relevant – ohne dabei Anforderungen des Strahlenschutzes zu schwächen. Die Maßnahmen adressieren vor allem die Exploration, Gewinnung und Aufbereitung der Sekundärrohstoffe.

Tabelle 8: Aktionsfeld Mineralische Baustoffe im Hochbau und Tiefbau sowie Straßen und Brücken: Maßnahmen, Akteure, Adressaten und Zeitrahmen

Code Maßnahme	Maßnahme	Akteur*innen	Adressat*innen	Zeitfenster Einführung
MB-I-1	Erstellung regionaler Materialkataster	Bundesregierung, Länder, Kommunen	Bauunternehmen, Planende	Kurzfristig
MB-I-2	Öffentliche Förderung der Datenerhebung	Bundesregierung, Länder, Kommunen	Bauunternehmen, Planende	Kurzfristig
MB-I-3	Bereitstellung von Best-Practice-Sammlungen	Bundesregierung, Länder, Kommunen	Bauunternehmen, Planende, Bauherr*innen	Mittelfristig
MB-Ö-1	Kostenerhöhung für Verfüllung und Ablagerung	Bundesregierung, Länder, Kommunen	Entsorgungsunternehmen, Bauunternehmen	Kurzfristig

Code Maßnahme	Maßnahme	Akteur*innen	Adressat*innen	Zeitfenster Einführung
MB-Ö-2	Bevorzugung von Sekundärrohstoffeinsatz	Bundesregierung, Öffentliche Hand	Öffentliche Hand, Planende, Bauunternehmen	Kurzfristig
MB-Ö-3	Begründungspflicht für den Einsatz von Primärmaterialien	Bundesregierung	Öffentliche Hand	Kurzfristig
MB-Ö-4	Förderung von Best-Practice-Beispielen	Bundesregierung, Länder, Kommunen	Bauunternehmen, Planende, Bauherr*innen	Mittelfristig
MB-O-1	Vereinfachung von Genehmigungsprozessen für lokale Aufbereitungsanlagen	Bundesregierung, Länder	Entsorgungsunternehmen, Bau- und Abbruchunternehmen	Kurzfristig
MB-O-2	Erstellung einer digitalen Vernetzungsplattform	Bundesregierung, Länder, Kommunen	Bau-, Abbruch- und Entsorgungsunternehmen, Planende, Bauherr*innen	Kurzfristig
MB-O-3	Förderung bereichsübergreifender Kommunikation	Alle (beteiligten) Akteur*innen	Alle (beteiligten) Akteur*innen	Kurzfristig
MB-O-4	Durchsetzung relevanter vorhandener Gesetzgebung	Entsorgungsunternehmen	Entsorgungsunternehmen, Planende, Abbruchunternehmen	Kurzfristig
MB-O-5	Anpassung von Abfallschlüsselnummern	EU, Bundesregierung	Entsorgungs- und Abbruchunternehmen	Mittelfristig

Aktionsfeld Mineralische Baustoffe im Hochbau und Tiefbau: Da mineralische Baustoffe üblicherweise einen langen Lebenszyklus durchlaufen, ist es für viele Maßnahmen dieses Aktionsfeldes besonders wichtig, sie in naher Zukunft anzustoßen, um messbare Effekte zu generieren. Die Maßnahmen beziehen sich neben der Bereitstellung von Informationen über Art, Verfügbarkeit und Verwendbarkeit der Sekundärrohstoffe schwerpunktmäßig auf die Anpassung entsprechender Vorgaben und Regulierungen sowie die Förderung der Nutzung von Sekundärrohstoffen durch die öffentliche Hand. In der Prozesskettensystematik widmen sie sich somit gleichermaßen der besseren regionalen Prospektion und Exploration wie der Gewinnung, der Aufbereitung und in besonderem Maße der Steigerung des Wiedereinsatzes.

Tabelle 9: Aktionsfeld Kunststoffe in Hoch- und Tiefbau: Maßnahmen, Akteure, Adressaten und Zeitrahmen

Code Maßnahme	Maßnahme	Akteur*innen	Adressat*innen	Zeitfenster Einführung
KB-R-1	Rezyklateinsatzquote bei Kunststoffen	EU, Bundesregierung	Hersteller*innen, Produktanbiert*innen, Recyclingunternehmen	Kurzfristig
KB-I-1	Verbesserung der Datengrundlage	Bundesregierung, Länder, Kommunen	Bauunternehmen, Planende	Kurzfristig

Code Maßnahme	Maßnahme	Akteur*innen	Adressat*innen	Zeitfenster Einführung
KB-I-2	Information über geeignete Einsatzmöglichkeiten von Recyclingkunststoffen im Baubereich	Bundesregierung, Länder, Kommunen, Bildungseinrichtungen für Planende	Bauunternehmen, Planende, Bauherr*innen,	Kurzfristig
KB-Ö-1	Ökonomische Vorteile für Getrennterfassung und Verwertung schaffen	Bundesregierung, Länder, Kommunen	Entsorgungs-, Bauunternehmen, Planende	Kurzfristig
KB-Ö-2	Forschung und Entwicklung fördern	Bundesregierung, Länder, Kommunen	Forschung, Entwicklung	Kurzfristig
KB-O-1	Qualitätssteigerung durch Getrennterfassung	Bau- und Entsorgungsunternehmen, Planende	Entsorgungsunternehmen	Mittelfristig
KB-O-2	Bevorzugung von Recyclingkunststoffen in öffentlichen Ausschreibungen	Bundesregierung	Öffentliche Hand, Planende, Bauunternehmen	Kurzfristig
KB-O-3	Ausbau geeigneter Rücknahmesysteme und Standardisierung	Bundesregierung, Länder, Kommunen, Produktanbieter	Abbruch-, Entsorgungsunternehmen, Produktanbieter*innen	Kurzfristig
KB-O-4	Erweitere Herstellerverantwortung	EU, Bundesregierung	Produktanbieter*innen	Kurzfristig
KB-O-5	Regionale Bereitstellung beweglicher Schreddersysteme	Bundesregierung, Länder, Kommunen	Bauunternehmen, Planende, Bauherr*innen, Abbruch-, Entsorgungsunternehmen	Kurz- bis Mittelfristig

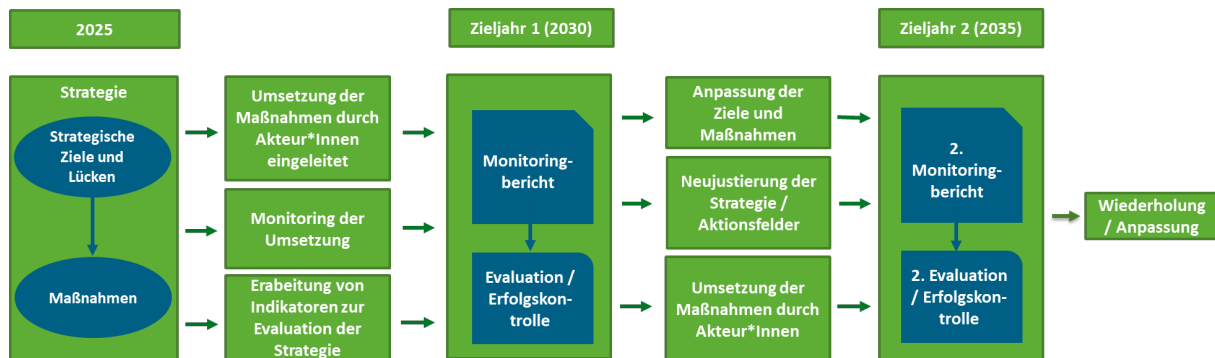
Aktionsfeld Kunststoffe in Hoch- und Tiefbau: Stoffkreisläufe von Kunststoffen im Bausektor können vor allem durch eine sorgfältigere Getrennterfassung und dadurch erfolgende höhere Qualität der Sekundärmaterialien gefördert werden. Hierfür ist ein Ausbau der dafür benötigten Struktur erforderlich, z. B. durch die Bereitstellung von Rücknahmesystemen und eine Ausweitung der Produktverantwortung der Hersteller*innen. Auch hier sollen Maßnahmen aufgrund der langen Lebensdauer von Bauwerken möglichst bald angeschoben werden, um in absehbarer Zeit Effekte zu realisieren. Der Schwerpunkt der Maßnahmen liegt auf Gewinnung, Aufbereitung und Wiedereinsatz der Sekundärkunststoffe.

5.3 Erfolgskontrolle, Indikatoren und Monitoring

Eine Strategieentwicklung für einen nationalen Urban Mining Prozess muss Elemente und Instrumente zur Erfolgskontrolle unbedingt vorsehen. Es wird hierfür alle fünf Jahre ein großes Monitoring mit dem Ziel der Erfolgskontrolle (Evaluation) vorgeschlagen. Operativ sollte sich dafür vor allem an den acht Aktionsfeldern (siehe Abschnitte 3 und 5.2) orientiert werden. Das Monitoring setzt zunächst deskriptiv an der Umsetzung von Maßnahmen und Instrumenten sowie weiteren Lösungsansätzen an. Die Erfolgskontrolle muss sich für jedes Aktionsfeld auf die jeweils identifizierten strategischen Ziele und strategischen Lücken konzentrieren. Je stärker die

strategischen Lücken geschlossen werden konnten, umso stärker werden Erfolge im Sinne des Urban Mining erzielt. Stehen diese im kausalen Zusammenhang mit der Strategie, so wird damit die Wirksamkeit der Strategie unterlegt.

Abbildung 8: Schema des Vorgehens bei der Erfolgskontrolle der Maßnahmen in der UMS



Quelle: eigene Darstellung

Konkret sollten die Zieljahre 2030, 2035, 2040 und 2045 für die großen Monitoring-Runden im Rahmen der Urban Mining Strategie vorgesehen werden. Es wird in Vorbereitung der ersten Monitoring-Runde im Jahr 2030 vorgeschlagen für jedes Aktionsfeld ein Set von geeigneten Indikatoren für das Monitoring vorzusehen. Hierbei ist es erstrebenswert, dass zunächst das Handeln in den Aktionsfeldern im Sinne der Entwicklung und des Aufgreifens von Handlungs- und Lösungsansätzen abgebildet wird. Das Monitoring schafft so einen Überblick von Art, Anzahl und Umfang der Aktivitäten und Prozesse. Für die weitergehende Erfolgskontrolle sind quantitative und qualitative Ziele auszuarbeiten (vgl. Abbildung 8). Die Indikatoren für die Erfolgskontrolle bei den einzelnen Aktionsfeldern können sich unterscheiden. Da die Aktionsfelder anhand unterschiedlicher Kriterien priorisiert wurden (siehe Abschnitt 2) und die strategischen Ziele und strategischen Lücken ebenfalls sehr divers sind, ist die Anwendung eines allgemeinen Sets an Indikatoren nicht zu erwarten.

Es ist daher für eine Erfolgskontrolle der Aktionsfelder und damit der Fortschritte des Urban Mining insgesamt ein wichtiger operativer Schritt diese Indikatoren sorgfältig abzuleiten und auszuwählen. Es können Indikatoren wie z.B. erzielte Einsparungen an Treibhausgasen, absolute Tonnagen zurückgewonnener Sekundärrohstoffe (vor allem bei Massenmaterialien wie mineralische Baustoffe im Sinne der Ressourcenschonung von Relevanz) oder z.B. im Falle einzelner Technologiemetalle die Beitragsquote (Recyclinginputrate in Prozent) des nationalen Bedarfs in einem Erhebungsjahr geeignet sein. Aber auch qualitative Aspekte wie die Erzielung höherer Qualitäten und attraktiver neuer Einsatzmöglichkeiten von Sekundärrohstoffen, die Etablierung von Standards und der Diffusion von Best Practices sind sehr relevant für eine Erfolgskontrolle im Sinne des Urban Mining.

Die Ergebnisse der Monitoring-Runden einschließlich der Evaluation sollten in einem Bericht für die Bundesregierung dokumentiert werden. Neben einer transparenten Darstellung der erzielten Erfolge im Rahmen des nationale Urban Mining Prozesses sind hier vor allem dezidierte Empfehlungen zur Überprüfung, Nachschärfung oder Neusetzung von Maßnahmen wichtig, um in einzelnen Aktionsfeldern etwaige Schwächen bzw. Lücken im Sinne des Urban Mining schnell und effizient zu schließen. Doch noch grundsätzlicher soll die Evaluation Anlässe bieten, um den Strategiprozess mitsamt seinen Aktionsfeldern und darin verorteten strategischen Lücken neu zu adjustieren (S. Abbildung 7).

6 Quellenverzeichnis

AltfahrzeugVO-Entwurf (2023): Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Anforderungen an die kreislaforientierte Konstruktion von Fahrzeugen und über die Entsorgung von Altfahrzeugen, zur Änderung der Verordnungen (EU) 2018/858 und (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinien 2000/53/EG und 2005/64/EG, COM (2023) 451 final

Althoff, E.; Bichlmeier, T.; Bierhaus, L.; Dietzsch, N.; Dambeck, H.; Kemmler, A.; Krampe, L.; Lübbers, M.; Schulz, L.; Phuong Vu, M.; Wendring, P.; Wunsch, A.; Wunsch, M.; Ziegenhagen, I.; Betz, J.; Buchert, M.; Schön-Blume, N.; Eckert, D.; Göckeler, K.; Görz, W.; Heutmanek, U.; Merz, C.; Steinbach, I. (2023): Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045, Stiftung Klimaneutralität (Hg.). https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2023/11/Stiftung_Klimaneutralitaet_2023-Resiliente-Lieferketten_Langfassung-2.pdf (21.07.2025)

Baron, Y.; Kosińska-Terrade, I.; Loew C.; Köhler, A.; Moch, K.; Sutter, J.; Graulich, K.; Adjei, F.; Mehlhart, A. (2023): Study to support the impact assessment for the review of directive 200/53/EC on end-of-life vehicles.

BattVO (2023): Verordnung (EU) 2023/1542 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG, ABl. L 191 vom 28.7.2023, S. 1–191. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj> (15.08.2025)

BauPVO (2024): Verordnung (EU) 2024/3110 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. November 2024 zur Festlegung harmonisierter Vorschriften für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 305/2011, Bauprodukteverordnung (BauPVO) (Text von Bedeutung für den EWR), ABl. L, 2024/3110, 18.12.2024. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/3110/oj> (12.08.2025)

BBodSchV (2021): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). "Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598, 2716)". https://www.gesetze-im-inter-net.de/bbodschv_2023/BJNR271600021.html#BJNR271600021BJNG000100000 (24.09.2025)

Buchert, M.; Bleher, D.; Bulach, W.; Knappe, F.; Muchow, N.; Reinhardt, J.; Meinshausen, I. (2022): Kartierung des anthropogenen Lagers III (KartAL III), Texte | 47/2022, Umweltbundesamt (Hg.), April 2022. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_47-2022_kartierung_des_anthropogenen_lagers_iii.pdf (09.09.2025)

Buchert, M.; Göckeler, K.; Merz, C.; Schön-Blume, N.; Steinbach, I.; Görz, W.; Eckert, D.; Betz, J. (2023): Bedarf strategischer Rohstoffe für den Pkw- und Lkw-Sektor in Deutschland bis 2040, Bericht im Rahmen des Projekts "Analysen und Bewertungen der Klimaschutzwirkung von Instrumenten und Maßnahmen zur Treibhausgasminimierung im Verkehr, Entwicklung von Gestaltungsoptionen" ELMO4010. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (Hg.). 30.11.2023. <https://www.oeko.de//fileadmin/oekodoc/Rohstoffbedarf-PKW-LKW-Szenarien-D.pdf> (08.09.2025)

Bundesministerium Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) (2024a): Förderung von Projekten zum Thema „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Urban Mining: Erschließung anthropogener Lager als Rohstoffquelle“, Richtlinie im Rahmen der Strategie zur Forschung für Nachhaltigkeit zur Förderung von Projekten zum Thema „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Urban Mining: Erschließung anthropogener Lager als Rohstoffquelle“, Bundesanzeiger vom 18.06.2024. <https://www.fona.de/de/kreislaufwirtschaft-urban-mining-anthropoge-lager-als-rohstoffquelle> (23.09.2025)

Bundesministerium Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) (2024b): Bekanntmachung der Richtlinie zur Förderung von Forschungsprojekten zum Thema „Digital GreenTech – Umwelttechnik trifft Robotik“, Bundesanzeiger vom 07.08.2024. <https://www.bmbf.de/SharedDocs/Bekanntmachungen/DE/2024/08/2024-08-07-Bekanntmachung-Digital-GreenTech.html?templateQueryString=K%C3%BCnstliche+Intelligenz> (18.07.2025)

Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2020): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III – 2020 bis 2023) - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen, 17. Juni 2020. https://www.bundesumweltministerium.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/ressourceneffizienz_programm_2020_2023.pdf (15.09.2025)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (Hrsg.). (2024). Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie. https://www.kreislaufwirtschaft-deutschland.de/fileadmin/user_upload/Mediathek/NKWS/nationale_kreislaufwirtschaftsstrategie_bf_final.pdf (19.09.2025)

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2019): Rohstoffstrategie der Bundesregierung, Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffen, Dezember 2019. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/rohstoffstrategie-der-bundesregierung.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (23.09.2025)

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) (2025): GreenTech Innovationswettbewerb – Digitale Technologien als Hebel für die Kreislaufwirtschaft, Förderaufruf auf Grundlage des Förderprogramms „Entwicklung digitaler Technologien“. https://www.digitale-technologien.de/DT/Navigation/DE/Foerderung/Foerderung/Green-Tech_Kreislaufwirtschaft/gt_kreislaufwirtschaft.html (18.07.2025)

Bundesregierung (2020): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie, Weiterentwicklung 2021. <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975274/1873516/9d73d857a3f7f0f8df5ac1b4c349fa07/2021-03-10-dns-2021-finale-langfassung-barrierefrei-data.pdf?download=1> (15.09.2025)

Bundesregierung (2023). Integrierte Sicherheit für Deutschland. Wehrhaft. Resilient. Nachhaltig. Nationale Sicherheitsstrategie. <https://www.bmvg.de/resource/blob/5636374/38287252c5442b786ac5d0036ebb237b/nationale-sicherheitsstrategie-data.pdf> (15.09.2025)

CRMA (2024): Europäisches Parlament, Europäischer Rat (2024) Regulation (EU) 2024/1252 of the european parliament and the council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020, Critical Raw Materials Act (CRMA). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj/eng> (08.09.2025)

DepV (2009): Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV). "Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 3. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 225) geändert worden ist". https://www.gesetze-im-internet.de/depv_2009/BJNR090010009.html#BJNR090010009BJNG000100000 (24.09.2025)

ElektroG (2022): Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz - ElektroG), "Elektro- und Elektronikgerätegesetz vom 20. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1739), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 8. Dezember 2022 (BGBl. I S. 2240) geändert worden ist" https://www.gesetze-im-internet.de/elektrog_2015/ElektroG.pdf (09.09.2025)

Energy-charts (2025): Gesamte Nettostromerzeugung in Deutschland 2023 - Energetisch korrigierte Werte. https://www.energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=de&c=DE&interval=year&year=2023&source=total (12.09.2025)

ErsatzbaustoffV (2021): Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke (Ersatzbaustoffverordnung - ErsatzbaustoffV). "Ersatzbaustoffverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 13. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 186) geändert worden ist". <https://www.gesetze-im-internet.de/ersatzbaustoffv/BJNR259810021.html#BJNR259810021BJNG000100000> (24.09.2025)

ESPR (2024): Verordnung (EU) 2024/1781 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2020/1828 und der Verordnung (EU) 2023/1542 und zur Aufhebung der Richtlinie 2009/125/EG. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj?locale=de> (08.09.2025)

Europäische Chemikalienagentur (2025): SCIP-Datenbank – Substances of Concern In Articles as such or in complex objects (Products). <https://echa.europa.eu/de/scip-database> [10.09.2025]

Europäischer Rat der Europäischen Union (2025): Kreislaufwirtschaft: Rat legt Standpunkt zum Altfahrzeug-Recycling fest. Consilium Europa, Pressemitteilung, 17. Juni 2025. <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2025/06/17/circular-economy-council-adopts-position-on-the-recycling-of-vehicles-at-the-end-of-their-life/> (23.09.2025)

European Commission (EU COM) (2020): A new Circular Economy Action Plan. For a cleaner and more competitive Europe. European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN> (15.09.2025)

European Commission (EU COM) (2025a): The Clean Industrial Deal: A joint roadmap for competitiveness and decarbonisation. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52025DC0085> (15.09.2025)

European Commission (EU COM) (2025b): Europe's Digital Decade | Shaping Europe's digital future <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/europes-digital-decade> (11.09.2025)

European Commission (EU COM) (2025c): Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR) – Making sustainable products the norm in the EU, State of the Union, 10 September 2025. https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/ecodesign-sustainable-products-regulation_en (10.09.2025)

European Commission (EU COM) (2025d): COMMUNICATION FROM THE COMMISSION Ecodesign for Sustainable Products and Energy Labelling Working Plan 2025-2030, COM/2025/187 final, Dokument 52025DC0187, Europäische Union, EUR-Lex, Brussels, 16.4.2025. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52025DC0187&qid=1744814743855> (10.09.2025)

Falkenberg, H.; Krampe, L.; Lampert, J.; Lübbers, S.; Lühr, O.; Sandhövel, M.; Buchert, M.; Sutter, J. (2019): Rohstoffbedarf im Bereich der erneuerbaren Energien, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hg.), 23. August 2019. <https://d-eiti.de/wp-content/uploads/2020/02/Rohstoffbedarf-im-Bereich-der-erneuerbaren-Energien.Langfassung.pdf> (08.09.2025)

Fetting, C., ESDN Office (Hrsg.) (2020). The European Green Deal (ESDN Report). https://www.esdn.eu/fileadmin/ESDN_Reports/ESDN_Report_2_2020.pdf

Fraunhofer IOSB (2025): K3I-Cycling: KI-gestützte Optimierung der Kreislaufführung von Kunststoffverpackungen, Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB (Hg.). <https://www.iosb.fraunhofer.de/de/projekte-produkte/ki-optimierung-kunststoff-recycling-kreislauf.html> (18.07.2025)

Fromhold-Eisebith, M. (2022). Kreislaufwirtschaft im räumlichen Kontext–Herausforderungen und Ansatzpunkte für die Regionalentwicklung. Handbuch Der Kreislaufwirtschaft. E. Schmidt, Berlin (in Druck)

GewAbfV (2017): Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen¹ (Gewerbeabfallverordnung - GewAbfV). "Gewerbeabfallverordnung vom 18. April 2017 (BGBl. I S. 896), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 28. April 2022 (BGBl. I S. 700) geändert worden ist". https://www.gesetze-im-internet.de/gewabfv_2017/BJNR089600017.html#BJNR089600017BJNG000100000 (24.09.2025)

Hedemann, J.; Meinshausen, I.; Ortlepp, R.; Schiller, G.; Liebich, A.; Möller, A. (2017): Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland - Entwicklung eines dynamischen Stoffstrommodells und Aufbau einer Datenbank zur Prognose des Sekundärrohstoffaufkommens (KartAL II), Texte | 58/2017, Umweltbundesamt (Hg.), Juli

2017. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-08-04_texte_58-2017_kartalii.pdf (09.09.2025)

Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2018): Ressourcenschutzstrategie Hessen. Überlegungen des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, welchen Beitrag das Bundesland Hessen für ein zukunftssicheres und nachhaltiges Bewirtschaften und Konsumieren natürlicher Ressourcen leisten kann. https://landwirtschaft.hessen.de/sites/landwirtschaft.hessen.de/files/2021-09/ressourcenschutzstrategie_hessen_nicht_barrierefrei.pdf (15.09.2025)

Jacob, K.; Graaf, L. (Forschungszentrum für Umweltpolitik der Freien Universität Berlin) (o. J.): Erstellung eines Strategieentwicklungsleitfadens – Analyse und Auswertungen der Strategieverständnisse, -prozesse und -effekte im Geschäftsbereich BMU und Weiterentwicklung des Strategieleitfadens von 2012. Umweltbundesamt (Hg.), Dessau-Roßlau (noch nicht veröffentlicht)

Kathan, A.; Ewers B.; Dittrich M. (o. J.): Kartierung des Anthropogenen Lagers V - Strategieentwicklung für einen nationalen Urban Mining Prozess. Gesamtwirtschaftliche Materialflussanalysen und Bestandsveränderungen des anthropogenen Lagers Deutschlands (2010-2020). Begleitdokument. Noch unveröffentlicht, voraussichtliche Veröffentlichung durch das Umweltbundesamt 2026.

Koalitionsvertrag (KoaV) der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), von Bündnis 90 / Die Grünen & der Freien Demokraten (FDP) (Hrsg.) 2021, Mehr Fortschritt Wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021-2025.

Koalitionsvertrag [KoaV] der Christlich Demokratischen Union Deutschlands (CDU), der Christlich-Sozialen Union in Bayern (CSU) & der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD) (Hrsg.), 2025, Verantwortung für Deutschland. 21. Legislaturperiode.

Loibl, A., Marscheider-Weidemann, F., Ostertag, K., Rosenberg, S., Tercero Espinoza, L., Pfaff, M., & Sartorius, C. (2020): Potenziale und Grenzen der Sekundärrohstoffgewinnung – Ergebnisse der r⁴-Begleitforschung. *Chemie Ingenieur Technik*, 92(4), 414–422. <https://doi.org/10.1002/cite.201900132> (15.09.2025)

Mathias, Chr.; Thietje, S.; Gehrlein, U.; Schütz, N.; Kölmel, R.; Hagedorn, H. (2024): Kreislaufwirtschaft im ländlichen Raum: Dimensionen und Einflussfaktoren. BBSR – Online-Publikation 02/2024, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBSR) (Hrsg.). <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2024/bbsr-online-02-2024-dl.pdf?blob=publicationFile&v=4> (15.09.2025)

Müller, F., Lehmann, C., Kosmol, J., Keßler, H., & Bolland, T. (2017): Urban Mining. Ressourcenschonung im Anthropozän. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/urban-mining-ressourcenschonung-im-anthropozan> (15.09.2025)

OECD (2020): The Circular Economy in Cities and Regions: Synthesis Report. OECD. <https://doi.org/10.1787/10ac6ae4-en> (15.09.2025)

OECD (2025): The Circular Economy in Cities and Regions of the European Union. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/e09c21e2-en> (15.09.2025)

Sächsisches Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr (2022): Rohstoffe schaffen Zukunft, Neue Sächsische Rohstoffstrategie. Dezember 2022. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/41292> (15.09.2025)

Schiller, G.; Lützkendorf, T.; Knappe, F.; Gruhler, K.; Mörmann, K. (o. J.): Materialinventare und Materialkataster – Empfehlungen zur Stärkung der Ressourceneffizienz und des Ressourcenmanagements, Erarbeitet im Projekt „Kartierung des anthropogenen Lagers IV (KartAL IV) - Erarbeitung eines Gebäudepass- und Gebäudekatasterkonzepts zur regionalisierten Erfassung des Materialhaushaltes mit dem Ziel der Optimierung des Recyclings“.

Umweltbundesamt (Hg.). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/kartal_iv_handlungsempfehlungen.pdf (10.09.2025)

Schiller, G.; Ortlepp, R.; Krauß, N.; Steger, S.; Schütz, H.; Fernandez, J. A.; Reichenbach, J.; Wagner, J.; Baumann, J. (2015): Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft (KartAL I), Texte | 83/2015, Umweltbundesamt (Hg.), Oktober 2015. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_83_2015_kartierung_des_anthropogenen_lagers.pdf (09.09.2025)

Schmidt, Chr. M.; Weber, T. (2024): Digitale Enabler der Kreislaufwirtschaft, acatech Studie, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 20. November 2024. <https://www.acatech.de/publikation/digitale-enabler-der-kreislaufwirtschaft/> (10.09.2025)

Spieth-Achtnich, A.; Buchert, M.; Ustohalova, V.; Pistner, C.; Mayer, F.; Schön-Blume, N.; Claus, M.; Schütz, J.; Wille, K.; Kranz, S.; Etges, R.; Luh, J.; Goldmann, D. (2024): (RecTeCKA) – Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben. <https://www.oeko.de/publikation/recycling-von-technologiemetallen-aus-dem-rueckbau-kerntechnischer-anlagen-unter-beruecksichtigung-strahlenschutzrechtlicher-vorgaben-rectecka/> (12.09.2025)

Tercero Espinoza, L., Rostek, L., Loibl, A., & Stijepic, D. (2020): The promise and limits of Urban Mining, Fraunhofer ISI. https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccn/2020/Fraunhofer_ISI_Urban_Mining.pdf (15.09.2025)

Tödting, F., & Trippel, M. (2005): One size fits all? Research Policy, 34(8), 1203–1219. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2005.01.018> (15.09.2025)

Trippel, M., Fastenrath, S., & Isaksen, A. (2022): Rethinking regional economic resilience: Preconditions and processes shaping transformative resilience. https://www.geist-wp.com/papers/geist_wp_2202.pdf (15.09.2025)

Umweltbundesamt (UBA) (2022): Urban Mining, Umweltbundesamt (Hg.), 16.05.2022. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining#strategie-zur-kreislaufwirtschaft-> (08.09.2025)

Umweltbundesamt (UBA) (2024): Neue Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte tritt in Kraft. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/neue-oekodesign-verordnung-fuer-nachhaltige> (3.07.2024)

United Nations (UN) (Hrsg.) (2015): Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. <https://docs.un.org/en/A/RES/70/1> (15.09.2025)

VerpackG (2023): Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen (Verpackungsgesetz - VerpackG), "Verpackungsgesetz vom 5. Juli 2017 (BGBl. I S. 2234), das zuletzt durch Artikel 6 des Gesetzes vom 25. Oktober 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 294) geändert worden ist" <https://www.gesetze-im-internet.de/verpackg/BJNR223410017.html#BJNR223410017BJNG000100000> (24.09.2025)

VDI ZRE: Das VDI ZRE – das Kompetenzzentrum für zirkuläre Wirtschaft und Ressourceneffizienz bietet im Auftrag des Bundesumweltministeriums Know-how für zirkuläres Wirtschaften und einen effizienten Umgang mit Material und Energie in Unternehmen. <https://www.ressource-deutschland.de/> (09.09.2025)

WIR! (2019): WIR! – Wandel durch Innovation in der Region – Programm „Innovation & Strukturwandel“, Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (Hg.). <https://www.innovation-strukturwandel.de/strukturwandel/de/innovation-strukturwandel/wir/wir.html?nn=452028> (09.09.2025)

A Anhang – Steckbriefe zu den Aktionsfeldern

A.1 Steckbrief „Elektro/nikgeräte“

A.1.1 Status quo

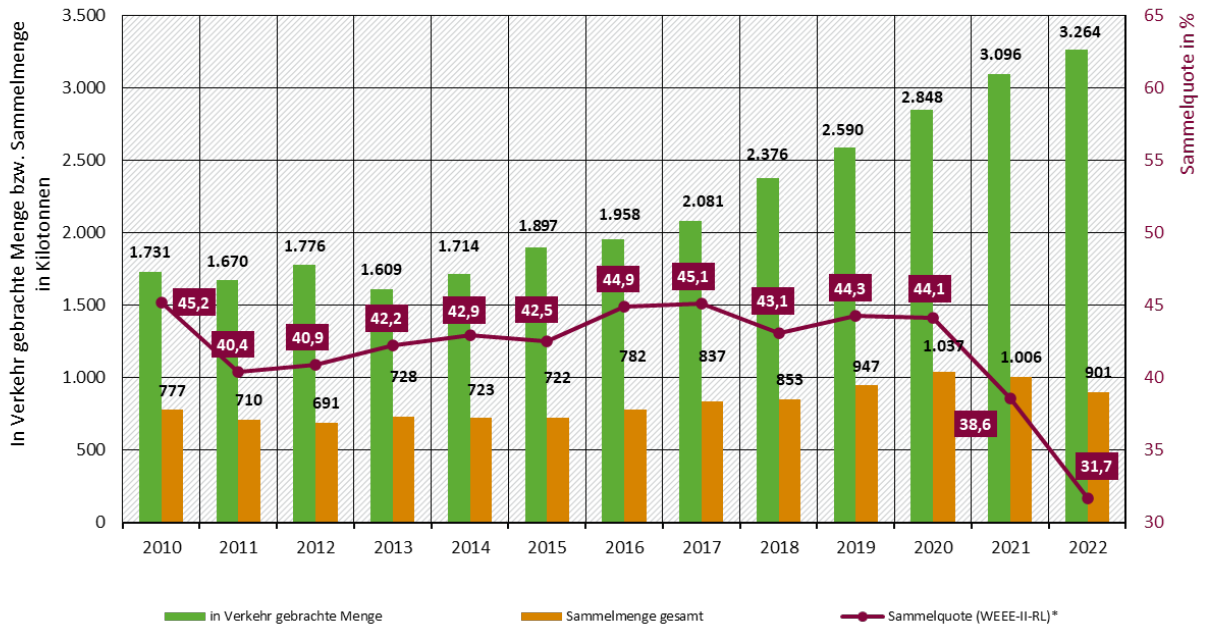
Elektrogeräte sind aus dem alltäglichen Leben kaum wegzudenken. Von Kleingeräten wie Handys und Tablets bis zu Großgeräten wie Kühlschränken, Waschmaschinen oder Wärmepumpen besitzt jeder deutsche Haushalt ein Lager an Metallen in Form von Elektrogeräten zu Hause. Vor allem der Rohstoff Zinn befindet sich in einem Großteil der Elektrogeräte und somit im anthropogenen Lager (Buchert et al. 2022). Das Aktionsfeld betrachtet alle Geräte, die im Geltungsbereich des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes (ElektroG 2015) liegen. Dazu zählen sechs Sammelgruppen:

- ▶ Wärmeüberträger (u.a. Kühl- und Gefriergeräte, Wärmepumpen),
- ▶ Bildschirme, Monitore und Geräte mit integriertem Bildschirm (u.a. Fernsehgeräte, Laptops),
- ▶ Lampen,
- ▶ Großgeräte (u.a. Haushaltsgroßgeräte, Kopiergeräte, Photovoltaik-Module, Pedelecs),
- ▶ Kleine IT- und Telekommunikationsgeräte (Mobiltelefone, PCs, Drucker, Router, USB-/Netzwerk-kabel und -adapter)
- ▶ sowie eine Vielzahl und Diversität an elektrischen und elektronischen Kleingeräten (u.a. kleine Haushaltsgeräte, Uhren, Fitnessarmbänder, Spielzeug, Rauchmelder, Thermostate, Kleinwerkzeuge, Steckdosen, Drohnen, E-Zigaretten, Bekleidung und Schuhe mit elektrischen Funktionen, Tonerkartuschen und Druckerpatronen).

Nicht betrachtet werden elektrotechnische Anlagen und Gebäudeinstallationen sowie Elektronik und Batterien, sofern sie Bestandteil von (Elektro-)Fahrzeugen sind (siehe bspw. Steckbrief Fahrzeuge).

Seit 2013 stieg die jährlich in Verkehr gebrachte Menge an Elektro- und Elektronikgeräten (EEG) in Deutschland kontinuierlich und hat sich bis zum Jahr 2022 verdoppelt (Abbildung A 1). Im Jahr 2022 lag sie bei rund 3,3 Mio. Tonnen. Im Vergleich – die Menge der in der EU in Verkehr gebrachten EEG lag im selben Jahr bei über 14 Mio. Tonnen (Eurostat 2024; Umweltbundesamt 2024).

Abbildung A 1: Auf den Markt gebrachte Elektro(nik)geräte und gesammelte EAG in der EU und Deutschland, kg pro Person (links) und absolut (rechts), im Jahr 2022



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf (Umweltbundesamt 2024)

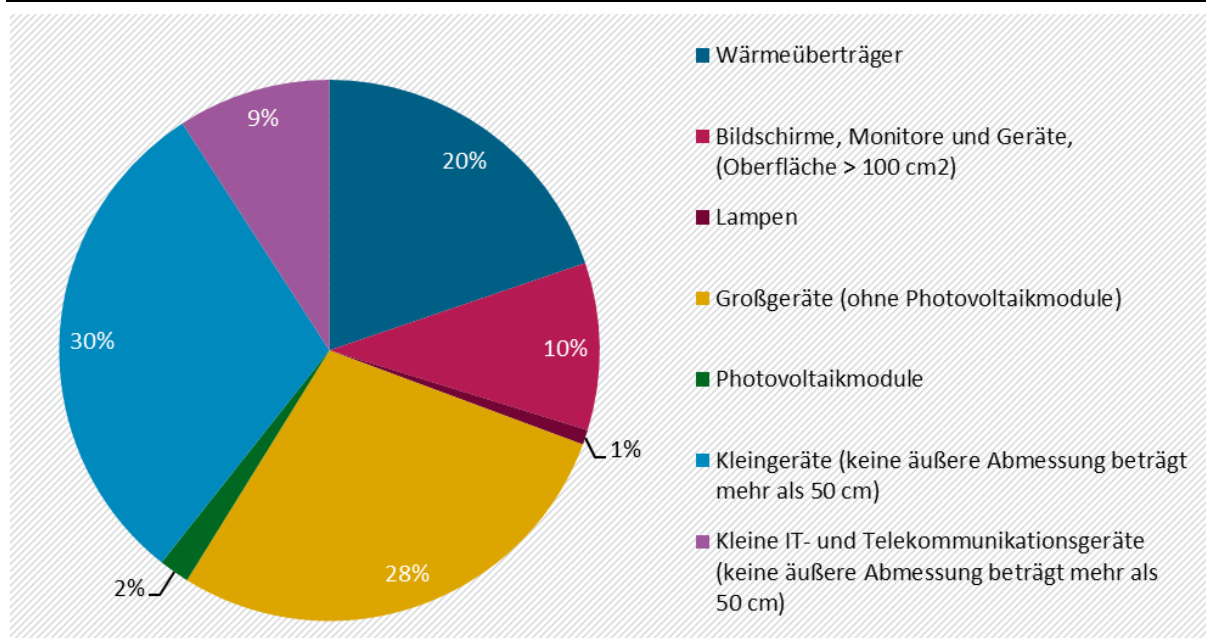
Der stetige Anstieg der EEG auf dem Markt wird durch mehrere Trends begünstigt. Der technologische Fortschritt und die zunehmende Digitalisierung in allen Industriezweigen und Lebensbereichen spielt dabei eine wesentliche Rolle. Immer mehr vernetzte Geräte gelangen auf den Markt und werden bereits nach wenigen Jahren aufgrund ausbleibender Softwareupdates (softwarebedingte Obsoleszenz) ersetzt (Rüdenauer & Gröger 2022). Mit der Zunahme an Elektro- und Elektronikgeräten steigt somit auch das Abfallaufkommen. Auf der Rangliste des EAG-Abfallaufkommens belegt Deutschland laut Global E-Waste Monitor mit rund 1,77 Mio. Tonnen innerhalb des europäischen Kontextes den zweiten Platz (Baldé et al. 2024). 2022 wurde in Deutschland allerdings nur etwa die Hälfte, rund 901 kt, der Elektro(nik)altgeräte gesammelt. Damit befinden sich etwas mehr als die Hälfte der EAG nach ihrem Gebrauchsende immer noch abseits der vorgesehenen Verwertungs- und Entsorgungswege (Kehl & Rioussel 2024).

Der steigende Anfall an Elektron(nik)altgeräten (EAG) ist unter anderem auch auf eine Kurzlebigkeit der Produkte (z.T. geplante Obsoleszenz) zurückzuführen. Die Lebens- und Nutzungsdauer von EEG ist dementsprechend in den letzten Jahren zurückgegangen und verbleibt auf einem niedrigen Niveau (Prakash et al. 2016). Gründe hierfür gehen einerseits auf unternehmerische Gesichtspunkte als auch auf Verhaltensmuster von Konsument*innen zurück (Prakash et al. 2023):

- d) **Defektanfälligkeit:** Preisverfall, Trend zu günstigeren Geräten mit minderwertiger Qualität
- e) **Konsumwunsch:** Technologietrends und Wünsche der Konsument*innen nach neuen Produkten
- f) **Niedriges Reparturniveau (BMUV 2024):** u.a. auf Grund von hohen Reparaturkosten verglichen mit niedrigen Kaufpreisen für Neuprodukte und fehlende Möglichkeiten für eine Reparatur (Reparierbarkeit oft nicht gegeben; reparaturverhindernde Designs) (BMUV 2024; Stiftung Warentest 2020).

Die jährliche Sammelquote und Zuführung zu einer Verwertung blieben in den letzten Jahren auf einem niedrigen Niveau (siehe Abbildung A 1). In der EU wird die Sammlung und Verwertung von Elektro- und Elektronikaltgeräten über die WEEE-Richtlinie geregelt (WEEE 2012). Diese schreibt neben der Sammelquoten, die ordnungsgemäße Behandlung, Verbringung und Verwertung der gesammelten Altgeräte vor. Die WEEE-Richtlinie wurde 2005 durch das ElektroG in nationales Recht umgesetzt. Sie regelt das Inverkehrbringen, die Rücknahme sowie die umweltverträgliche Entsorgung von EAG. Die Sammelquote gibt an, welche Mengen (bezogen auf die in Verkehr gebrachten Neugeräte pro Jahr) wiederum als Altgeräte gesammelt und der Verwertung zugeführt werden müssen. Die derzeitige Sammelquote liegt deutlich unter der aktuell gesetzlich vorgegebenen Sammelquote von 65 %⁵. Im Jahr 2021 wurde eine Sammelquote von nur 38,6 % erreicht, 2022 sank sie auf 31,7 % (BMUV 2021; BMUV 2022; ElektroG 2015; WEEE 2012).

Abbildung A 2: Gesammelte EAG in Deutschland, 2022



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Eurostat (2024)

Den größten Anteil an der gesammelten Menge nahmen Kleingeräte mit rund 30 % ein, rund 28 % entfallen auf Großgeräte und weitere 20 % auf Wärmeüberträger (Abbildung A 2). Insbesondere für Bildschirme und kleine IT- und Telekommunikationsgeräte zeigt sich eine rückläufige Sammelmengen (BMUV 2021, 2022). Ein Großteil der EAG dürfte nach Gebrauchsende noch immer abseits der vorgesehenen Verwertungs- und Entsorgungswege entsorgt werden (Kehl & Rioussset 2024). Insbesondere drei Gruppen sind dabei problematisch (Kehl & Rioussset 2024; Rüdener & Gröger 2022):

- ▶ Elektrokleingeräte wie z. B. Smartphones, Bluetoothlautsprecher und Elektronikgadgets werden auf Grund ihrer geringen Größe teilweise über den Restmüll entsorgt oder zu Hause aufbewahrt (Schischke et al. 2021). Dies verzögert die Verfügbarkeit von gebrauchten Geräten für den Second-Hand-Markt und für das Recycling.

⁵ Ab 2019 beträgt die jährlich zu erreichende Mindestsammelquote 65 % des Durchschnittsgewichts der Elektro- und Elektronikgeräte. Die in Deutschland angewandte Methode zu Berechnung der Sammelquote bezieht sich auf die in den drei Vorjahren in Verkehr gebrachten EEG (WEEE 2012).

- ▶ „Untypische“ Elektrogeräte⁶ haben einen eher kleinen Elektronikanteil, werden aber ebenso häufig nach Ende ihrer Nutzungsdauer nicht der korrekten Altgerätesammlung, sondern dem Restmüll, zugeführt, oder landen – wie bei Einweg-E-Zigaretten – sogar in der Umwelt.
- ▶ Möbel mit verbauten elektrischen Komponenten wie z. B. Schränke mit Beleuchtung oder motorbetriebene Möbel (Sessel, Bettgestell, höhenverstellbare Tische) fallen ebenfalls unter ElektroG, was Verbraucher*innen selten bekannt ist.

Ein Großteil der Elektronikaltgeräte (EAG) wird nicht sachgerecht erfasst, was dazu führt, dass das Recyclingpotenzial bei Sekundärrohstoffen in hohem Maße ungenutzt bleibt. Neben hohen Erfassungsverlusten führen eine unzureichende Sorgfalt bei der Sammlung, Rücknahme und Vorbehandlung von Altgeräten dazu, dass das Recyclingpotenzial bei Sekundärrohstoffen nicht vollends ausgeschöpft wird (BMUV 2024; Hagelüken et al. 2023). Darüber hinaus werden viele Elektroaltgeräte der offiziellen Entsorgungsstruktur entzogen, grenzüberschreitend exportiert oder gelangen in illegale Kanäle. Eine Studie im Auftrag des NABU kommt zu dem Ergebnis, dass in Deutschland jährlich rund 1,03 Mio. Tonnen EAG nicht getrennt erfasst werden (Handke et al. 2019). Viele funktionsfähige, oder als solche deklarierte, Geräte werden als Gebrauchtware in Länder des globalen Südens exportiert, wo sie – mangels Recyclinginfrastruktur – oft vom informellen Sektor unter gesundheits- und umweltschädlichen Bedingungen zerlegt oder verbrannt werden, um etwa Kupfer zu gewinnen (Schleicher et al. 2019).

Auch in Deutschland geht selbst bei ordnungsgemäßer Rückgabe über Sammelstellen ein erheblicher Teil der enthaltenen Materialien verloren: Während der Vorbehandlung gehen z. B. durch Schreddern der Produkte, 20–70 % wichtiger Metalle verloren. Im Recyclingprozess liegt der Fokus meist auf einer stark eingegrenzten Zahl an wirtschaftlich interessanten Edelmetallen wie Gold, Silber und Palladium oder dem Basismetall Kobalt, während andere strategisch bedeutende bzw. kritische Rohstoffe (z. B. Neodym, Tantal, Praseodym, Dysprosium, Indium, Platin, Yttrium, Gallium, Gadolinium, Cer, Europium, Lanthan und Terbium) kaum berücksichtigt und oft vollständig verloren gehen (Buchert, et al. 2012). Technisch ist eine vollständige Rückgewinnung kaum möglich, Verluste in der Endbehandlung sind unausweichlich. Zudem bestehen bei komplexen Mehrstoffgemischen Zielkonflikte zwischen verschiedenen Rückgewinnungspfaden (Hagelüken et al. 2023; Rüdener & Gröger 2022).

Neben den technischen und strukturellen Herausforderungen ist auch der wirtschaftliche Aufwand ein begrenzender Faktor für die Rückgewinnung von Rohstoffen aus EAG. Die Rückgewinnung vieler kritischer Rohstoffe – insbesondere solcher, die nur in geringen Konzentrationen enthalten sind – ist mit den derzeitigen Verfahren nicht kostendeckend möglich (Hagelüken et al. 2023). Ein Beispiel hierfür ist das Recycling von seltenen Erden aus Elektronikschrott: Derzeit werden nur etwa 1 % dieser Elemente recycelt, da die wirtschaftliche Rentabilität aufgrund der hohen Kosten für Sammlung, Demontage und Rückgewinnung aus Recyclingrohstoffen begrenzt ist (Fujita et al. 2022; Jowitt et al. 2018).

Vor dem Hintergrund der bestehenden Herausforderungen und Entwicklungen wird die zentrale Rolle des Elektronik- und IKT-Sektors in den aktuellen Transformationsprozessen immer deutlicher – nicht nur aufgrund seiner wachsenden technologischen Bedeutung, sondern auch in Anbetracht der damit verbundenen ökologischen, sozialen und ökonomischen Folgewirkungen. Die dynamische Entwicklung digitaler Technologien und elektronischer Komponenten in einer Vielzahl von Produkten führt zu einem stetig steigenden Ressourcenbedarf, der durch kurze

⁶ Geräte mit integrierter elektrischer/elektronischer Funktion, deren äußeres Erscheinungsbild ein für Elektrogeräte untypisches Design aufweist, z.B. Elektrogeräte mit überproportional hohen Anteilen an Textilien, Leder, Folien, Schaumstoffen, Stein, Holz und/oder Glas. Beispiele: Textilien mit eingebauten elektronischen Komponenten, elektrische Zahnbürsten oder elektronisches Spielzeug.

Produktlebensdauern und -nutzung und einem bislang hohen ungenutzten Verwertungspotenzial zusätzlich verschärft wird. Gerade vor dem Hintergrund des hohen Anteils strategisch relevanter Rohstoffe in Elektro- und Elektronikgeräten rückt dieser Bereich zu Recht in den Fokus politischer und regulatorischer Maßnahmen. Im Zentrum künftiger Regulierungen sollten daher kohärente Strategien stehen, die auf eine Reduktion des Primärrohstoffverbrauchs, eine signifikante Verlängerung der Nutzungsdauer sowie den systematischen Ausbau von Sammel-, Recycling-, Wiederverwendungs- und Reparaturstrukturen zielen. Dem Verlust wertvoller Rohstoffe zu entgegnen bedeutet, einer ressourcenschonenden, ambitionierten Kreislaufwirtschaft nachzukommen und zugleich geopolitische Abhängigkeiten zu reduzieren.

A.1.2 Rohstoffe der Elektro(nik)geräte

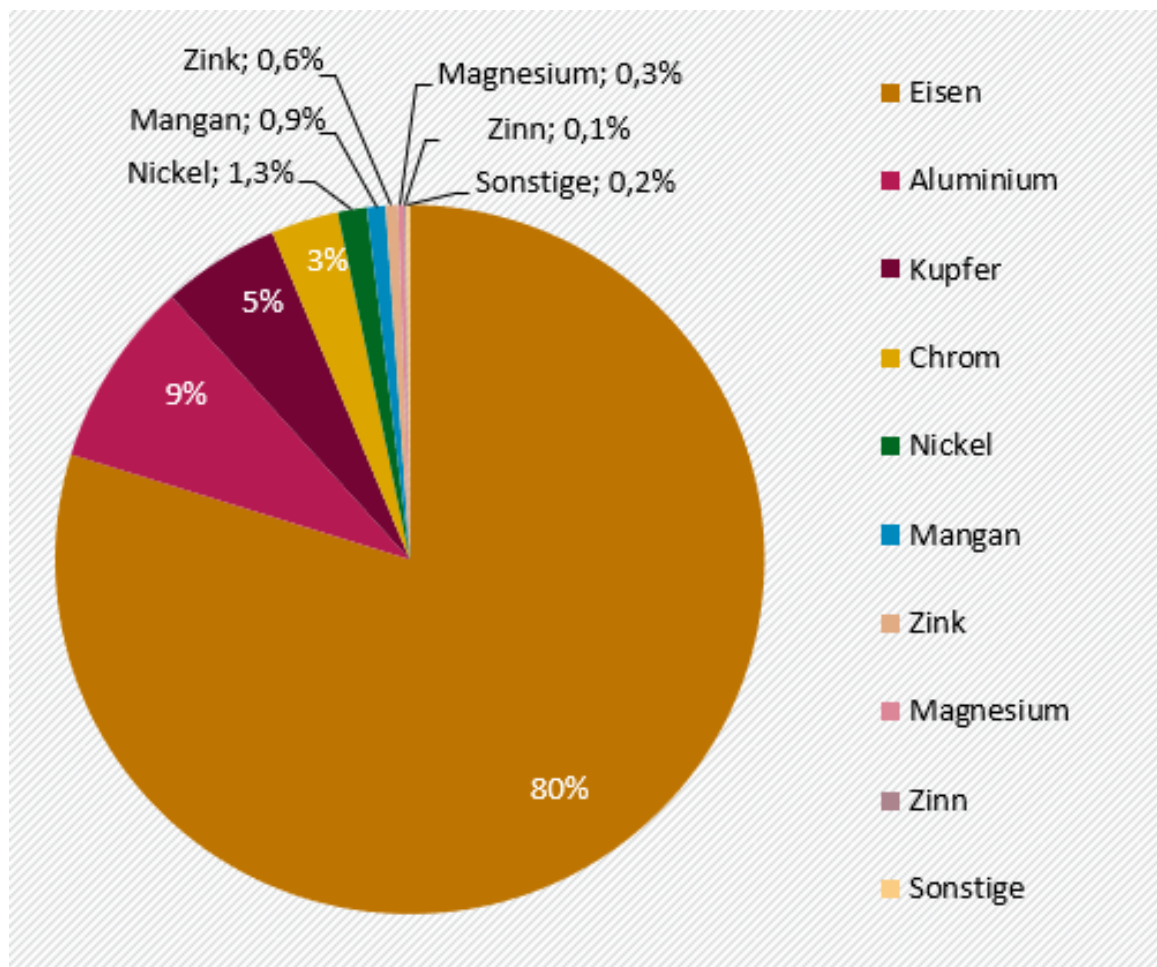
Die Zusammensetzung der Rohstoffe in Elektro- und Elektronikgeräte unterscheidet sich stark nach Sammelkategorie oder innerhalb einer Sammelkategorie. Um einen Einblick zu erhalten, welche Rohstoffe im anthropogenen Lager der Elektro(nik)geräte enthalten sind wurden zwei Ansätze gewählt:

Die Gegenüberstellung eines

- a) generischen Elektro(nik)geräts, das als Repräsentant für die auf den deutschen Markt gebrachten EEG dient und
- b) das Smartphone als Beispiel für ein EEG, das in beinahe jedem Haushalt zu finden ist.

Auf Basis von Daten der Urban Mine Platform (Huisman et al. 2017) wurde anhand von Einfuhrmengen die Einheit eines generischen Geräts entworfen. Die Daten der Urban Mine Platform bilden Mengen und Arten von Rohstoffen von Elektro- und Elektronikgeräte ab, die auf den deutschen Markt gebracht wurden. Aus den Daten lässt sich der prozentuale Massenanteil eines generischen Geräts ableiten. Verwendet wurden die Daten der 2015 auf den Markt gebrachten Rohstoffe, da dies das letzte Berichtsjahr der Urban Mining Platform bildete.

Abbildung A 3: Wichtige Metalle eines generischen Elektrogeräts [in %]



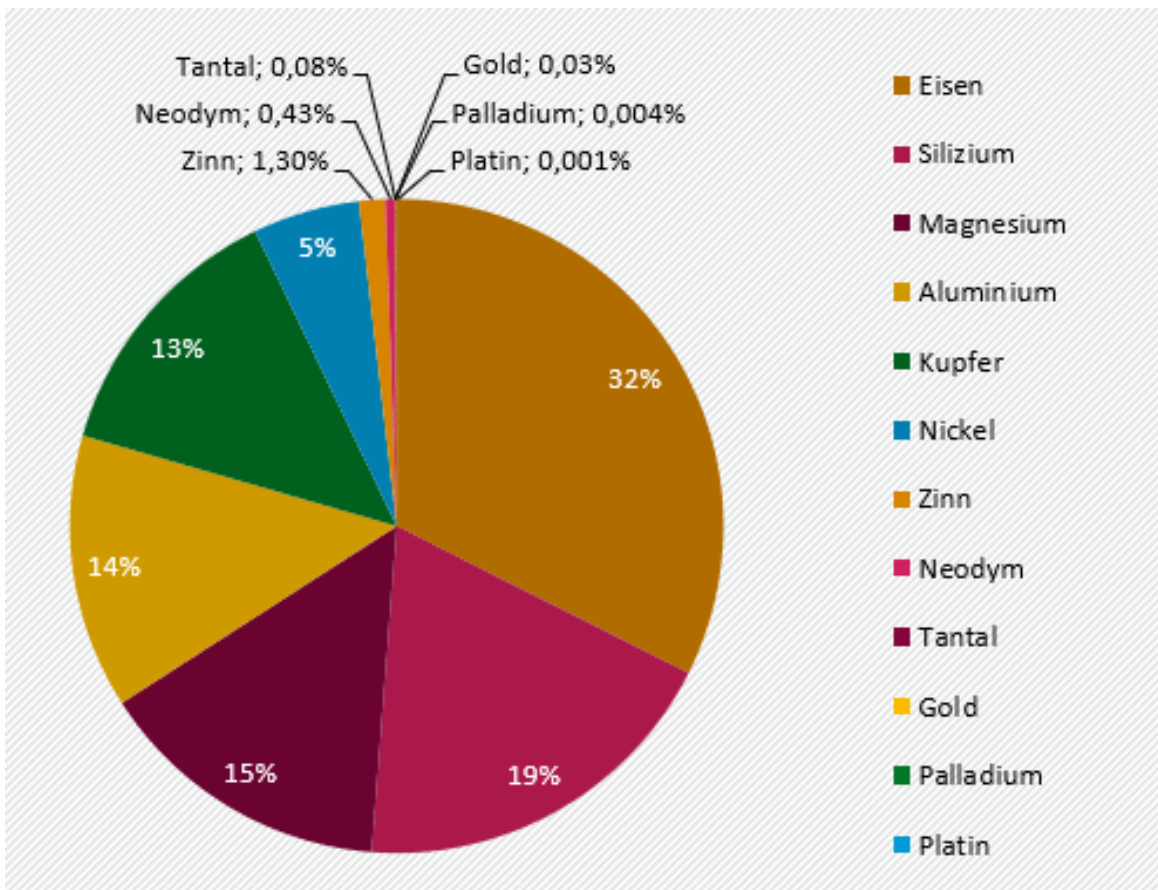
Quelle: Eigene Darstellung basierend auf der Urban Mining Platform (Huisman et al. 2017)

Wie in Abbildung A 3 ersichtlich wird, bildet Eisen (v.a. durch die Verwendung von Stahl) mit 80 % den größten Massenanteil des generischen Geräts. Darauf folgen Aluminium mit 9 %, Kupfer mit 5 % und Chrom zu 3 %. Die Anteile weiterer Rohstoffe liegen jeweils bei rund 1 % oder darunter. Ein großer Teil des deutschen anthropogenen Zinn-Lagers findet sich in Elektrogeräten (Buchert et al. 2022). Zudem enthalten viele Elektronikgeräte ebenfalls – wenn auch in geringer Konzentration – schwer zu gewinnende Rohstoffe wie beispielsweise die seltenen Erden Yttrium, Dysprosium, Lanthan, Praseodym, Cer, Europium, Erbium und Holmium (Huisman et al. 2017). Trotz der geringen Konzentration in EAG kann etwa durch das Recycling von 1 Tonne alter Smartphones bis zu 300g Gold zurückgewonnen werden – im Vergleich können aus einer Tonne Golderz lediglich 3 g Gold gewonnen werden (Kaya 2018). Neben den enthaltenen Metallen sind relevante Fraktionen an Kunststoffen, sowie Glas, Keramik, Gummi und Holz enthalten. Die Leiterplatte, die das komplexeste Bauteil darstellt, ist aus ökonomischer Sicht am wertvollsten, da sie die meisten Wertstoffe enthält (Kehl & Rioussset 2024; Serpe et al. 2025).

Um die Rohstoffdaten der Elektro(nik)geräte zu veranschaulichen wurde in einem zweiten Ansatz das Smartphone als Beispiel-Gerät herausgegriffen, und dessen Zusammensetzung anhand von Daten der Deutschen Rohstoffagentur visualisiert. Basierend auf Durchschnittswerten aus drei repräsentativen Smartphone-Modellen für den Zeitraum 2012 –2017 wurde der Rohstoffgehalt eines Smartphones bestimmt (Bookhagen & Bastian 2020). Demnach ergab sich folgende

durchschnittliche Zusammensetzung eines Smartphones: 45 % Metalle, 32 % Display/Glas, 17 % Kunststoffe und 6 % andere Materialien (siehe Abbildung A 4).

Abbildung A 4: Metallgehalt eines durchschnittlichen Smartphones [in %]



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf (Bookhagen und Bastian 2020)

Global wurden 2019 rund 1,4 Mrd. Smartphones verkauft, im Vergleich dazu wurden in Deutschland im selben Jahr 22 Mio. Smartphones verkauft. Basierend auf Daten zu Anzahl und Rohstoffmassen der global verkauften Smartphones zwischen den Jahren 2012–2019 lassen sich die Massenanteile der einzelnen Rohstoffe pro Smartphone berechnen, und mit der Anzahl der 2019 in Deutschland verkauften Smartphones multiplizieren. Tabelle A 1 ist dargestellt, welche Mengen der jeweiligen Rohstoffe in den, in Deutschland im Jahre 2019 verkauften Smartphones, lagern.

Tabelle A 1: Metallgehalt und Masse nach Rohstoff verkaufter Smartphones in Deutschland 2019

Rohstoff	Gewichtsanteil [in %]	Metallgewicht [t] der in D 2019 verkauften 22 Mio. Smartphones
Eisen	32,41 %	351,22
Silizium	18,81 %	203,83

Rohstoff	Gewichtsanteil [in %]	Metallgewicht [t] der in D 2019 verkauften 22 Mio. Smartphones
Magnesium	14,68 %	159,09
Aluminium	13,56 %	146,94
Kupfer	13,40 %	145,23
Nickel	5,28 %	57,26
Zinn	1,30 %	14,04
Neodym	0,43 %	4,66
Tantal	0,08 %	0,88
Gold	0,03 %	0,37
Palladium	0,00 %	0,04
Platin	0,00 %	0,01
Summe	100 %	1.083,58

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Bookhagen und Bastian (2020)

Es wird davon ausgegangen, dass allein in Deutschland rund 200 - 210 Mio. Mobiltelefone (inkl. Smartphones) in den Schubladen von Haushalten gelagert werden (Bookhagen & Bastian 2020; Kehl & Riousset 2024). Hochgerechnet enthalten diese durchaus große Mengen an wertvollen Rohstoffen: schätzungsweise rund 3.400 t Eisen, 1.500 t Magnesium, 1.400 t Aluminium, 3,6 t Gold und knapp 2.000 t Silizium (Kehl & Riousset 2024).

A.1.3 Zukünftiges Sekundärrohstoffpotenzial

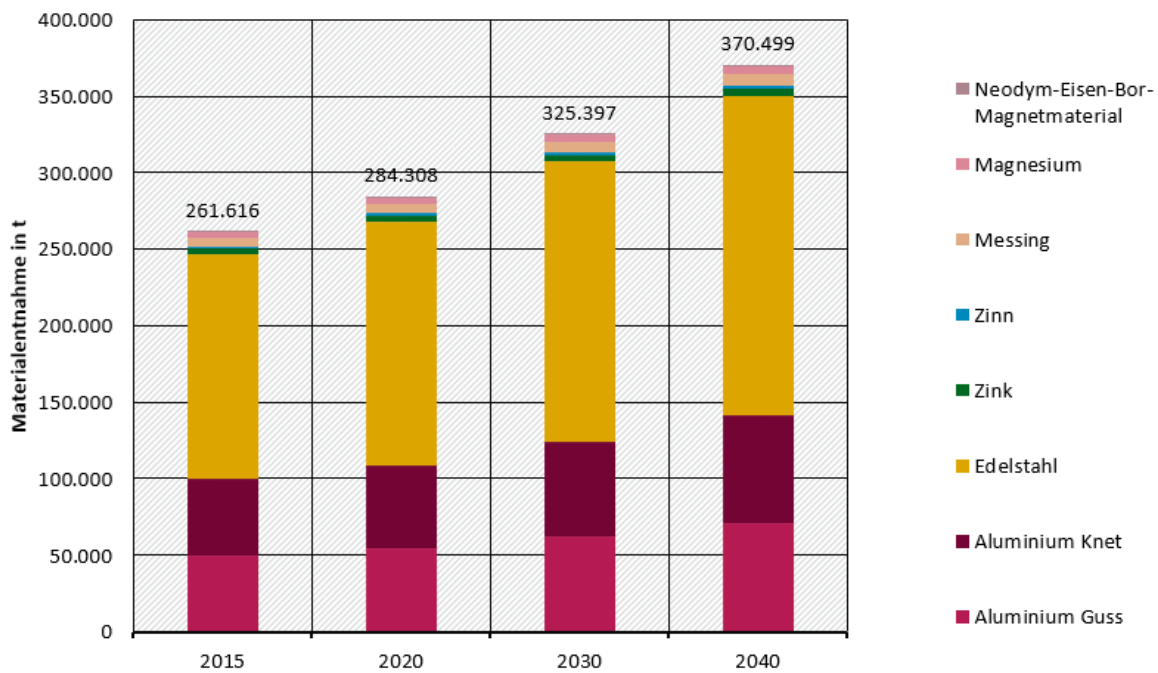
Die Abschätzung zukünftiger Potenziale an Sekundärrohstoffmengen, die aus dem Aufkommen von Elektro- und Elektronikgeräten resultieren, kann – wenn auch mit Unsicherheiten verbunden – auf Basis vergangener Entwicklungen und unter Berücksichtigung von Annahmen zu künftigen Trends erfolgen. Wesentliche Einflussfaktoren auf das zukünftige Rohstoffpotenzial umfassen dabei unter anderem: die Entwicklung der Nachfrage, die durchschnittliche Nutzungsdauer, das Produktdesign und die damit verbundene Langlebigkeit, die Rückgewinnungsfähigkeit von Rohstoffen aus EAG, das Wachstum des gesamten Sektors sowie Veränderungen in der Zusammensetzung der Elektro- und Elektronikgeräte (z. B. durch Substitution kritischer Ressourcen oder die Einführung recyclingfreundlicher Materialien) (Parajuly, K et al. 2019). Laut Global E-waste Monitor 2024 werden im Jahr 2030 weltweit 82 Mrd. Tonnen Elektroschrott anfallen (Baldé et al. 2024).

Im Projekt KartAl III wurden für Deutschland die zukünftigen Bestände an Elektro(nik)produkten im anthropogenen Lager sowie potenzielle Materialentnahmen durch anfallende EAG modelliert.

Anhand der auf den Markt gebrachten Elektronikprodukte bzw. der enthaltenen Metallmengen wurde ein generisches Gerät mit einer mittleren Lebensdauer von 8,6 Jahren entwickelt. Für die Darstellung des deutschen Lagers wurden EEG-Inputs im Zeitraum 2000 bis 2014 retrospektiv modelliert und analog zur Modellierung der Zukunft mit einer Wachstumsrate von 1,7 % rückgerechnet (Buchert et al. 2022). Mittels der Verweilzeitverteilung konnten die zukünftigen Zuwächse des Lagers berechnet werden.

Der kontinuierliche Austausch von Elektro(nik)geräten bewirkt ein Elektro(nik)schrottaufkommen im Jahr 2015 von rund 0,8 Mrd. Geräten, für das Jahr 2040 wurde eine potenzielle Entnahme von rund 1,1 Mrd. Elektroaltgeräten errechnet. Im Fokus der Betrachtung lagen folgende Basis- und Sondermetalle: Aluminiumguss, Aluminiumknetlegierungen, Edelstahl, Zink, Zinn, Messing, Magnesium, und Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial. Die Materialentnahme für diese Metalle lag im Ergebnis für das Jahr 2015 bei rund 260.000. Bis zum Jahr 2040 beläuft sich dann die Entnahme insgesamt auf rund 370.000 Tonnen (+29,3 %) (Abbildung A 5 und Tabelle A 2) (Buchert et al. 2022).

Abbildung A 5: Sekundärrohstoffpotenzial für ausgewählte Metalle aus EAG in Deutschland für die Jahre 2015 bis 2040



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf DyMAS Modellierung (Buchert et al. 2022)

Tabelle A 2: Sekundärrohstoffpotenzial für ausgewählte Metalle aus EAG in Deutschland für die Jahre 2015 bis 2040

Rohstoff/Jahr	Abfallmengen jährlich [t]			
	2015	2020	2030	2040
Gesamt	261.616	284.308	325.397	370.499
Aluminium Guss	49.937	54.268	62.111	70.720

	Abfallmengen jährlich [t]			
	2020	2025	2030	2040
Aluminium Knet	49.937	54.268	62.111	70.720
Edelstahl	147.099	159.859	182.962	208.321
Zink	3.493	3.796	4.345	4.947
Zinn	1.311	1.425	1.631	1.857
Messing	5.650	6.140	7.027	8.001
Magnesium	3.571	3.881	4.442	5.058
Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial	618	671	768	875

Quelle: KartAI III basierend auf DyMAS Modellierung (Buchert et al. 2022)

Die Materialentnahme nimmt bis 2040 stetig zu und wird durch den Edelstahl dominiert (rd. 56 % im Jahr 2040). Die Elektroaltgeräte enthalten zudem hohe Anteile an Aluminium. Zu 38 % fallen daher auch Aluminiumguss und Aluminium-Knetlegierungen an.

Variablen wie die Veränderung der Lebensdauer (z. B. durch Maßnahmen gegen frühzeitig geplante Obsoleszenz; mehr Anreize zu Reparatur statt Neukauf) oder ein schnell steigender Bedarf an Geräten für die E-Mobilität wurden hierbei nicht berücksichtigt. Verschiedene Trends verstärken allerdings das Aufkommen von EAG. Auf EU-Ebene könnte die Richtlinie zur Stärkung der Verbraucher*innen für den ökologischen Wandel („Empowering Directive“) großen Einfluss auf die zukünftige Lebensdauer der Elektro(nik)geräte haben. Die Richtlinie 2024/825 zur „Stärkung der Verbraucher für den ökologischen Wandel durch besseren Schutz gegen unlautere Praktiken“, die 2024 in Kraft trat und bis 2026 umgesetzt werden soll, definiert Maßnahmen gegen geplante frühzeitige Obsoleszenz (EmpCo-RL 2024).

Für eine grobe Gegenüberstellung derzeitiger Trends mit den Langfristmodellierungen aus KartAI III wurde das Wachstum der in Deutschland in den Verkehr gebrachten Elektro(nik)geräte (Umweltbundesamt 2024) verglichen. Das jährliche Wachstum des Elektro(nik)-Sektors im Zeitraum 2000–2015 lag nach Buchert et al. (2022) bei rund 1,7 %. Die Entwicklung der vergangenen Jahre, von 2015–2022, zeigt allerdings, dass der Sektor um einiges schneller wächst. Die neu auf den Markt gebrachten Produkte weisen ein durchschnittliches jährliches Wachstum von über 8 % auf (Eurostat 2024). Dies könnte perspektivisch zu einem höheren Abfallaufkommen und damit zu einem größeren Potenzial an Sekundärrohstoffen führen, als es in den Berechnungen von KartAI III angenommen wurde.

A.1.4 Handlungsbedarf für eine optimierte Urban Mining Strategie

Ein zentrales Problemfeld im Umgang mit Elektroaltgeräten ist die weiterhin dramatisch niedrige Sammelquote, die in Deutschland zuletzt auf rund 32 % gesunken ist – weit entfernt von der gesetzlichen Vorgabe von 65 %. Elektro- und Elektronikaltgeräte werden nach Ende ihrer Nutzungsdauer häufig nicht der korrekten Altgerätesammlung zugeführt, sondern landen im Hausmüll, werden gehortet oder auf nicht nachverfolgbaren Wegen entsorgt. Besonders kurzlebige und günstige Produkte – oft „unsichtbare“ oder nicht klassische Elektroaltgeräte (z. B. E-

Zigaretten, elektrifizierte Artikel wie Spielzeug oder Grußkarten) – sind hiervon überdurchschnittlich betroffen und entziehen sich so dem Recyclingkreislauf (Hinze 2025; Umweltbundesamt 2023). Nicht nur gehen dadurch seltene Rohstoffe verloren, enthaltene gesundheitsgefährdende und umweltschädliche Stoffe könnten in die Umwelt gelangen. Darüber hinaus bringen falsch entsorgte Produkte mit Lithium-Batterien- bzw. Akkus eine hohe Brandgefahr mit sich. Durch Kurzschlüsse können diese sich selbst entzünden. Unter anderem macht der Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Kreislaufwirtschaft e.V. (BD) mit Initiativen und Kampagnen sowie Recyclingunternehmen auf das steigende Problem aufmerksam (Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V. (BDE). o.J.; Remondis 2022).

Woran scheitert das Erreichen der Sammelquote?

Die falsche Entsorgung von Elektroaltgeräten stellt ein erhebliches Umwelt- und Gesundheitsproblem dar. Gründe für die falsche Entsorgung reichen von Unkenntnis und Bequemlichkeit, fehlende Wertschätzung bis hin zu mangelnden Informationen. Laut einer Umfrage von Civey im Jahr 2022 entsorgen mehr als 10 % der Befragten kleine elektronische Altgeräte (Handy, Toaster oder Haartrockner) im Restmüll – unter den 18-29-Jährigen liegt der Anteil, der im Restmüll entsorgten Altgeräte, sogar bei rund 32 %. Zugleich gaben lediglich 3,5 % an, sich bezüglich der Entsorgung unsicher zu fühlen oder nicht zu wissen, wie die Altgeräte richtig zu entsorgen sind (BVSE 2023). Da trotz des Wissens um den richtigen Entsorgungsweg viele EAG falsch entsorgt werden, lässt vermuten, dass derzeit bestehende Rückgabernetze für EAG nicht ausreichend verbraucherfreundlich gestaltet sind und Entsorgungsmöglichkeiten noch nicht genügend beworben werden (ebd.).

Mangelhafte Trennung und Sortierung als Hemmnis

Neben der unzureichenden Erfassung stellt die aufwendige Trennung und Sortierung der gesammelten Altgeräte ein wesentliches Hindernis für eine effektive Kreislaufwirtschaft dar. Eine unzureichende Sortierung erschwert darüber hinaus die Schadstoffentfrachtung und behindert die Rückgewinnung hochwertiger Materialien. Dies führt zu Fehlsortierungen und dazu, dass insbesondere strategisch wichtige Rohstoffe in geringen Konzentrationen – wie seltene Metalle – mit den aktuellen Recyclingverfahren weder technisch effizient noch wirtschaftlich tragfähig zurückgewonnen werden können.

Eine zerstörungsfreie mechanische Demontage von Elektro- und Elektronikaltgeräten (EAG) ist kaum möglich, und führt zu Materialverlusten und schwer trennbaren Stoffgemischen (Kehl & Rioussat 2024). Für ein qualitativ hochwertiges Recycling ist es jedoch entscheidend, möglichst sortenreinen Metallschrott zu gewinnen. Die derzeit verfügbaren Sortier- und Trenntechnologien am Markt und in der Industrie stoßen hier an ihre Grenzen (siehe dazu auch Projekt Opti-Met (Raatz et al. 2022)).

Der hohe Aufwand die Trennung und spezialisierte Aufbereitung steht oft in keinem wirtschaftlich sinnvollen Verhältnis zum Wert der extrahierten Stoffe. Dies führt dazu, dass sich Recyclingprozesse auf wenige, profitabel rückgewinnbare Metalle konzentrieren, während der Großteil potenziell nutzbarer Materialien ungenutzt bleibt oder verloren geht (Kehl & Rioussat 2024).

Notwendigkeit weitergehender Maßnahmen

Angesichts der bestehenden Herausforderungen und der stagnierenden Sammelquoten besteht ein dringender Bedarf an weitergehenden Maßnahmen, um die gesetzlichen und strategischen Ziele im Bereich der Kreislaufwirtschaft zu erreichen. Besonders priorisiert werden sollten Ansätze, die die Sammelquoten signifikant erhöhen und die Qualität der erfassten Altgeräte verbessern.

Weitere Optimierungspotenziale liegen in:

- ▶ einer verbrauchernahen, niedrighschwelligen Rückgabefrastruktur
- ▶ gezielter Information und Bewusstseinsbildung bei Verbraucher*innen zu Entsorgungspflichten und Rückgabemöglichkeiten
- ▶ einer besseren Kontrolle und Nachverfolgung des Altgerätverbleibs zur Vermeidung illegaler Exporte und Verluste von Wertstoffen
- ▶ der Förderung von Innovationen zur wirtschaftlichen Rückgewinnung auch von strategisch wichtigen Rohstoffen

A.1.5 Quellverzeichnis Steckbrief „Elektro/nikgeräte“

Baldé, C. P.; Yamamoto, T.; McDonald, R.; D'Angelo, E.; Althaf, S.; Bel, G.; Deubzer, O.; Fernandez-Cubillo, E.; Forti, V.; Gray, V.; Herat, S.; Honda, S.; Iattoni, G.; Khetriwal, D. S.; Luda di Cortemiglia, V.; Lobuntsova, Y.; Nnorom, I.; Pralat, N.; Wagner, M. (2024): The Global E-waste Monitor 2024. International Telecommunication Union (ITU) und United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), Genf, Bonn. <https://ewastemonitor.info/the-global-e-waste-monitor-2024/> (24.04.2025)

BMUV (2021): Daten zu Elektro- und Elektronikgeräten in Deutschland 2021. <https://www.bmuv.de/themen/kreislaufwirtschaft/statistiken/elektro-und-elektronikgeraete> (14.05.2025)

BMUV (2022): Daten zu Elektro- und Elektronikgeräten in Deutschland 2022. <https://www.bmuv.de/themen/kreislaufwirtschaft/statistiken/elektro-und-elektronikgeraete> (14.05.2025)

BMUV (2024): Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie. https://www.kreislaufwirtschaft-deutschland.de/fileadmin/user_upload/Mediathek/NKWS/nationale_kreislaufwirtschaftsstrategie_bf_final.pdf (08.05.2025)

Bookhagen, B.; Bastian, D. (2020): Metalle in Smartphones. Deutsche Rohstoffagentur DERA, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe BGR (Hg.). https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/65_smartphones.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (24.04.2025)

Buchert, M.; Bleher, D.; Bulach, W.; Knappe, F.; Muchow, N.; Reinhardt, J.; Meinshausen, I. (2022): Kartierung des anthropogenen Lagers III (KartAL III), Texte | 47/2022, Umweltbundesamt (Hg.), April 2022. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_47-2022_kartierung_des_anthropogenen_lagers_iii.pdf (09.09.2025)

Buchert, M.; Manhart, A.; Bleher, D.; Pingel, D. (2012): Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten, LANUV-Fachbericht 38, Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen (Hg.), Recklinghausen. <https://www.lanuk.nrw.de/publikationen/publikation/recycling-kritischer-rohstoffe-aus-elektronik-altgeraeten> (18.09.2025)

Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V. (BDE) (o.J.): Brennpunkt: Batterie - Richtige Entsorgung von Lithium-Ionen-Akkus. <https://www.bde.de/themen/brennpunkt-batterie/> (21.05.2025)

BVSE (2023): Große Mehrheit will E-Schrott richtig recyceln und entsorgt ihn dennoch falsch. Fachverband Schrott, E-Schrott, und Kfz-Recycling (Hg.). <https://www.bvse.de/schrott-elektronikgeraete-recycling/nachrichten-schrott-eschrott-kfz/9326-grosse-mehrheit-will-e-schrott-richtig-recyceln-und-entsorgt-ihn-dennoch-falsch.html> (21.05.2025)

ElektroG (2015): Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten. Elektro- und Elektronikgerätegesetz vom 20. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1739),

das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 8. Dezember 2022 (BGBl. I S. 2240) geändert worden ist. S. 1–39. https://www.gesetze-im-internet.de/elektrog_2015/BJNR173910015.html (14.05.2025)

EmpCo-RL (2024): Richtlinie (EU) 2024/825 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28. Februar 2024 zur Änderung der Richtlinien 2005/29/EG und 2011/83/EU hinsichtlich der Stärkung der Verbraucher für den ökologischen Wandel durch besseren Schutz gegen unlautere Praktiken und durch bessere Informationen. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/825/oj/deu> (08.05.2025)

Eurostat (2024): Elektro- und Elektronikgeräte-Abfall (WEEE) nach Abfallbewirtschaftungsmaßnahmen - offener Anwendungsbereich, 6 Produktkategorien (ab 2018). https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_WASELEEOS_custom_12294836/default/table?lang=de. (07.08.2024).

Fujita, Y.; McCall, S. K.; Ginosar, D. (2022): Recycling rare earths: Perspectives and recent advances. In: MRS Bulletin. Vol. 47, No. 3, S. 283–288. <https://doi.org/10.1557/s43577-022-00301-w>

Hagelücken, C.; Schmidt, M.; Schebek, L.; Liedtke, C.; Bongardt, B.; Dosch, K.; Faulstich, M.; Flamme, S.; Gast, M.; Hermann, S.; Jaeger-Erben, M.; Oberle, B.; Reller, A.; Schmidt, B.; Sydow, J.; Tschesche, J.; Wilken, H.; Wilms, H. (2023): Position der Ressourcenkommission am Umweltbundesamt (KRU) – Juni 2023, Chancen und Grenzen des Recyclings im Kontext der Circular Economy Rahmenbedingungen, Anforderungen und Handlungsempfehlungen. Ressourcenkommission am Umweltbundesamt (Hg.), Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023_uba_kom_ressourcen_bf.pdf (14.05.2025)

Hinz, V. (2025): Probleme bei der Entsorgung von Elektroschrott. ZENTEK (Hg.). <https://www.zentek.de/probleme-bei-der-entsorgung-von-elektroschrott/> (21.05.2025)

Huisman, J.; Leroy, P.; Tertre, F.; Ljunggren Söderman, M.; Chancerel, P.; Cassard, D.; N. Løvik, A.; Wäger, P.; Kushnir, D.; Rotter, V. S.; Mährlitz, P.; Herreras, L.; Emmerich, J.; Hallberg, A.; Habib, H.; Wagner, M.; Downes, S. (2017): Prospecting Secondary Raw Materials in the Urban Mine and mining wastes (ProSUM) - Final Report. Composition of EEE - Placed on the Market per country in kilotonnes for All collection categories. <http://www.urbanmineplatform.eu/composition/eee/elements> (24.04.2025)

Jowitt, S. M.; Werner, T. T.; Weng, Z.; Mudd, G. M. (2018): Recycling of the rare earth elements. In: Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. Reuse and Recycling / UN SGDs: How can Sustainable Chemistry Contribute? / Green Chemistry in Education Vol. 13, S. 1–7. DOI: 10.1016/j.cogsc.2018.02.008

Kaya, M. (2018): 3 - Current WEEE recycling solutions. In: F. Vegliò: / I. Birloaga: Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials Woodhead Publishing. S. 33–93. DOI: 10.1016/B978-0-08-102057-9.00003-2

Kehl, C.; Rioussel, P. (2024): Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes. Mit Fallstudien zu Kunststoffverpackungen, Elektrogeräten sowie Baustoffen. Arbeitsbericht Nr. 207, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) (Hg.), Berlin. https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/01-bvse/2024/0311-TAB-Arbeitsbericht_AB207.pdf (08.05.2025)

Parajuly, K; Kuehr, R; Awasthi, A. K.; Fitzpatrick, C; Lepawsky, J; Smith E.; Widmer, R; eng, X. (2019): Future E-Waste Scenarios. Solving the E-waste Problem Initiative (StEP), United Nations University ViE-SCYCLE und United Nations Environment Programme (UNEP) International Environmental Technology Centre (IETC) (Hg.), Bonn/Osaka. <https://www.unep.org/ietc/resources/publication/future-e-waste-scenarios> (24.04.2025)

Prakash, S.; Dehoust, G.; Gsell, M.; Schleicher, T.; Stamminger, R. (2016): Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen „Obsoleszenz“. Umweltbundesamt (Hg.), Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_11_2016_einfluss_der_nutzungsdauer_von_produkten_obsoleszenz.pdf (08.05.2025)

- Prakash, S.; Löw, C.; Dehoust, G.; Gascón Castellero, L.; Hurst, K.; Manhart, A.; Jacob, K.; Fiala, V.; Helleckes, H. (2023): Modell Deutschland: Circular Economy, Politik Blueprint. Öko-Institut (Hg.), FU Berlin, WWF. <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Unternehmen/WWF-Modell-Deutschland-Circular-Economy-Politik-Blueprint.pdf> (08.05.2025)
- Raatz, S.; Seidel, P.; Tuma, A.; Thorenz, A.; Helbig, C.; Reller, A.; Faulstich, M.; Joachimsthaler, C.; Steger, S.; Hagedorn, W.; Bickel; Liedtke, C. (2022): Abschlussbericht OptiMet Ressourceneffizienzsteigerung in der Metallindustrie - Substitution von Primärrohstoffen durch optimiertes legierungsspezifisches Recycling. Umweltbundesamt (Hg.), Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_81-2022_optimet.pdf (21.05.2025)
- Remondis (2022): Recyclingwirtschaft warnt vor Einweg E-Zigaretten. <https://remondis-aktuell.de/recycling/recyclingwirtschaft-warnt-vor-einweg-e-zigaretten/> (21.05.2025)
- Rüdenauer, I.; Gröger, J. (2022): Reduzierung des Energie- und Ressourcenverbrauchs vernetzter Elektro- und Elektronikgeräte – Mögliche Lösungs- und Regulierungsansätze im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie. Umweltbundesamt (Hg.), Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_17-2022_reduzierung_des_energie-_und_ressourcenverbrauchs_vernetzter_elektro-_und_elektronikgeraete.pdf (08.05.2025)
- Schischke, K.; Clemm, C.; Berwald, A.; Proske, M.; Dimitrova, G.; Reinhold, J.; Prewitz, C.; Durand, A.; Beckert, B. (2021): Ecodesign preparatory study on mobile phones, smartphones and tablets: final report. European Commission – Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs (ed.), Brussels. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/175802> (14.05.2025)
- Schleicher, T.; Tür, M.; Manhart, A.; Gröger, J. (2019): Weiterentwicklung Umweltzeichen Blauer Engel 2013-2017. Machbarkeitsstudie zur Integration sozialer Aspekte in das Umweltzeichen Blauer Engel am Beispiel eines Tablet-PCs. Umweltbundesamt (Hg.), Dessau-Roßlau. <https://www.blauer-engel.de/sites/default/files/2021-06/2019-03-04-texte-19-2019-bep-anlage-soziale-aspekte-tablet.pdf> (14.05.2025)
- Serpe, A.; Purchase, D.; Bisschop, L.; Chatterjee, D.; Gioannis, G. D.; Garelick, H.; Kumar, A.; M. Peijnenburg, W. J. G.; I. Piro, V. M.; Cera, M.; Shevah, Y.; Verbeek, S. (2025): 2002–2022: 20 years of e-waste regulation in the European Union and the worldwide trends in legislation and innovation technologies for a circular economy. In: RSC Sustainability. Royal Society of Chemistry. Vol. 3, No. 3, S. 1039–1083. DOI: 10.1039/D4SU00548A
- Stiftung Warentest (2020): Ergebnisse Reparatur-Umfrage: Erfahrungen von 10 000 Teilnehmern ausgewertet. <https://www.test.de/Ergebnisse-Reparatur-Umfrage-Erfahrungen-von-10000-Teilnehmern-ausgewertet-5587855-0/> (08.05.2025)
- Umweltbundesamt (UBA) (2024): Elektro- und Elektronikaltgeräte. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/elektro-elektronikaltgeraete> (08.05.2025)
- Umweltbundesamt (UBA) (2023): „Unsichtbarer“ Elektroschrott: Auch Möbel, Kleidung oder Smart-Home-Produkte können Elektrogeräte sein. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/unsichtbarer-elektroschrott-auch-moebel-kleidung> (21.05.2025)
- WEEE (2012): Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/19/2018-07-04/deu> (08.05.2025)

A.2 Steckbrief „Fahrzeuge“

A.2.1 Status quo

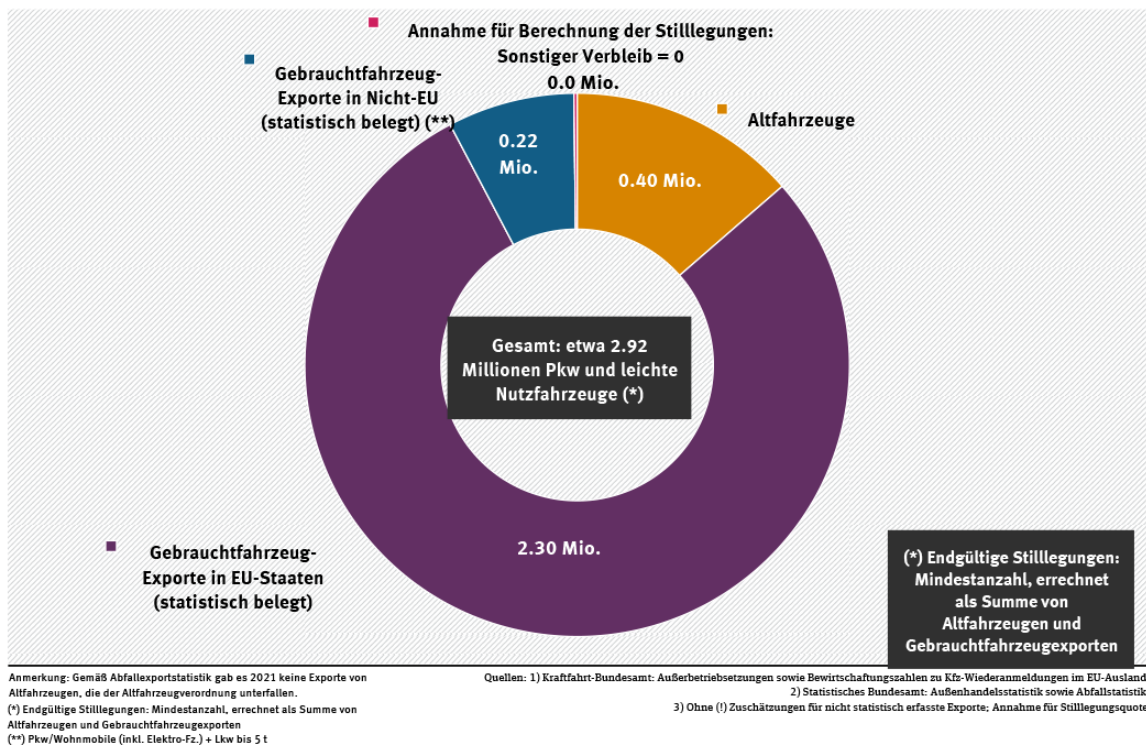
Laut Kraftfahrtbundesamt betrug der Bestand an PKW in Deutschland zum 01.01.2024 fast 50 Millionen Einheiten. Jedes Jahr werden ca. 3 Millionen PKW neu zugelassen und etwas weniger außer Betrieb gesetzt. Aus diesen Zahlen ergibt sich ein enormer Gesamtrohstoffbedarf und ein großes anthropogenes Lager (Kraftfahrtbundesamt 2024).

Der Transportsektor stellt mit ca. 600.000 zugelassenen LKW (Destatis 2024) zum gleichen Zeitpunkt in Bezug auf das anthropogene Rohstofflager keinen erheblichen Beitrag dar, die Betrachtungen im Projekt KartAL V beziehen sich deshalb ausschließlich auf PKW, falls nicht anders angegeben. Aufgrund der hohen Stückzahlen und der Vielzahl an verbauten Materialien ist der Fahrzeugsektor ein rohstoffintensiver Bereich.

Einerseits befinden sich in Fahrzeugen große Mengen an Materialien, aus denen relativ einfach reine Sekundärrohstoffe gewonnen werden können (z. B. in der Karosserie), andererseits spielen, gerade mit Blick auf den Hochlauf der Elektromobilität, eine Reihe an kritischen Rohstoffen, die beispielsweise in der Herstellung von Traktionsbatterien und Elektromotoren benötigt werden, eine große Rolle. Aufgrund dieser Kombination aus einem hohen, bislang oft ungenutzten Verwertungspotenzial und dem zu adressierenden zukünftigen Potenzial, welches sich aus der Antriebswende ergibt, wurde das Segment Fahrzeuge als ein prioritäres Aktionsfeld in Bezug auf die Urban-Mining-Strategie ausgewählt.

Anfang des Jahres 2024 waren noch rund 97 % der zugelassenen PKW mit Verbrennungsmotoren ausgestattet (ICE), und damit nur ca. 3 % (bzw. 1.5 Millionen Stück) vollelektrische Fahrzeuge (BEV) (Statista 2024). Der Koalitionsvertrag von SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP aus dem Jahr 2021 (SPD; Bündnis 90/Die Grünen; FDP 2021) sieht jedoch eine Zahl von 15 Millionen vollelektrischer PKW auf den Straßen in Deutschland bis 2030 vor. Darüber hinaus schreibt die Europäische Union zurzeit vor, dass ab 2035 nur noch emissionsfreie Pkw und leichte Nutzfahrzeuge in der EU neu zugelassen werden dürfen. (CO₂-Emissionsnormen 2023). Dies führt dazu, dass eine Verschiebung des Rohstoffbedarfs (vgl. A.2.2) zu erwarten ist. Die ersten nennenswerten Rückläufe von BEV in den Kreislauf sind aufgrund der durchschnittlichen Lebensdauern erst ab 2030 zu erwarten. Da hier jedoch momentan noch kaum adäquate Verwertungsinfrastrukturen z. B. für Elektromotoren und Traktionsbatterien existieren, ist es essenziell das Thema frühzeitig zu adressieren.

Abbildung A 6: Verbleib von in Deutschland endgültig außer Betrieb Gesetzten Fahrzeugen 2021



Quelle: (Umweltbundesamt 2024)

Abbildung A 6 zeigt den Verbleib der ca 3 Millionen jährlich in Deutschland endgültig ausser Betrieb gesetzten PKW. Hier wird deutlich, dass nur ein geringer Anteil in Deutschland verwertet wird. Der größte Teil wird ins Ausland exportiert. Während hier ein Export ins EU-Ausland aus Rohstoff Sicht zunächst eher unkritisch zu sehen ist, stellt der Export ins Nicht-EU-Ausland (auch in der Form des weiteren Exports aus dem EU-Inland) ein Problem dar, da hier nicht zwingend gegeben ist, dass die Verwertung des Fahrzeugs am endgültigen Lebensende in einer adäquaten Verwertungsanlage vorgenommen wird (Umweltbundesamt 2024).

In der Altfahrzeugverwertung spielt aufgrund der Vielzahl an verbauten Materialien die Trennung dieser Materialien eine wichtige Rolle. Eine Möglichkeit hierfür ist die Demontage größerer Bauteile, bevor das Fahrzeug einer Verwertungsanlage (Schredder) zugeführt wird. Für die Verwertung von Fahrzeugen innerhalb der Europäischen Union gibt es laut der gültigen Altfahrzeugverordnung Vorschriften zur Entfrachtung (ELV-Richtlinie 2000). 2021 wurden gemäß der Abfallstatistik des Statistischen Bundesamtes jedoch nur etwa 19 % des Leergewichts der behandelten Altfahrzeuge zur Gewinnung von Ersatzteilen oder verwertbaren Materialien ausgebaut. Darüber hinaus ist es jedoch, nicht zuletzt aufgrund der hohen Lohnkosten, oft nicht wirtschaftlich, weitere Materialien wie z. B. Glas, Kunststoff und Metallteile zu extrahieren (Zimmermann et al. 2022, Baron et. al. 2023).

Aus diesem Grund werden die Restkarossen oft in ihrer Gesamtheit zusammen mit weiteren Abfallströmen (Misch- und Sammelschrott etc.) einer Schredderanlage zugeführt, deren Ausgangsstrom ggf. in Nachbehandlungsanlagen weiter getrennt wird. Die EU-Altfahrzeug-Richtlinie bzw. die deutsche Altfahrzeug-Verordnung schreiben seit 2015 vor, dass mindestens 95 Gew.-%, bezogen auf das Leergewicht aller Altfahrzeuge, wieder verwendet oder verwertet werden müssen. Da die Qualität von Schredderschrott – nicht zuletzt durch störende Kupferanteile - jedoch eine größere Herausforderung darstellt (vgl. auch Abschnitt A.2.2), und damit selten

Sekundärrohstoffe gewonnen werden, die den hohen Qualitätsansprüchen der Automobilherstellung genügen, werden die entstehenden Rezyklate oft im Bausektor verwendet (Umweltbundesamt 2024).

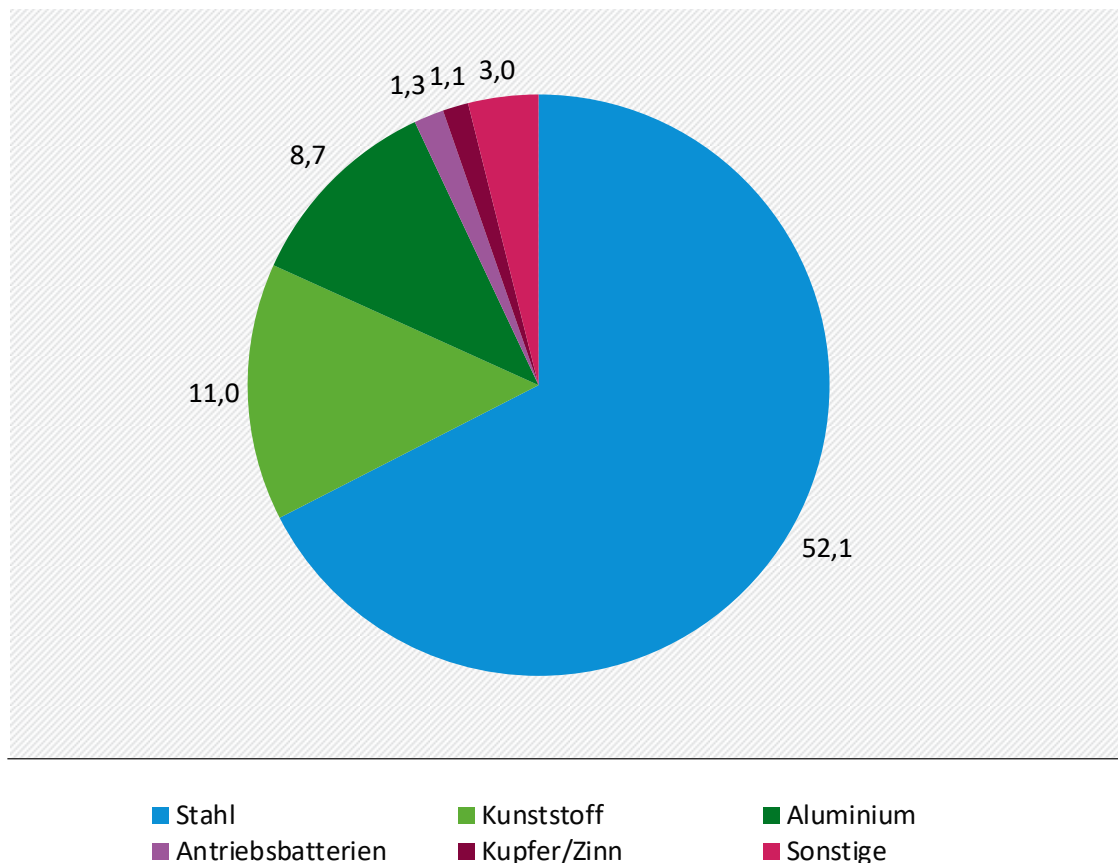
Im Vorschlag für die neue Altfahrzeugverordnung der EU werden die Demontagevorschriften deshalb noch ausgeweitet, um die bessere pre-Schredder-Trennung einzelner Materialien zu gewährleisten (AltfahrzeugVO-Entwurf 2023).

A.2.2 Rohstoffe in Fahrzeugen

Abbildung A 7 zeigt die Zusammensetzung der Hauptanteile aller 2023 in Deutschland angemeldeten PKW. Hier wird ersichtlich, dass der größte Stoffstrom aus der Fahrzeugindustrie Stahl ist. Des Weiteren sind in der Fahrzeugkarosserie größere Mengen verschiedener Kunststoffe enthalten. Den drittgrößten Anteil macht Aluminium aus.

Zusätzlich zu den hier aufgetragenen Rohstoffen enthält ein PKW eine Vielzahl an weiteren Materialien in kleineren Mengen. Abgesehen von den in den nächsten Abschnitten separat behandelten Komponenten sind dies hauptsächlich Glas, Gummi, sowie Edelmetalle wie Gold, Silber und Platin.

Abbildung A 7: Rohstoffgehalt des PKW-Bestands in Deutschland 2023 in Mt



Quelle: eigene Darstellung von Daten aus Greet®-Modell <https://www.energy.gov/eere/greet>

Batterien

Eine in Bezug auf die Rohstoffnutzung besonders intensiv diskutierte Komponente ist die Fahrzeugbatterie. Zum heutigen Zeitpunkt werden vollelektrische sowie hybride PKW fast ausschließlich mit Lithium-Ionen-Batterien (LIB) mit Flüssigelektrolyt betrieben. Dabei waren 2022 wiederaufladbare Batterien mit Lithium-Mangan-Nickel-Kobaltoxid (NMC) mit einem Marktanteil von ca. 70 % der gängigste Typ. Einen weiteren recht großen Marktanteil von 20 % haben Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid (NCA) als Aktivmaterial (Buchert et al. 2023). In den letzten Jahren ist nach einem anfänglichen Rückgang der Verkaufszahlen jedoch auch ein deutlicher Trend hin zur kobalt- und nickelfreien Zellchemie mit Lithiumeisenphosphat (LFP), besonders im Bereich der Klein- und Mittelklassewagen, zu erkennen. Ein weiteres Aktivmaterial, das zwar heute kaum noch verbaut wird, für das Recycling von Batteriezellen jedoch weiter erwähnenswert bleibt, ist Lithium-Mangan-Oxid (LMO).

Während in allen genannten Zelltypen Lithium, Graphit und Kupfer vorkommt, sind insbesondere in Zellen mit NMC-Chemie auch Nickel, Kobalt und Mangan enthalten. Pro kWh Leistung enthält eine durchschnittliche LIB ungefähr 100 g Li, 900 g Graphit und 1 kg Kupfer. Hinzu kommen je nach Zellchemie bis zu 700 g Nickel, 300g Kobalt sowie 300 g Mangan (Argonne National Laboratory 2023). Alle diese genannten Materialien stellen strategisch wichtige Rohstoffe dar (Buchert et al. 2023). Eine Verlagerung hin zu LFP-Zellen senkt zwar den Kobalt-, Nickel- und Mangan-Bedarf, die benötigten Kupfer- und Lithiummengen sind jedoch für alle Zellchemien in einer ähnlichen Größenordnung (Argonne National Laboratory 2020).

Motoren

In Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor besteht dieser hauptsächlich aus Stahl und Leichtmetallen, die zusammen mit der restlichen Karosserie behandelt werden können. BEV jedoch werden mit einem Marktanteil von ca. 95 % hauptsächlich mittels permanenterregter Synchronmotoren (PMSM) mit Neodym-Bor-Eisen-Magneten angetrieben. Diese enthalten neben Eisen und Bor die beiden Leichten Seltenen Erden Neodym und Praseodym (rund 24 Gew-%) sowie die beiden Schweren Seltenen Erden Dysprosium und Terbium (rund 6 %) (Buchert et al. 2023) und sind somit aus Sicht der Rohstoffnutzung von größerem Interesse als Verbrennungsmotoren.

Neben dem Antriebsmotor werden auch an anderen Stellen in Fahrzeugen kleinere Elektromotoren verbaut, diese tragen jedoch in BEV eine vergleichsweise geringe Menge an Permanentmagneten bzw. Seltenen Erden bei. Während das Gesamtgewicht der verbauten Magnete im BEV mit PMSM je nach Motorleistung 1-2.5 kg beträgt, ist dieses in ICE ca. um einen Faktor 4 kleiner (Buchert et al. 2023).

Zusätzlich zu Seltenen Erden enthalten die Antriebsmotoren in BEV einen nicht unerheblichen Anteil an Kupfer (Baron et. al. 2023), der momentan ebenfalls geschreddert wird. Die Trennung der verschiedenen geschredderten Materialien wird in den folgenden Abschnitten diskutiert.

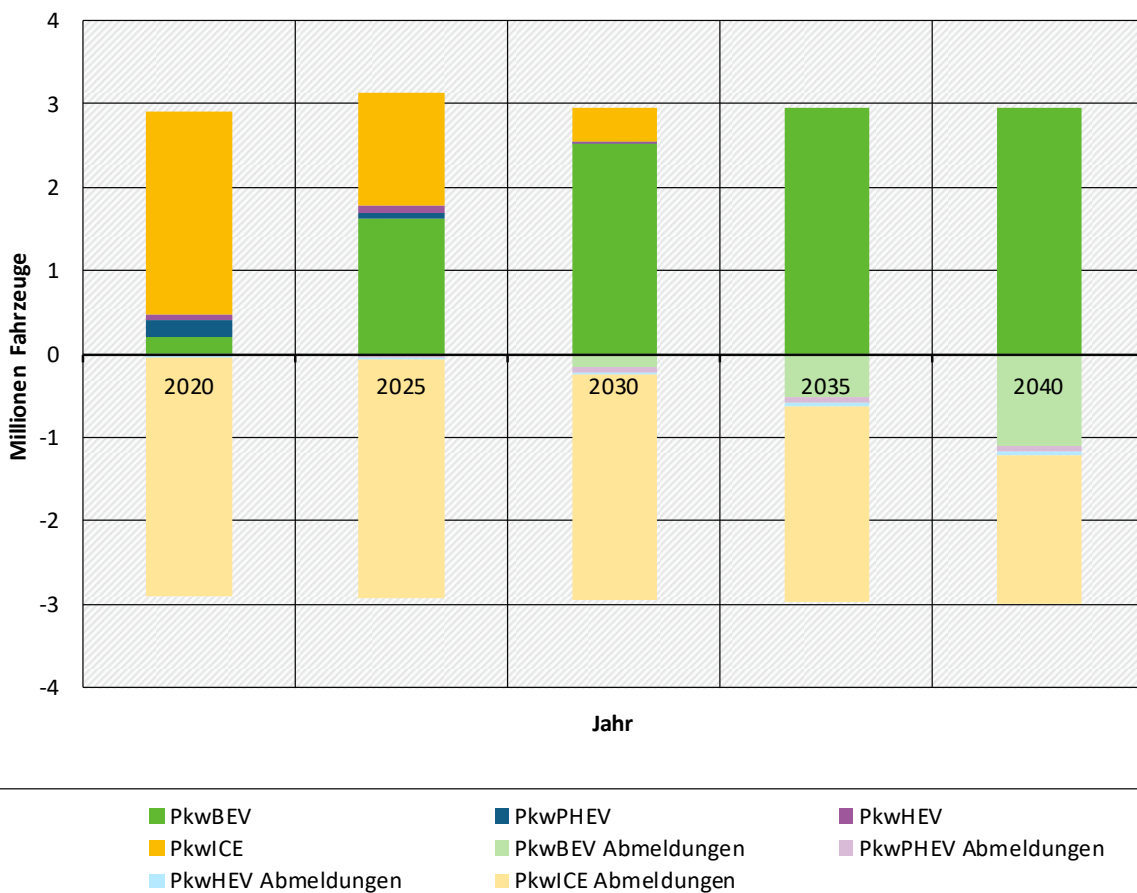
Elektronik

In der weiteren im Fahrzeug verbauten Elektronik, wie z.B. Servomotor, Sitzverstellung, Bildschirme, Kabel und Sensoren, befinden sich Seltene Erden aus Magneten in kleineren Mengen, Kupfer, Stahl und verschiedene Edelmetalle wie Gold, Silber und Platin (Thomé-Kozmiensky & Goldmann 2015). Gerade der Kabelbaum macht insbesondere in ICE einen großen Teil des Kupfergehalts aus. BEV enthalten generell mehr Kupfer als ICE, hier liegt der Hauptanteil jedoch im Antriebsmotor (Baron et. al. 2023).

A.2.3 Zukünftiges Sekundärrohstoffpotenzial

Für eine Abschätzung des zukünftigen Sekundärrohstoffpotenzials im Fahrzeugsektor werden hier hauptsächlich die in (Buchert et al. 2023) berechneten Werte zu Rate gezogen. Hier wurde davon ausgegangen, dass die An- und Abmeldezahlen von Fahrzeugen in Deutschland auf dem Zeithorizont bis 2040 weitestgehend konstant bleiben. Ein wichtiger Einflussfaktor, insbesondere mit Blick auf kritische Rohstoffe in Batterien und Elektromotoren wird hier der Hochlauf der Elektromobilität sein. Es wird dabei davon ausgegangen, dass BEV bis zum beschlossenen Stopp der Neuzulassungen von PKW mit Verbrennungsmotoren 2035 einen immer größeren Anteil der jährlichen Neuzulassungen ausmachen. Hybridfahrzeuge werden mengenmäßig als wenig relevant eingestuft. Wie in Abbildung A 8 erkennbar, werden Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor noch weit über das Jahr 2035 eine große Quelle für Sekundärrohstoffe sein. Mit einem mengenrelevanten Rücklauf von BEV und damit einem Potenzial für Sekundärrohstoffnutzung aus Traktionsbatterien und Elektromotoren ist frühestens ab 2030 zu rechnen. Insgesamt steht für viele Materialien eine ausreichende Sekundärrohstoffquelle in Form von abgemeldeten Fahrzeugen zur Verfügung, die Nutzung muss allerdings in Zukunft noch optimiert werden. Da dies aus Eigenantrieb der Branche aus wirtschaftlichen Gründen bisher noch nicht geschehen ist, wird für die zukünftige Entwicklung auch die Rechtssetzung, wie beispielsweise die neue Altfahrzeugordnung der EU (AltfahrzeugVO-Entwurf 2023) eine Rolle spielen.

Abbildung A 8: Neuzulassungen und Abmeldungen von PKW in Deutschland (2020-2040)



Quelle: eigene Darstellung nach Zahlen aus (Buchert et al. 2023)

Die Sekundärrohstoffnutzung von antriebsunabhängigen Materialien ist weitestgehend unabhängig vom Antriebswechsel auf BEV. Einzig im Einsatz von Aluminium könnte sich eine leichte Verschiebung ergeben. Durch den Wegfall des Motorblocks in vollelektrischen Fahrzeugen sinken die Einsatzmöglichkeiten für Aluminium mit niedrigeren Qualitätsansprüchen (Baron et al. 2023). Gleichzeitig führt der Bedarf für leichtere Karosserien ggf. langfristig zu mehr Rückläufen von Aluminium aus dem Transportsektor, dessen Qualität nicht zum Wiedereinsatz in Fahrzeugen genügt.

Eine weitere Folge von potentiellen Entwicklungen im Leichtbau ist der Einsatz von schwer rezyklierbaren Materialien wie hochfesten Stählen oder Verbundmaterialien (AMS 2023). Aus Stakeholderkonsultationen im Rahmen verschiedener Projekte des Öko-Instituts geht jedoch hervor, dass Leichtbau aufgrund der weiter steigenden Batteriegrößen in der Automobilindustrie momentan kein priorisiertes Thema ist.

Für weitere in der Karosserie enthaltene Materialien, die bisher aus wirtschaftlichen Gründen nicht wiederverwendet werden, werden rechtliche Vorgaben für das zukünftige Potenzial maßgeblich sein. Laut dem Vorschlag für die neue Altfahrzeugverordnung der EU (AltfahrzeugVO-Entwurf 2023) müssen in Fahrzeugen verbauter Kunststoff zukünftig zu mindestens 25 Gewichtsprozent aus recycelten Kunststoffen aus Verbraucherabfällen bestehen. Wiederum 25 % hiervon muss aus Altfahrzeugen kommen. Auch Rezyklateinsatzquoten für Stahl in Fahrzeugen sind angedacht und dürfen nach einer Machbarkeitsstudie von der Kommission festgelegt werden. (AltfahrzeugVO-Entwurf 2023) Auch der im Frühjahr 2025 von der Europäischen Kommission veröffentlichte „European Steel and Metals Action Plan“ greift die Förderung der Zirkularität von Metallen wie Stahl, Aluminium und Kupfer nochmals in Form von geplanten Machbarkeitsstudien zu möglichen Rezyklateinsatzquoten und Unterstützung des Sekundärrohstoffmarkttest für Metalle auf (EU COM 2025a).

Für die meisten für neue Fahrzeuge benötigten Materialien existiert ein ausreichend großes anthropogenes Lager in Form von Altfahrzeugen.

Batterien

Mit dem Hochlauf der Elektromobilität wächst der Bedarf an Batteriekapazität für PKW in Deutschland laut den Berechnungen in (Buchert et al. 2023) von 15 GWh 2020 auf 210 GWh 2030 und bis zu 270 GWh 2035 an. Entsprechend steil entwickelt sich auch die Nachfrage nach den verwendeten Rohstoffen. Als momentan in größerem Maßstab ausgereifte Technologie werden hier ausschließlich LIB betrachtet. Die neue Batterieverordnung der EU schreibt für LIB eine verpflichtende Effizienz des Recyclings nach Gesamtgewicht sowie stoffspezifische, mehrstufig hochgefahrenen Rückgewinnungs- bzw. Rezyklateinsatzquoten für Lithium, Kobalt und Nickel vor (BattVO 2023). Bis zum Jahr 2032 müssen 70 Gew.-% der Gesamtbatterie wiederverwertet werden und 80% des enthaltenen Lithiums sowie 95 % des enthaltenen Ni, Co und Cu zurückgewonnen werden. In neuen Batterien wird ein Recyclinganteil von 26 % Co, 12 % Li und 15% Ni bis 2036 gefordert. Die Rezyklate dürfen auch aus Batterien aus anderen Anwendungsfeldern gewonnen werden. Prinzipiell kann allerdings mit den festgelegten Rückgewinnungsquoten aus in der EU abgemeldeten und zum Recycling dort verbleibenden Altfahrzeugg Batterien bis 2035 so viel Lithium zurückgewonnen werden, dass bereits ca. 12 % des Bedarfs für die Herstellung neuer PKW-Batterien aus Rezyklat gedeckt werden können (Buchert et al. 2023). Momentan sind allerdings noch nicht die nötigen Kapazitäten für Batterierecycling in Deutschland und Europa vorhanden, um dies so zu verwirklichen.

Eine wichtige Frage zur zukünftigen Sekundärrohstoffnutzung in Batterien ist die Entwicklung der Zellchemien. Es zeigt sich seit einiger Zeit ein Trend in Richtung des vermehrten Einsatzes von LFP-Zellen. Da diese wesentlich weniger werthaltige Materialien enthalten als die

momentan noch vorherrschenden NMC-Zellen, gibt es somit weniger wirtschaftlichen Anreiz fürs Recycling. Zudem sind LFP-Batterien von den Rückgewinnungs- und Rezyklateinsatzquoten weniger betroffen, da sie weder Ni noch Co enthalten. Da hier die zukünftige Entwicklung noch nicht klar vorausgesehen werden kann, ist es wichtig, Prozesse und Vorgaben zum Recycling flexibel zu halten, damit auf sich verändernde Materialzusammensetzungen eingegangen werden kann (Biemann et al. 2024).

Ein weiterer offener Punkt ist die potentielle Weiternutzung von Traktionsbatterien im Second Life, beispielsweise in stationären Stromspeichern. Dies würde den Zeitpunkt, zu dem die Batterien dem Recycling zugeführt werden und damit als Sekundärrohstoffquelle zur Verfügung stehen erheblich nach hinten verschieben. Obwohl es einige Bestrebungen gibt, Traktionsbatterien als Second-Life Stromspeicher zu nutzen (EnBW 2024; FR 2024), ist momentan nicht gänzlich absehbar, dass dies eine flächendeckende Praxis wird, sodass der Einfluss nicht abschließend abgeschätzt werden kann.

Elektromotoren

Äquivalent zu den Batteriematerialien wächst auch der Bedarf an seltenen Erden für Elektromotoren mit Hochlauf der Elektromobilität voraussichtlich stark an. Aus den Ergebnissen der in (Buchert et al. 2023) berechneten Szenarien geht hervor, dass der jährliche Bedarf an Permanentmagneten für die Elektromotoren für Neuzulassungen in Deutschland von rund 500 t im Jahr 2020 auf rund 5.500 t bis zum Jahr 2035 ansteigt. Obwohl es in der Magnetforschung Bestrebungen gibt, den notwendigen Anteil der Schweren Seltenen Erden in den Magnetlegierungen zu reduzieren, ist bisher keine industriell ausgereifte Technologie vorhanden.

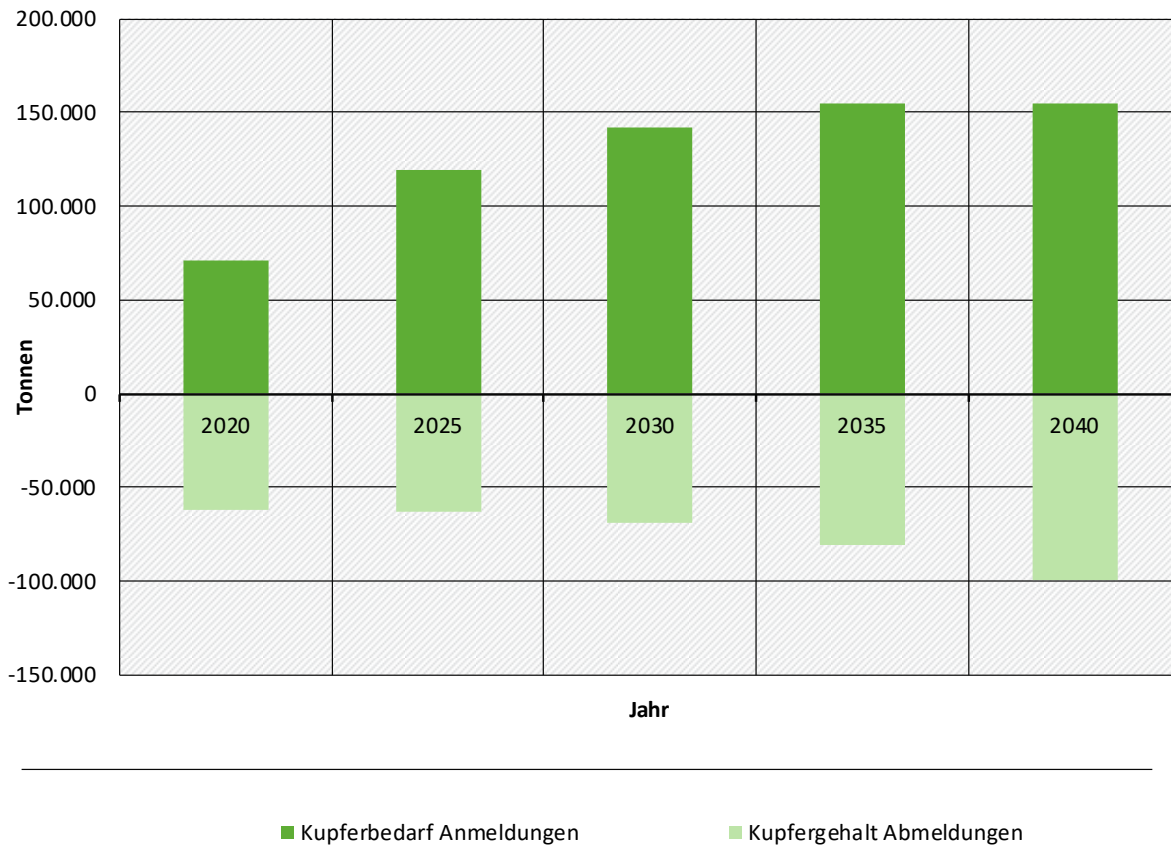
Ausgebaute Permanentmagnete besitzen prinzipiell ein hohes Sekundärrohstoffpotenzial, da zum einen 30 Gew.-% seltene Erden in vorhandenen Magneten ein wesentlich höherer Anteil als in jeder natürlichen Lagerstätte ist (Althoff et al. 2023) und zum anderen die aufwendige und teure Abspaltung nicht benötigter Seltener Erden aus dem Rohmaterial wegfällt.

Aufgrund der bisher minimalen Rückläufe von Elektromotoren wird dieses jedoch bisher nicht ausgeschöpft und die Seltenen Erden gehen bei der Altfahrzeugverwertung verloren. Auch im Bereich der Windkraftanlagen als zweite große Sekundärrohstoffquelle für seltene Erden gib es bisher aufgrund der recht hohen Lebensdauer der Anlagen wenig Rückläufe (Althoff et al. 2023) und keine Strategie zur Wiedergewinnung Seltener Erden. Bis 2040 ist jedoch laut (Buchert et al. 2023) damit zu rechnen, dass bereits deutlich mehr als 2000 t Permanentmagnete aus deutschen Altfahrzeugen dem Recycling zugeführt werden und damit ein erheblicher Anteil des voraussichtlichen Bedarfs gedeckt werden könnte. Damit könnte auch die Erfüllung der im Rahmen des Critical Raw Materials Acts noch festzulegenden Rezyklateinsatzquoten für Materialien in Permanentmagneten frühzeitig gesichert werden. Obwohl es bereits erste Anlagen gibt, in denen Permanentmagnete recycelt werden können (Heraeus Remloy 2024), müssten die Kapazitäten hierfür jedoch noch deutlich ausgebaut werden.

Elektronik

Aus rohstofflicher Sicht ist die Fahrzeugelektronik hauptsächlich wegen der großen Menge an verbautem Kupfer als kritischer Rohstoff interessant. Abbildung A 9 zeigt die zukünftig potentiell im Fahrzeugbau benötigten Kupfermengen im Vergleich mit denen, die prinzipiell aus abgemeldeten Fahrzeugen wiedergewonnen werden könnten. Hier zeigt sich deutlich, dass ein nicht zu vernachlässigender Teil des Kupfers aus dem anthropogenen Lager gedeckt werden könnte.

Abbildung A 9: Benötigte Kupfermengen im Fahrzeugbau in Deutschland im Vergleich mit Rückläufen aus Altfahrzeugen in Tonnen



Quelle: eigene Darstellung nach Zahlen aus (Buchert et al. 2023)

A.2.4 Handlungsbedarf für eine optimierte Urban Mining Strategie

Aufgrund der hohen Stückzahl und damit großen Stoffströme ist der Bereich der Fahrzeuge, insbesondere der PKW, ein wichtiger Ansatzpunkt in einer optimierten Urban Mining Strategie. Eine übergreifende strategische Lücke stellt hier die fehlende Trennung von Materialien bei der Verwertung von Fahrzeugen dar.

Neben den gesetzlich vorgeschriebenen Maßnahmen wie beispielsweise der Trockenlegung und der Entfernung des Katalysators sowie der Blei-Säure-Batterie (ELV-Richtlinie 2000) werden nur wenige Fahrzeugteile vor der Zuführung in die Schredderanlage von der Karosserie getrennt. Hierzu gehören beispielsweise die Reifen. Diese werden jedoch in Deutschland kaum wiederverwendet oder aufbereitet, sondern meist energetisch in der Zementindustrie oder stofflich als Volumenlieferant in Sport- und Spielplatzböden verwertet (Sander et al. 2020).

Ansonsten werden in Deutschland und der EU kaum Pre-Schredder-Demontagen vorgenommen. Prinzipiell ließen sich vor dem Schreddern verschiedene Komponenten aus z.B. Glas, Kupfer und Kunststoffe mechanisch abtrennen. Aufgrund der geringen Materialwerte und hohen Arbeitskosten ist dies jedoch für Altfahrzeugverwerter meist wirtschaftlich nicht rentabel (Baron et al.

2023). Stattdessen wird die gesamte Restkarosserie zusammen mit weiterem stahlhaltigem Schrott zunächst geschreddert, wobei drei Fraktionen entstehen:

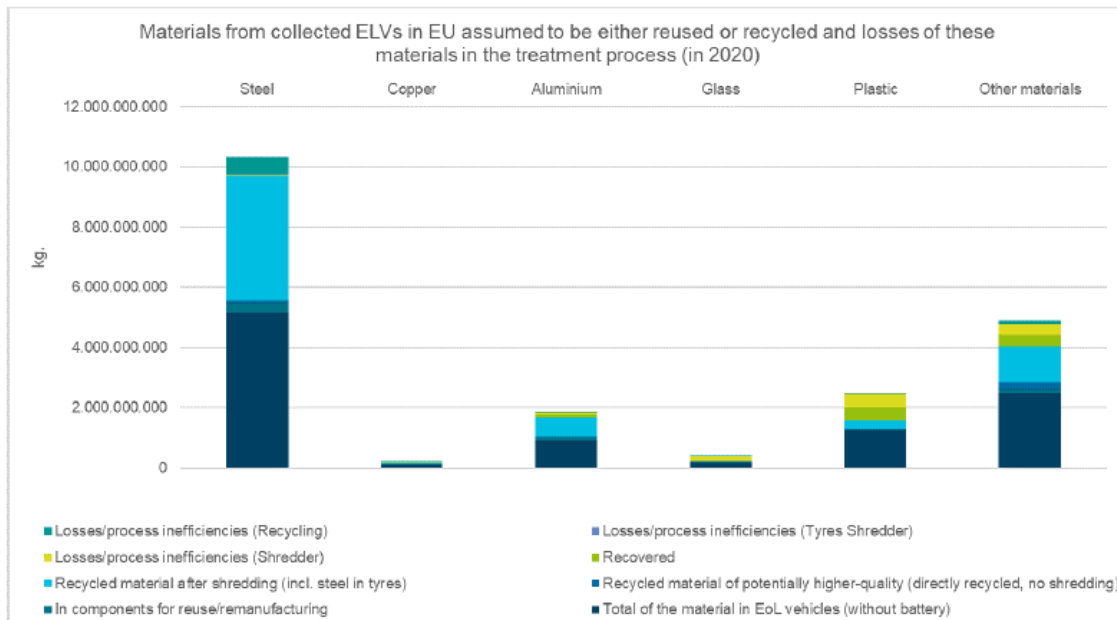
Der **Schredderschrott** (ca. 70 Gew.-% des Gesamtschredderoutputs (Sander et al. 2020)) besteht aus Eisen und Stahl und kann deshalb magnetisch abgetrennt werden. Insbesondere für Stahl werden hohe Wiederverwendungsquoten angegeben, (90 % (Baron et al. 2023)), dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass der recycelte Fahrzeugstahl aufgrund der Verunreinigung mit Kupfer den hohen Qualitätsansprüchen im Automobilbau nicht genügt und deshalb meist als Baustahl wiederverwendet wird. Obwohl ein solcher branchenübergreifender Open-Loop-Ansatz für die Sekundärrohstoffnutzung durchaus sinnvoll sein kann, führt dies unter Umständen dazu, dass die technologische Entwicklung in Richtung hochqualitativen Recyclingstahl sich verzögert und in der Automobilbranche weiter hauptsächlich Primärstahl eingesetzt werden muss. Zudem sinkt die Stahlqualität dann mutmaßlich mit jedem Recyclingvorgang, so dass hier dauerhaft nur downcycling betrieben werden kann.

Die **Schredderschwerfraktion** (ca. 10 Gew.-%) enthält weitere Metalle wie Aluminium, Kupfer und Edelstahl und wird meist zur Wiedergewinnung der Metalle an Metallhütten verkauft [Umweltbundesamt 2024a]. Alle weiteren Bestandteile werden in der **Schredderleichtfraktion** (bis zu 20 Gew.-%) zusammengefasst. Diese enthält damit Kunststoffe, Gummi, Glas, Restmetalle und weitere Materialien und ist teilweise schadstoffbelastet. Es gibt für Schredderschwer- und leichtfraktion verschiedene komplexe Verfahren zur Post-Schredder-Trennung der Materialien. Dies kann z. B. einfaches Sieben beinhalten, aber auch den Einsatz von Wirbelstromschneidern und sensorbasierten Sortiermaschinen (Knappe et al. 2021). Diese werden jedoch in Deutschland nur vereinzelt eingesetzt⁷. Zudem wird dabei meist ausschließlich auf die vollständige Rückgewinnung von Restmetallen abgezielt. Eine weitere Abtrennung von anderen Materialien, wie beispielsweise Kunststoffen, ist für die Unternehmen nicht wirtschaftlich. Die Reste der Schredderleichtfraktion werden entweder im Bergversatz oder energetisch verwertet, kleinere Reste (< 10%) werden beseitigt (Umweltbundesamt 2024).

Abbildung A 10 stellt die im Rahmen der Entwicklung einer neuen Altfahrzeugverordnung der EU berechneten Recyclingmengen nach Materialien und Art des Recyclings dar. Hier wird deutlich, dass die Materialien zum Großteil erst nach dem Schreddervorgang zurückgewonnen werden. Abgesehen von Stahl führt dies flächendeckend zu großen Verlusten und kleinen Mengen an qualitativ hochwertigem Rezyklat.

⁷ Beispiele hierfür sind die Verfahren der Unternehmen ISR sowie SWR (<https://www.isr-recycling.de/index.php/leistungen/recycling-metallhandel>), <https://srw-recycling.de/recycling/#>)

Abbildung A 10: In der EU aus Fahrzeugen zurückgewonnene Materialien 2020



Quelle: [Baron et. al. 2023]

Batterien

Die strategische Bedeutung vieler Batterierohstoffe beruht, abgesehen von ihrem endlichen Vorkommen, auch darauf, dass die Wertschöpfungsketten oft als problematisch eingestuft werden, da Abbau und/oder Verarbeitung der Rohstoffe in vielen Fällen nur auf einige wenige Länder beschränkt sind. Beide Herausforderungen ließen sich mit einem effizienten Einsatz von Sekundärrohstoffen aus bereits vorhandenen LIB signifikant adressieren.

Prinzipiell ist die Rückgewinnung von vielen Rohstoffen aus LIB möglich. In Deutschland werden bislang im kleinen Maßstab hauptsächlich Verfahren zur Rückgewinnung von Kupfer-, Nickel- und Kobaltverbindungen angewandt, da diese die wertvollsten enthaltenen Materialien darstellen und deren Rückgewinnung damit aus wirtschaftlicher Perspektive besonders interessant ist. Verfahren zur Rückgewinnung von Lithium sind inzwischen allerdings ebenfalls so weit ausgereift, dass sie in nächster Zukunft industriell realisiert werden könnten (Althoff et al. 2023). Auch an der Rückgewinnung von Graphit wird geforscht. Mangan könnte zwar in einigen Fällen technisch gesehen zurückgewonnen werden, dies ist allerdings mit weiteren Aufbereitungsschritten verbunden, die sich bisher wirtschaftlich (und ggf. auch ökologisch) nicht rentieren. Gerade im Fahrzeugsektor sind zum jetzigen Zeitpunkt aufgrund der Lebensdauer der ersten auf den Markt gebrachten Elektrofahrzeuge bisher kaum nennenswerte Rückläufe von Batterien zu verbuchen. Dies führt dazu, dass noch keine ausgereiften Verwertungsstrukturen für große Zahlen von LIB vorliegen. Ein damit einhergehendes Problem ist, dass die im ersten Recyclingschritt produzierte schwarze Masse oft nicht in Deutschland bzw. der EU verbleibt. Während hier kaum Kapazitäten zur Weiterbehandlung vorhanden sind, herrscht in Asien, insbesondere in China, ein Kapazitätsüberfluss. Dies führt dazu, dass ein großer Teil der in der EU produzierten schwarzen Masse nach Asien verkauft wird, und somit die enthaltenen Rohstoffe nicht hier wiederverwendet werden können. Um dieses Problem abzumildern, wurde Schwarzmasse im März 2025 von der European Commission als gefährlicher Abfall eingestuft und somit der Export in nicht-OECD-Länder verboten (EU COM 2025). Um mit diesem Beschluss die Zirkularität von Batteriematerialien in der EU voranzutreiben, muss er jedoch auch mit dem Aufbau von Weiterverarbeitungsanlagen in der EU einhergehen.

Eine in der Vergangenheit immer wieder diskutierte Alternative zum Recycling von Batterien nach der Nutzung als Traktionsbatterie sind Second-Life-Anwendungen. Hierzu bieten sich zum einen kleinere Fahrzeugklassen, die eine geringere Reichweite benötigen an, zum anderen allerdings auch die Nutzung der Akkus in stationären Stromspeichern. Da die Weiternutzung von gebrauchten Batterien durch andere Unternehmen allerdings u.a. die Problematik der Garantieweitergabe aufwirft, haben Second-Life-Nutzungskonzepte bisher nicht weitgreifender Fuß gefasst. Im Zusammenhang mit Urban Mining spielt die Second-Life-Nutzung zudem nur in der Hinsicht eine Rolle, dass die Rückführung der Altbatterie in den Kreislauf hierdurch verzögert wird.

Motoren

Da in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor dieser hauptsächlich aus Stahl und Leichtmetallen besteht, wird momentan vor dem Schreddern der Altfahrzeuge (vgl. Abschnitt Karosserie und Rahmen) der Motor nicht demontiert.

Ähnlich wie viele Batterierohstoffe weisen Seltene Erden eine problematische Wertschöpfungskette mit einer großen Abhängigkeit von einzelnen Ländern auf (Buchert et al. 2023). Trotzdem werden Permanentmagnete momentan ausschließlich mit Primärrohstoffen hergestellt und Elektromotoren aus Fahrzeugen ebenfalls in der Schredderanlage mitverarbeitet, wobei die Seltenen Erden verlorengehen. In Europa werden gerade erste Kapazitäten zum Recycling von Permanentmagneten aufgebaut (siehe z. B. Heraeus Remloy 2024).

Elektronik

Das größte Hemmnis für die Wiederverwertung von Kupfer aus der Fahrzeugelektronik ist ebenfalls die unzureichende Trennung der Rohstoffe bei der Verwertung von Altfahrzeugen. Der Ausbau von kupferreicher Elektronik, wie beispielsweise des Kabelbaums, könnte hier zum einen die wiedergewonnene Menge an Kupfer drastisch erhöhen und zum anderen dafür sorgen, dass im zurückgewonnenen Stahl weniger Verunreinigungen durch Kupfer zurückbleiben

A.2.5 Quellenverzeichnis Steckbrief „Fahrzeuge“

AltfahrzeugVO-Entwurf (2023): Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Anforderungen an die kreislauforientierte Konstruktion von Fahrzeugen und über die Entsorgung von Altfahrzeugen, zur Änderung der Verordnungen (EU) 2018/858 und (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinien 2000/53/EG und 2005/64/EG, COM(2023) 451 final, 13.07.2023. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52023PC0451> (11.09.2025)

Althoff, E.; Bichlmeier, T.; Bierhaus, L.; Dietzsch, N.; Dambeck, H.; Kemmler, A.; Krampe, L.; Lübbers, M.; Schulz, L.; Phuong Vu, M.; Wendring, P.; Wunsch, A.; Wunsch, M.; Ziegenhagen, I.; Betz, J.; Buchert, M.; Schön-Blume, N.; Eckert, D.; Göckeler, K.; Görz, W.; Heutmanek, U.; Merz, C.; Steinbach, I. (2023): Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045, Stiftung Klimaneutralität (Hg.). https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2023/11/Stiftung_Klimaneutralitaet_2023-Resiliente-Lieferketten_Langfassung-2.pdf (21.07.2025)

Argonne National Laboratory (2020): Winjobi, O.; Dai, Q.; J.C. Kelly, Update of Bill-of-Materials and Cathode Chemistry addition for Lithium-ion Batteries in GREETÖ 2020

Argonne National Laboratory (2023): BatPaC – A Spreadsheet Tool to Design a Lithium Ion Battery and Estimate Its Production Cost.

Auto, Motor Sport (AMS) (2023): Karosserietechnik - Leichter ist besser. <https://www.auto-motor-und-sport.de/karosserie/moeglichkeiten-des-karosserie-leichtbaus/> (03.06.2025)

Baron, Y.; Kosińska-Terrade, I.; Loew C.; Köhler, A.; Moch, K.; Sutter, J.; Graulich, K.; Adjei, F.; Mehlhart, A. (2023): Study to support the impact assessment for the review of directive 200/53/EC on end-of-life vehicles.

BattVO (2023): Verordnung (EU) 2023/1542 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG, ABl. L 191 vom 28.7.2023. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj> (15.08.2025)

Biemann, K.; Helms, H.; Münter, D.; Liebich, A.; Pelzeter, J.; Kämper, C.; Müller, J. (2024): Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehre - Endbericht, Texte | 13/2024, Februar 2024, Umweltbundesamts (Hg.). <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-der-umweltbilanz-von-kraftfahrzeugen> (11.09.2025)

Buchert, M.; Göckeler, K.; Merz, C.; Schön-Blume, N.; Steinbach, I.; Görz, W.; Eckert, D.; Betz, J. (2023): Bedarf strategischer Rohstoffe für den Pkw- und Lkw-Sektor in Deutschland bis 2040, Bericht im Rahmen des Projekts "Analysen und Bewertungen der Klimaschutzwirkung von Instrumenten und Maßnahmen zur Treibhausgasminde- rung im Verkehr, Entwicklung von Gestaltungsoptionen" ELMO4010. Im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hg.), 30.11.2023. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Rohstoffbedarf-PKW-LKW-Szenarien-D.pdf> (08.09.2025)

Destatis (2024): Bestand an Kraftfahrzeugen und Schienenfahrzeugen für die Jahre 2020 bis 2024. Destatis. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Unternehmen-Infrastruktur-Fahrzeugbestand/Tabellen/fahrzeugbestand.html> (19.06.2024)

EnBW (2024): Second-Life-Batterien: Stromspeicher aus gebrauchten E-Auto-Akkus. <https://www.enbw.com/unternehmen/themen/speicher/second-life-batterien.html> (03.06.2025)

ELV-Richtlinie (2000): Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge - Erklärung der Kommission, ABl. L 269 vom 21.10.2000, S. 34-43, (End-of-Life Vehicles, abgekürzt „ELV“). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=celex:32000L0053> (11.09.2025)

European Commission (EU COM) (2025): New battery-related waste codes will boost circular management of batteries and their critical raw materials, 5 March 2025. https://environment.ec.europa.eu/news/battery-related-waste-codes-update-set-boost-circular-economy-2025-03-05_en, (03.06.2025)

European Commission (EU COM) (2025a): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council and the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - A Steel and Metals Action Plan, 19.3.2025 [https://www.europarl.europa.eu/RegData/docs_autres_institutions/commission_europeenne/com/2025/0125/COM_COM\(2025\)0125_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/docs_autres_institutions/commission_europeenne/com/2025/0125/COM_COM(2025)0125_EN.pdf) (11.09.2025)

CO2-Emissionsnormen (2023): Verordnung (EU) 2023/851 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. April 2023 zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/631 im Hinblick auf eine Verschärfung der CO2-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge im Einklang mit den ehrgeizigeren Klimazielen der Union, Amtsblatt der Europäischen Union L 110/5, 25.04.2023. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0851> (11.09.2025)

Frankfurter Rundschau (FR) (2024): VW löst Elektroschrott-Problem – Das steckt hinter dem „Power Center“. <https://www.fr.de/wirtschaft/vw-elektroschrott-problem-power-center-energiewende-elektroautos-akku-batterie-93120174.html> (03.06.2025)

Heraeus Remloy (2024): Neues Aufarbeitsverfahren für Neodym-Eisen-Bor-Magnete. https://www.heraeus.com/de/landingspages/hrm/recycling_benefits/Recyclingrareearthmagnets.html (09.07.2024)

Knappe, F.; Reinhardt, J.; Kauertz, B.; Oetjen-Dehne, R.; Buschow, N.; Ritthoff, M.; Wilts, H.; Lehmann, M. (2021): Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes –

Abschlussbericht, Texte | 92/2021, Juni 2021, Umweltbundesamt (Hg.). <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/technische-potenzialanalyse-zur-steigerung-des> (11.09.2025)

Koalitionsvertrag (KoaV) der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), von Bündnis 90 / Die Grünen & der Freien Demokraten (FDP) (Hrsg.) 2021, Mehr Fortschritt Wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021-2025.

Kraftfahrtbundesamt (2024): Statistik PKW. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Fahrzeugarten/fahrzeugarten_node.html (29.04.2025)

Sander, K.; Rödiger, L.; Wagner, L.; Jepsen, D.; Holzhauer, R.; Baberg, L.; Spiecker, Th.; Zwisele, B.; Winterstein, M. (2020): Evaluierung und Fortschreibung der Methodik zur Ermittlung der Altfahrzeugverwertungsquoten durch Schredderversuche unter der EG-Altfahrzeugrichtlinie 2000/53/EG - Abschlussbericht, Texte | 15/2020, Januar 2020, Umweltbundesamt (Hg.). <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/altfahrzeuge-monitoring> (11.09.2025)

Statista (2024): Anzahl der Elektroautos in Deutschland von 2006 bis April 2024. Statista. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/altfahrzeuge-monitoring> (19.06.2024)

Thomé-Kozmiensky, K.; Goldmann, D. (2015): Recycling und Rohstoffe – Band 8, Perspektiven der zunehmenden Fahrzeugelektronik für das Altfahrzeugrecycling.

Umweltbundesamt (UBA) (2024): Verbleib von endgültig außer Betrieb gesetzten Fahrzeugen. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altfahrzeugverwertung-fahrzeugverbleib#verbleib-von-endgultig-ausser-betrieb-gesetzten-fahrzeugen> (10.06.2024)

Zimmermann, T.; Sander, K.; Memelink, R.; Knode, M.; Freier, M.; Porsch, L.; Schomerus, T.; Wilkes, S.; Flormann, P. (2022): Auswirkungen illegaler Altfahrzeugverwertung - Ermittlung der ökologischen, volkswirtschaftlichen und betriebswirtschaftlichen Auswirkungen der nicht anerkannten Demontage von Altfahrzeugen und der illegalen Altfahrzeugverbringung sowie Ableitung von Maßnahmen zur Adressierung möglicher Auswirkungen, Texte | 129/2022, November 2022, Umweltbundesamts (Hg.). <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/auswirkungen-illegaler-altfahrzeugverwertung> (11.09.2025)

A.3 Steckbrief „Lithium-Ionen-Batterien: Stationäre Anwendungen“

A.3.1 Status quo

Als ein Bereich mit hohem zukünftigem Potenzial und einer dynamischen technologischen Entwicklung, die außerdem eine hohe Relevanz für verschiedene strategische Rohstoffe aufweist, wurden stationäre Batteriespeicher als prioritäres Handlungsfeld in diesem Projekt ausgewählt. Da ein relevanter Marktanteil von alternativen Technologien für stat. Batteriespeicher im betrachteten Zeithorizont nicht sicher vorhersehbar ist (Stephan et al. 2023), fokussiert sich die Betrachtung auf Lithium-Ionen-Batterien.

Stationäre Stromspeicher werden in verschiedenen Anwendungsszenarien eingesetzt. Ein Feld mit großer Sichtbarkeit und dynamischer Entwicklung ist der private oder gewerbliche Einsatz in Verbindung mit der Erzeugung erneuerbarer Energien (meist mit Photovoltaik (PV)-Anlagen). Hier werden Batteriespeicher (in der Regel Lithium-Ionen-Batterien (LIB)) genutzt, um Zeiträume mit geringer bzw. ohne Erzeugung von Strom aus regenerativen Quellen (wie beispielsweise im Fall von PV nachts) auszugleichen. Aber auch für andere Zwecke können Batteriespeicher zum Einsatz kommen. Hierbei geht es beispielsweise um die Sicherstellung der Stromversorgung von kritischen Infrastrukturen wie Krankenhäusern, die schnelle Bereitstellung von Lastleistung für Elektrofahrzeuge sowie die Lastspitzkappung, also die strategische Reduzierung des Stromverbrauchs zu Spitzenlastzeiten in Industrie und Gewerbe. Auf Netzebene werden mit einem immer größer werdenden Anteil an Erneuerbaren Energien Speicher mit kurzfristig abrufbarer Kapazität zur Netzstabilisierung bei Schwankungen in der Einspeisung sowie langfristig abrufbare Energiespeicher zum Ausgleich saisonaler Unterschiede benötigt.

Im Gegensatz zum Anwendungsfeld der Elektromobilität ist in der stationären Anwendung von LIB demnach eine wesentlich größere Vielfalt relevanter Speicherklassen zu finden. Diese können von weniger als 10 kWh für private Energiespeicher bis zu Großspeicheranlagen von mehreren GWh reichen (Thielmann et al. 2015). Dafür sind die Anforderungen an Größe und Gewicht und damit Energiedichte oft nicht ganz so hoch wie in der Elektromobilität (hier ist essentiell, dass die Batteriespeicher möglichst leicht sind und ein möglichst kleines Volumen aufweisen). Aus diesem Grund wird immer wieder die Second-Life-Anwendung von Traktionsbatterien aus Elektrofahrzeugen als stationäre Energiespeicher vorgeschlagen (s. Abschnitt A.3.3).

Zum September 2025 waren in Deutschland stationäre Energiespeicher mit einer Gesamtkapazität von 22 GWh im Marktstammdatenregister der Bundesnetzagentur registriert. Davon fällt mit ca. 18 GWh der größte Teil auf als Heimspeicher klassifizierte Anlagen (unter 30 kWh). Im Vergleich zum Vorjahr ist die Gesamtkapazität damit um etwa ein Drittel gestiegen. Von den installierten Speichern sind 98 % Li-Ionen-Batterien, der Anteil an alternativen Technologien ist hier verschwindend gering (Figgner et al. 2025, Figgner et al. 2023).

A.3.2 Rohstoffe in Lithium-Ionen-Batterien

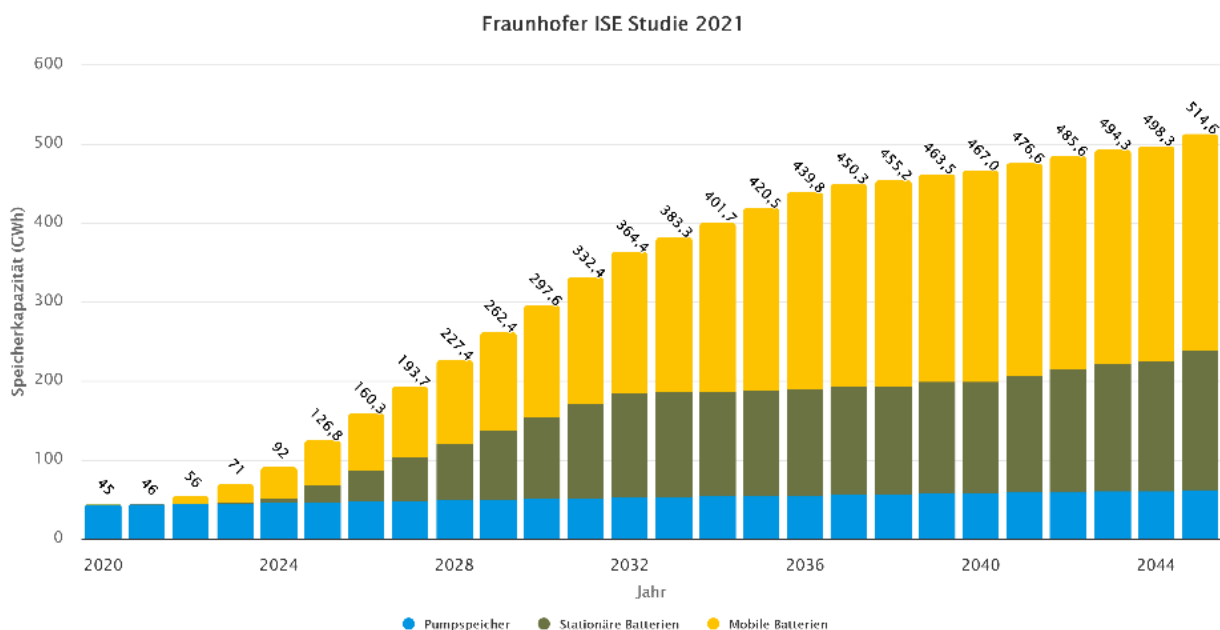
Lithium-Ionen-Batterien unterscheiden sich von der Zusammensetzung her hauptsächlich im Kathodenmaterial. Gängige Kathodenchemien beruhen auf Lithium-Mangan-Nickel-Kobaltoxid (NMC), Lithiumeisenphosphat (LFP), Lithium-Manganoxid (LMO) oder Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid (NCA) als Aktivmaterial. Sie alle enthalten die kritischen Rohstoffe Lithium, Kupfer und Graphit. Zusätzlich kommen in Modulen, Gehäuse etc. Aluminium, Stahl und Kunststoffe zum Einsatz (Argonne National Laboratory 2023). Je nach Zellchemie werden zusätzlich Nickel, Kobalt und Mangan eingesetzt. Die Wertschöpfungskette vieler in LIB verbauten

Materialien ist jeweils stark abhängig von einigen wenigen Ländern und damit als kritisch einzu-
stufen (Buchert et al. 2023). Für die Versorgungssicherheit innerhalb Deutschlands und der Eu-
ropäischen Union sowie zur Sicherung des verantwortungsvollen Umgangs mit endlichen Roh-
stoffen sind deshalb die Rückgewinnung und Wiederverwertung dieser ein essenzieller Bau-
stein. Pro kWh Leistung enthält eine durchschnittliche LIB ungefähr 100 g Li, 900 g Graphit und
1 kg Kupfer. Hinzu kommen für eine NMC111-Batterie⁸ jeweils ca. 300 g Nickel, Kobalt und
Mangan (Argonne National Laboratory 2023). Da die Elektromobilität momentan den größten
Absatzmarkt für LIB darstellt, wurden die Zellen in der Vergangenheit meist für diesen entwi-
ckelt und zusätzlich in stationären Speichern eingesetzt, weshalb sich die Zusammensetzung der
Zellchemien ähnlich verhält wie bei den Traktionsbatterien (Tepe et al. 2021). Während zum jet-
zigen Zeitpunkt NMC-Zellen, insbesondere in Europa, den größten Marktanteil ausmachen, geht
der Trend aktuell in Richtung nickel- und kobaltarmen bzw. -freien Chemien wie LFP. Aufgrund
der unterschiedlichen Anforderungen des stationären im Gegensatz zum mobilen Einsatz ist je-
doch auch zu erwarten, dass mittelfristig mehr spezielle Zellauslegungsvarianten für stationäre
Speicher existieren werden (Tepe et al. 2021).

A.3.3 Zukünftiges Sekundärrohstoffpotenzial

Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland wird der Bedarf für stationäre Ener-
giespeicher weiter ansteigen. In einer Studie des Fraunhofer ISE (Brandes et al. 2021) wurden
verschiedene Szenarien zum Ausbau der Speicherkapazität in Deutschland untersucht. Die Er-
gebnisse des Szenarios „Referenz“ sind in Abbildung A 11 dargestellt. Hier wird davon ausgegan-
gen, dass im Jahr 2030 ca. 200 GWh an Batteriespeicherkapazität in Deutschland benötigt wer-
den. Unter der Bedingung, dass das bidirektionale Laden von Elektrofahrzeugen möglich wird,
kann gut die Hälfte davon aus mobilen Batterien gedeckt werden.

**Abbildung A 11: In Deutschland voraussichtlich benötigte Speicherkapazität für verschie-
dene Speicherarten**



Quelle: (Brandes et al. 2021)

⁸ NMC111: NMC-Batterie mit Kathodenzusammensetzung $\text{LiNi}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{O}_2$

Der Kapazitätsbedarf für LIB in stationären Anwendungen ist damit erheblich, kommt mittelfristig jedoch nicht an den der Elektromobilität heran (Brandes et al. 2021, Buchert et al. 2023). Für den entsprechenden Rohstoffbedarf im stationären Bereich ist unter anderem die Frage, ob die Second-Life-Nutzung von Traktionsbatterien als stationäre Speicher an Relevanz zunimmt. Im Moment scheint sich dieses Geschäftskonzept jedoch nicht merklich durchzusetzen (Figgenger et al. 2023).

Zur Deckung des Bedarfs an Speichern auf Netzebene gibt es momentan vermehrt Vorhaben für den Einbau von Batteriespeichern an stillgelegten Atomkraftwerk-Standorten (ZFK 2023; NDR 2024). Dies ist unter anderem aus Ressourcensicht eine sinnvolle Vorgehensweise, da die Infrastruktur in großen Teilen übernommen werden kann (Wille-Hausmann et al. 2022).

Zur vollen Ausschöpfung des Sekundärrohstoffpotenzials ist hauptsächlich die Bereitstellung von hochwertigen Sekundärrohstoffen innerhalb der EU eine offene Problemstellung. Die neue EU-Batterieverordnung schreibt für LIB eine verbindliche Recyclingeffizienz bezogen auf das Gesamtgewicht sowie stoffspezifische, mehrstufig steigende Rückgewinnungs- bzw. Recyclingquoten für Lithium, Kobalt und Nickel vor (BattVO 2023). Bis 2032 müssen 70 Gew.-% der gesamten Batterie recycelt und 80 % des enthaltenen Lithiums sowie 95 % des enthaltenen Ni, Co und Cu zurückgewonnen werden. Für neue Batterien wird bis 2036 ein Recyclinganteil von 26 % Co, 12 % Li und 15 % Ni gefordert. Die Rezyklate können auch aus Batterien anderer Anwendungsbereiche gewonnen werden.

A.3.4 Handlungsbedarf für eine optimierte Urban Mining Strategie

Da sowohl die Elektromobilität als auch die Speicherung von Strom aus erneuerbaren Energien relativ junge Felder sind, ist der Stoffstrom der Batterien, die an ihrem Lebensende dem Recycling zugeführt werden, bisher überschaubar. Aus diesem Grund wird das Recycling und die Verwendung von rückgewonnenen Materialien aus LIB in Deutschland bisher eher in kleinem Maßstab betrieben. Es gibt hier etablierte Verfahren zur Rückgewinnung der externen Komponenten (Gehäuse, Kabel, etc.) und von Kupfer-, Nickel- und Kobaltverbindungen aus den Zellen. Je nach Verfahren wird auch das Aluminium aus den Zellen zurückgewonnen. Weitere Verfahren, die zusätzlich auch Lithiumverbindungen zurückgewinnen, stehen kurz vor der industriellen Realisierung (Althoff et al. 2023). Ein aktuelles Problem des Batterierecyclings in Europa ist, dass die in der ersten Recyclingstufe anfallende Schwarzmasse häufig nicht in Deutschland bzw. der EU verbleibt. Während hierzulande bislang kaum Kapazitäten für die Weiterverarbeitung vorhanden sind, gibt es in Asien, insbesondere in China, Überkapazitäten. Dies führt dazu, dass ein großer Teil der in der EU produzierten Schwarzmasse nach Asien verkauft wird und die darin enthaltenen Rohstoffe hier nicht wiederverwendet werden können. Um dieses Problem zu entschärfen, hat die Europäische Kommission im März 2025 Schwarzmasse als gefährlichen Abfall eingestuft und den Export in Nicht-OECD-Länder untersagt (EU KOM 2025). Damit dieser Beschluss tatsächlich zur Förderung der Kreislaufwirtschaft für Batteriematerialien in der EU beiträgt, ist es jedoch unerlässlich, parallel dazu auch entsprechende Weiterverarbeitungsanlagen innerhalb der EU aufzubauen. Ein weiterer zu beobachtender Punkt ist die Tatsache, dass aus NMC- und NCA-Zellen hauptsächlich Nickel bzw. Kobalt als werthaltige Materialien rückgewonnen werden. Die günstigeren LFP-Zellen beispielsweise enthalten bis auf Lithium und Kupfer kaum werthaltige Materialien, sodass eine Rückgewinnung von Rohstoffen aus ihnen weniger wirtschaftlich ist und somit entsprechende Verfahren in Europa bislang praktisch nicht etabliert sind.

Da in Zukunft mit einem starken Anstieg der Nutzung von Lithium-Ionen-Batterien als stationäre Speicher zu rechnen ist, ist es wichtig, diese frühzeitig in eine Urban Mining Strategie einzubinden. Der Handlungsbedarf ist dabei eng mit den Lithium-Ionen-Batterien aus mobilen

Anwendungen verknüpft. Zum einen führt die mögliche Second-Life-Nutzung von mobilen Batterien als stationäre Speicher zu einer verspäteten Rückführung von Fahrzeugbatterien in den Kreislauf. Dies ist vor allem unter dem Aspekt der Sammelraten zu berücksichtigen. Es muss für diesen Fall sichergestellt werden, dass eine nutzungsübergreifende Sammelstrategie existiert. Dies ist auch unter dem Aspekt der ähnlichen Zusammensetzung und damit Recyclingstrategien sinnvoll. Eine große strategische Lücke stellt momentan das Recycling von Batteriematerialien an sich dar. Aufgrund des fehlenden wirtschaftlichen Anreizes werden selbst als kritisch eingestufte Materialien oft nicht zurückgewonnen und rezykliert. Die Kreislaufführung von Batteriematerialien muss demnach gefördert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass besonders die enthaltenen kritischen Rohstoffe nicht in Form von Schwarzsand exportiert, sondern innerhalb der EU weiterverarbeitet und wieder verwendet werden.

A.3.5 Quellenverzeichnis Steckbrief „Lithium-Ionen-Batterien“

Althoff, E.; Bichlmeier, T.; Bierhaus, L.; Dietzsch, N.; Dambeck, H.; Kemmler, A.; Krampe, L.; Lübbers, M.; Schulz, L.; Phuong Vu, M.; Wendring, P.; Wunsch, A.; Wunsch, M.; Ziegenhagen, I.; Betz, J.; Buchert, M.; Schön-Blume, N.; Eckert, D.; Göckeler, K.; Görz, W.; Heutmanek, U.; Merz, C.; Steinbach, I. (2023): Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045, Stiftung Klimaneutralität (Hg.). https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2023/11/Stiftung_Klimaneutralitaet_2023-Resiliente-Lieferketten_Langfassung-2.pdf (21.07.2025)

Argonne National Laboratory (Hg.) (2023): BatPaC – A Spreadsheet Tool to Design a Lithium Ion Battery and Estimate Its Production Cost. <https://www.anl.gov/partnerships/batpac-battery-manufacturing-cost-estimation> (18.09.2025)

BattVO (2023): Verordnung (EU) 2023/1542 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG, ABl. L 191 vom 28.7.2023, S. 1–191. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj> (15.08.2025)

Brandes, J.; Haun, M.; Wrede, D.; Jürgens, P.; Kost, Chr.; Henning, H.-M. (2021): Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen – Update November 2021: Klimaneutralität 2045. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) (Hg.). <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem-Update-Klimaneutralitaet-2045.pdf> (12.09.2025)

Buchert, M.; Göckeler, K.; Merz, C.; Schön-Blume, N.; Steinbach, I.; Görz, W.; Eckert, D.; Betz, J. (2023): Bedarf strategischer Rohstoffe für den Pkw- und Lkw-Sektor in Deutschland bis 2040, Bericht im Rahmen des Projekts "Analysen und Bewertungen der Klimaschutzwirkung von Instrumenten und Maßnahmen zur Treibhausgasminimierung im Verkehr, Entwicklung von Gestaltungsoptionen" ELMO4010. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (Hg.), 30.11.2023. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Rohstoffbedarf-PKW-LKW-Szenarien-D.pdf> (08.09.2025)

EU KOM (2025): Delegierter Beschluss (EU) 2025/934 der Kommission vom 5. März 2025 zur Änderung der Entscheidung 2000/532/EG im Hinblick auf eine Aktualisierung des Abfallverzeichnisses bezüglich batteriebezogener Abfälle. 20.05.2025. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202500934 (18.09.2025)

Figgner, J.; Hecht, C.; Haberschusz, D.; Bors, J.; Spreuer, K. G.; Kairies, K.-P.; Sauer, D. U. (2023): The development of battery storage systems in Germany: a market review. DOI: 10.48550/arXiv.220306762. (23.09.2025)

Figgner, J.; Brucksch, J.; Koltermann, L.; Dang, D.; Hecht, C.; von Ouverkerk, J.; Junker, M.; Sauer, D.U. (2025): Battery Charts. RWTH Aachen (Hg.). <https://battery-charts.de/de/battery-charts-de/> (23.09.2025)

NDR (2024): Früherer AKW-Standort Würgassen wird zu Batteriespeicher, Artikel vom 19.03.2024. https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/braunschweig_harz_goettingen/Fruererer-AKW-Standort-Wuergassen-wird-zu-Batteriespeicher,wuergassen158.html (12.09.2025)

Stephan, A.; Hettesheimer, T.; Neef, C.; Schmaltz, T.; Link, S.; Stephan, M.; Heizmann, J. L.; Thielmann, A. (2023): Alternative Battery Technologies Roadmap 2030+, September 2023, Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung ISI (Hg.). <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2023/abt-roadmap.pdf> (12.09.2025)

Tepe, B.; Collath, N.; Hesse, H.; Rosenthal, M.; Windelen, U. (2021): Stationäre Batteriespeicher in Deutschland: Aktuelle Entwicklungen und Trends in 2021. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen (71,3). <https://media-tum.ub.tum.de/doc/1601843/1601843.pdf> (19.09.2025)

Thielmann, A.; Sauer, A.; Schnell, M.; Isenmann, R.; Wietschel, M. (2015): Technologie Roadmap stationäre Energiespeicher 2030, Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung ISI (Hg.). <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/TRM-SES.pdf> (12.09.2025)

Wille-Haussmann, B.; Biener, W.; Brandes, J.; Fluri, V.; Wittwer, Chr. (2022): BAT4CPP - Batteriespeicher an ehemaligen Kraftwerksstandorten - Positionspapier. Fraunhofer ISE (Hg.). <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/2b92f281-618b-48f8-a82b-1663602cfd55> (12.09.2025)

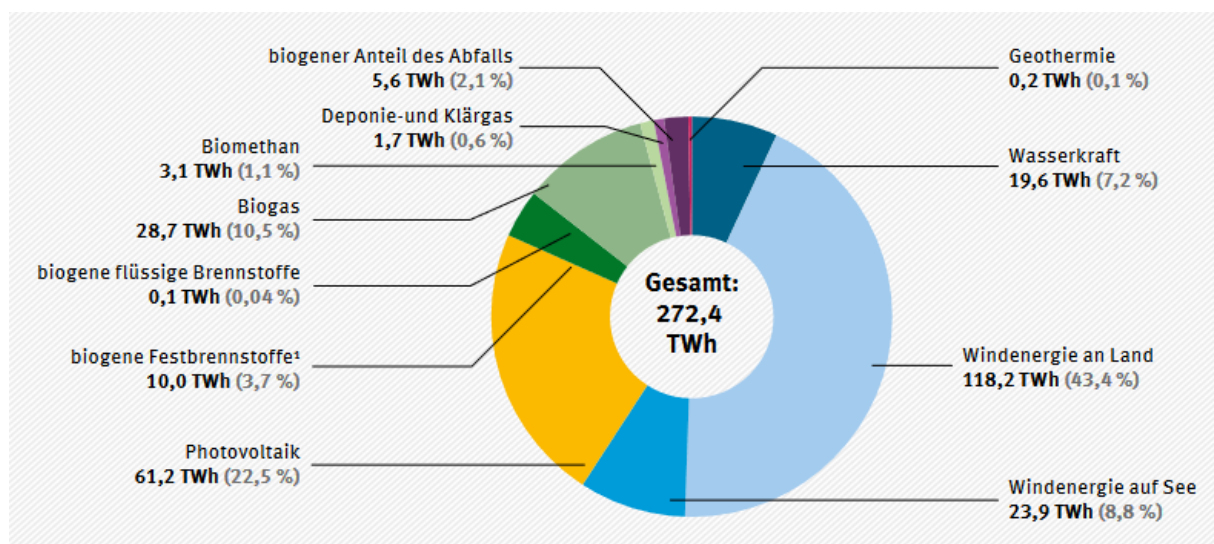
Zeitung für kommunale Wirtschaft (ZfK) (2023): Größter Batteriespeicher der EU könnte in Brokdorf entstehen, Artikel vom 13.12.2023. <https://www.zfk.de/energie/strom/groesster-batteriespeicher-der-eu-koennte-in-brokdorf-entstehen> (12.09.2025)

A.4 Steckbrief „Windenergieanlagen“

A.4.1 Status quo

Die Stromerzeugung in Deutschland stammte 2023 zu über 50 % aus erneuerbaren Energien. Im Rahmen der Energiewende soll dieser Anteil zukünftig weiter gesteigert werden. Wie in Abbildung A 12 zu erkennen, setzt sich die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien momentan wiederum etwa zur Hälfte aus Windkraft zusammen. Windenergieanlagen (WEA) stellen damit aktuell sowie zukünftig aufgrund der hohen Menge an existierenden Strukturen und des großen Wachstumspotenzials in Kombination mit der Relevanz für den Einsatz Seltener Erden als kritische Rohstoffe ein prioritäres Handlungsfeld für die Urban-Mining-Strategie für Deutschland dar.

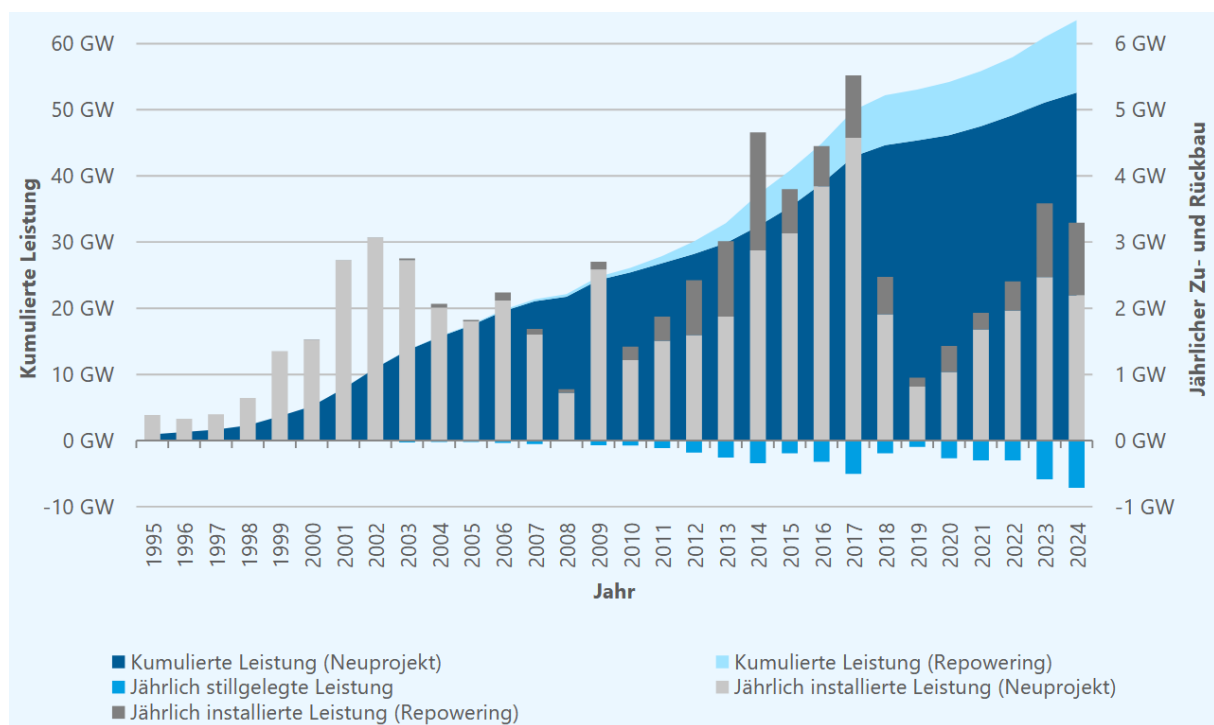
Abbildung A 12: Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Jahr 2023



Quelle: (Umweltbundesamt 2024)

Abbildung A 13 zeigt den Ausbau von Windenergie an Land in Deutschland in den letzten 20 Jahren. Zum Ende des Jahres 2024 waren ca. 63,6 GW kumulierte Leistung verteilt auf rund 28.717 WEA registriert (Deutsche WindGuard GmbH 2025). Hinzu kommen 9,2 GW aus 1639 Offshore-Anlagen (Bundesverband WindEnergie 2025). Zusätzlich ist jeweils die jährlich rückgebaute Leistung eingetragen. Aufgrund der recht langen Lebensdauer von WEA von 20-30 Jahren (EnBW Energie Baden-Württemberg AG 2024) mussten bisher sehr wenige Anlagen rückgebaut und dem Recycling zugeführt werden. Aus diesem Grund sind die Strategien hier oft noch nicht ausgereift (vgl. auch Abschnitt 1.2 und 1.3). Die dritte aufgetragene Größe ist die mittels Repowering zugebaute Leistung. Hier wird eine bereits bestehende, veraltete WEA unmittelbar durch eine neue ersetzt. Dies kann standortgebunden oder standortunabhängig geschehen. Aufgrund des bisher moderaten Rückbaus von WEA wird noch lange nicht das volle Potenzial ausgeschöpft. Von Vorteil ist hier, dass in Deutschland und Europa eine starke Fertigungsindustrie existiert, die die EU-Ziele von 85 Prozent europäischem Fertigungsanteil prinzipiell decken kann (Althoff et al. 2023).

Abbildung A 13: Jährliche Entwicklung der Windenergieleistung in Deutschland



Quelle: (Deutsche WindGuard GmbH 2025)

A.4.2 Rohstoffe in Windenergieanlagen

Beim Aufbau von Windenergieanlagen muss grundsätzlich unterschieden werden zwischen Onshore- und Offshore-Anlagen in industriellem Maßstab sowie Kleinwindenergieanlagen für den Heimbetrieb. Die in Deutschland installierten Kleinwindenergieanlagen machen jedoch bisher einen sehr kleinen Anteil mit maximal 2 GWh Leistung aus (Solarenergie.de 2023) und werden deshalb im Gesamtrohstoffverbrauch nicht weiter betrachtet.

Abbildung A 14 zeigt die durchschnittliche Zusammensetzung einer Onshore-WEA nach Gewicht. Den größten Anteil macht hierbei der Turm aus, der meist aus Stahlbeton gefertigt wird. Hier findet sich der größte Unterschied zu Offshore-Anlagen, deren Turm aus Stahl besteht, und deren Anteil an Beton deshalb wesentlich kleiner ist (Kaiser & Seitz 2014). Im Vergleich zum Bausektor allgemein macht die Windindustrie jedoch eher einen kleinen Teil des Betonverbrauchs in Deutschland aus (in Falkenberg et al. (2019) wurde für alle 2018 neu installierten Anlagen ein Betonverbrauch von ca. 1.8 Mio. t abgeschätzt, während die Gesamtproduktion von Transportbeton 2017 ca. 52 Mio. t betrug).

Den nächstgrößeren Anteil einer WEA machen die Rotorblätter aus. Diese werden i. A. aus modernen Faserverbundstoffen gefertigt. In der Regel kommen dabei glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) sowie in deutlich geringerem Maße kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) zum Einsatz. (Bundesverband WindEnergie 2023)

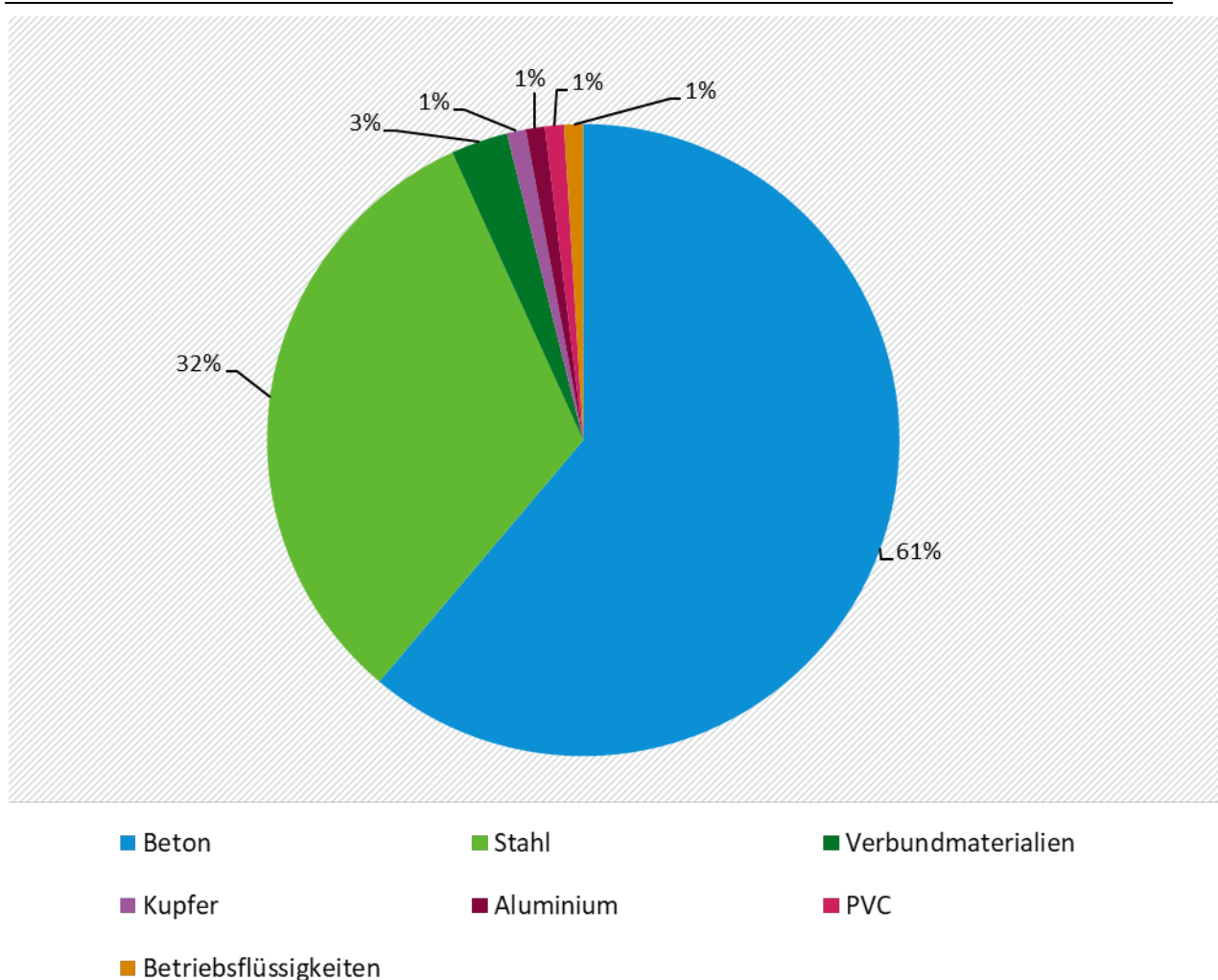
Die zentrale Einheit der WEA bilden Nabe und Gondel, die Getriebe und Maschinenhaus enthält. Hier finden sich hauptsächlich Kupfer in Leitungen, Generator, Umrichter etc., sowie Aluminium und Polyvinylchlorid (PVC) für Gehäuse, elektrische Isolation und Rohre.

Für die Stromerzeugung werden verschiedene Technologien verwendet: 80 Prozent der Offshore-Anlagen und 20 Prozent der Onshore-Anlagen verwenden Synchrongeneratoren mit

Permanentmagneten (ohne Getriebe). Diese zeichnen sich durch besonders große Neodym-Bor-Eisen-Magneten aus, die neben Eisen und Bor die beiden Leichten Seltenen Erden Neodym und Praseodym (rund 24 Gew%) sowie die beiden Schweren Seltenen Erden Dysprosium und Terbium (rund 6 %) enthalten (Buchert et al. 2023). Die Produktion und Prozessierung von Seltenen Erden zu Permanentmagneten weist über die Wertschöpfungskette hinweg eine sehr große Abhängigkeit von China auf. Deshalb sind unter dem Critical Raw Materials Act (CRMA) der EU Seltene Erden als kritische Rohstoffe eingestuft (CRMA 2024).

Eine Alternative, die weniger Seltene Erden benötigt, stellt der Einsatz eines Getriebes in den Synchrongenerator mit Permanentmagnet dar. In Onshore-Anlagen werden außerdem Induktionsgeneratoren mit Getriebe und elektrisch erregte Synchrongeneratoren ohne Getriebe eingesetzt, die jeweils einen wesentlich geringeren Anteil an Seltenen Erden benötigen. Insbesondere in Offshore-Anlagen, die unter wesentlich schwierigeren Bedingungen aufgebaut werden als an Land, überwiegen hier jedoch noch die technologischen Nachteile, wie beispielsweise das erhöhte Gondelgewicht. Insgesamt macht der Ausbau der Windenergie, insbesondere im Offshore-Bereich, einen großen Teil des Bedarfs an Permanentmagneten mit Seltenen Erden in Deutschland aus. (Althoff et al. 2023)

Abbildung A 14: Durchschnittliche Zusammensetzung einer Onshore-Windenergieanlage nach Gewicht

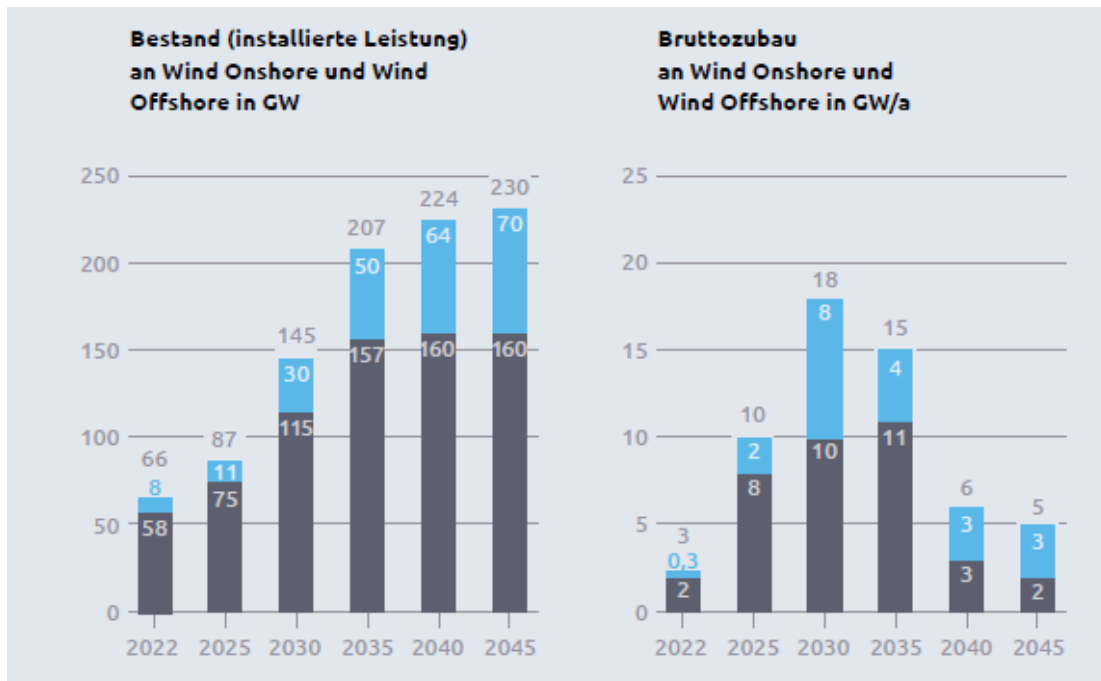


Die Werte sind als ungefähre Angaben bzw. als ein Beispiel zu verstehen. Die Angaben aus der Quelle lauten Beton 60 – 65 %, Stahl 30 – 35 %, Verbundmaterialien 2 – 3 %, Kupfer <1 %, Aluminium <1 %, PVC <1 %, Betriebsflüssigkeiten <1 %
Quelle: eigene Darstellung von Daten aus (Bundesverband WindEnergie 2023)

A.4.3 Zukünftiges Sekundärrohstoffpotenzial

Laut dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) sollen bis Ende 2030 in Deutschland allein an Land 115 GW Windenergie installiert sein. Dies erfordert bei einem aktuellen Ausbaustand von ca. 60 GW (1. Halbjahr 2024) einen jährlichen Zubau von ca. 9 GW. Hinzu kommt der Ersatz für Anlagen mit insgesamt ca. 17 GW Leistung, von denen zu erwarten ist, dass sie vor 2030 ihr Lebensende erreichen werden. (Umweltbundesamt 2023) Das **Ausbauziel für Windenergie auf See** liegt 2030 bei 30 GW. Darüber hinaus sollen bis Ende 2040 160 GW an Land sowie bis 2045 70 GW auf See installiert werden.

Abbildung A 15: Bestand und Zubauproggnose von Windenergieanlagen in Deutschland



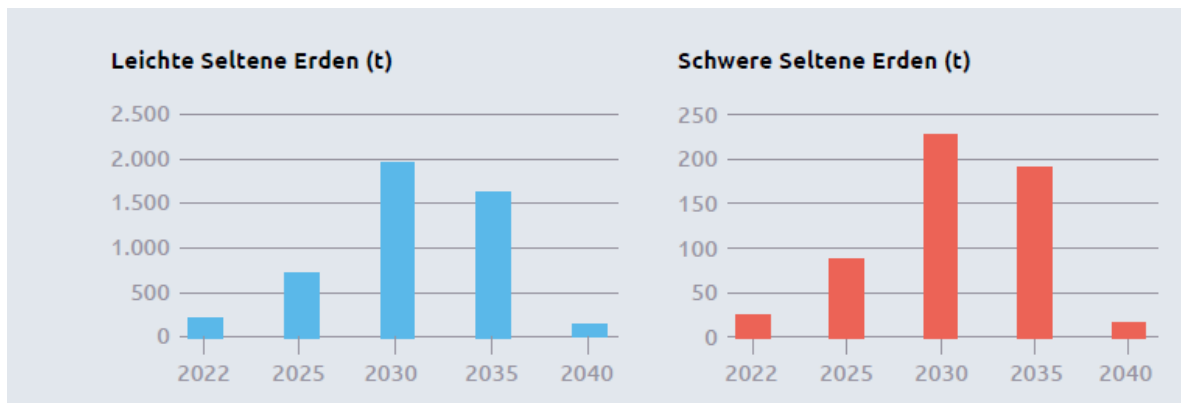
Quelle: (Althoff et al. 2023)

Abbildung A 15 stellt die in (Althoff et al. 2023) berechneten dafür benötigten Ausbaumengen graphisch dar. Hier wird deutlich, dass insbesondere zum Erreichen der Ziele bis 2035 der Ausbau stark hochgefahren werden muss. Nach 2035 ist für die Erreichung der Ziele ein weniger starker Ausbau nötig. Wie in Abbildung A 13 zu erkennen ist, wird es im gleichen Zeitraum erste relevante Rückläufe von älteren Anlagen geben. Dies kann den Bedarf für neu gebaute Anlagen nicht decken. Dennoch ist anzustreben, dass die Verwertung der in den alten Anlagen verbauten Rohstoffe möglichst schnell optimiert wird, um einen möglichst ressourcenschonenden Ausbau der Windkraft in Deutschland zu ermöglichen.

Aus dem Bedarf an neuen WEA ergibt sich der in Abbildung A 16 dargestellte Bedarf an Seltenen Erden. Dieser ist, wie bereits in Abschnitt 1.2 diskutiert, hauptsächlich bestimmt durch die Offshore-Anlagen, für die bis zum jetzigen Zeitpunkt keine technologisch sinnvolle Alternative zu Generatoren mit Getriebe vorliegt. Der RDWind e.V. prognostiziert zum Ende 2032 einen jährlichen Rücklauf von ca. 100 t Permanentmagneten (entspricht ca. 24 t Leichte Seltene Erden und 6 t Schwere Seltene Erden) aus WEA. 2038 ist hiernach der größte Rücklauf von etwa 700 t Magneten (170 t Leichte Seltene Erden und 42 t Schwere Seltene Erden) zu erwarten. (RDWind e.V. 2023) Insbesondere nach dem Jahr 2035, wenn der Ausbaubedarf geringer wird, könnte demnach eine signifikante Menge der benötigten Seltenen Erden aus dem Recycling von alten

Generatoren gedeckt werden. Hierzu sind jedoch eine weitere technologische Entwicklung und ein Aufbau von genügend Recyclingkapazitäten in Deutschland und Europa nötig.

Abbildung A 16: Durch den Zubau an Windenergieanlagen entstehender Bedarf an seltenen Erden in Deutschland



Quelle: (Althoff et al. 2023)

Ein weiterer Bereich, in dem zukünftig eine große Menge an Sekundärrohstoffen anfallen wird, sind die Rotorblätter. Bereits ab 2026 ist mit einem starken Anstieg der aus der Onshore-Windindustrie zu verwertenden GFK auf jährlich 15.000 t zu rechnen. Aufgrund der ausbaustarken Jahre 2014 bis 2017 (vgl. Abbildung A 13) sind ab 2034 Peaks im Rücklauf zu erwarten. Etwas verzögert steigen voraussichtlich ab 2035 die Rückläufe aus dem Offshore-Bereich steil an. Ab 2030 werden auch vermehrt CFK zur Verwertung anfallen. (RDWind e.V. 2023)

Von technologischer Seite ist als weitere potenzielle Entwicklung in der Industrie für den Offshore-Bereich hauptsächlich das Konzept des schwimmenden Fundaments zu nennen (Williams & Zhao 2025). Hier werden Offshore-Anlagen, statt auf Fundamente auf dem Meeresboden, auf schwimmenden Plattformen gebaut. In Deutschland gibt es in diese Richtung aufgrund der geringen Tiefe der Nordsee jedoch verhältnismäßig wenige Bestrebungen. Der Rohstoffbedarf bzw. das Potenzial für Sekundärrohstoffnutzung wird hiervon außerdem kaum beeinflusst.

A.4.4 Handlungsbedarf für eine optimierte Urban Mining Strategie

Die größte Herausforderung für den Sekundärrohstoffeinsatz und die Verwertung von Rohstoffen aus Windenergieanlagen ist die Tatsache, dass erst in der nahen Zukunft mit relevanten Mengenströmen zu rechnen ist. Bis zum jetzigen Zeitpunkt wurden so wenige Anlagen zurückgebaut, dass bisher keine allgemeingültigen Standards geschaffen wurden (Bundesverband Wind-Energie 2023). Da ein Teil der Hersteller von existierenden WEA an deren Lebensende bereits nicht mehr am Markt ist, sind detaillierte Informationen über deren Materialzusammensetzung ohne ausreichende Dokumentation schwer zu erhalten.

Am Lebensende einer WEA werden zunächst Gondel und Rotorblätter demontiert. Im nächsten Schritt werden Turm und Fundament abgebrochen. Der anfallende Beton wird vor Ort in Betonschutt zerkleinert und entweder im Wege- und Fundamentbau eingesetzt oder in Recyclingbeton verarbeitet.

Ein Teil der weiteren Komponenten kann als Ersatzteile weiterverkauft werden. Da es insbesondere ab der zweiten Lebensdekade einer WEA schwierig sein kann, Originalersatzteile zu bekommen, gibt es Firmen, die auf den Handel mit Gebrauchtteilen spezialisiert sind.

Falls sie nicht im Ganzen weiterverwendet werden können, werden im nächsten Schritt die Rotorblätter vor Ort zersägt, um den Abtransport zu erleichtern. Aufgrund des hohen Anteils an Verbundwerkstoffen stellen die Blätter eine große Herausforderung ans Recycling dar. Sie werden zunächst weiter zerkleinert, danach wird der kleine Metallanteil herausortiert. Das übrigbleibende Material besteht meist ungefähr zur Hälfte aus Fasern und zur anderen Hälfte aus Harzen. (Bundesverband WindEnergie 2023) Im Falle von GFK werden die Harzanteile thermisch verwertet. Die dabei übrigbleibende Glasasche kommt in der Zementindustrie als Silikatsubstitut zum Einsatz. Für CFK ist die Verwertung noch problematischer, da Kohlenstofffasern Strom leiten und so bei den oft eingesetzten elektrostatischen Filtern der Müllverbrennungsanlagen zu Defekten führen können. Prinzipiell kann hier durch Pyrolyse die Kunststoffmatrix entfernt und die Kohlenstofffasern zurückgewonnen werden. Aufgrund von Rußablagerungen sind die so zurückgewonnenen Fasern jedoch qualitativ nicht mit neuwertigen vergleichbar. In einem anderen Verfahren wird mittels Solvolyse die Kunststoffmatrix mit Hilfe eines Lösungsmittels in die Monomere (bzw. Oligomere) zerlegt. Die Carbonfasern bleiben übrig und können gereinigt und wiederverwendet werden (RWTH Aachen 2023). Die Verfahren befinden sich jedoch alle noch in der Entwicklung und werden nicht in größerem Maßstab durchgeführt.

Die abgebaute Gondel wird, falls sie nicht für die Wiederverwendung im Ganzen bestimmt ist, meist ebenfalls für den Abtransport vor Ort zerkleinert. Hier werden zunächst einzelne, zur Wiederverwendung geeignete Teile demontiert. Im zweiten Schritt erfolgt die Zerkleinerung zur stofflichen Verwertung. Dies geschieht zum Teil direkt stofflich getrennt, zum Teil wird die Gondel allerdings lediglich in Teile mit transportfähiger Größe ungeachtet deren Zusammensetzung zerlegt (Zotz et al. 2019). Die Gondelteile werden dann einer Abfallentsorgungsanlage zugeführt und zusammen mit weiterem Abfall geschreddert, sortiert und aufbereitet. Wie beispielsweise auch im Fahrzeugsektor ist hier hauptsächlich die schlechte Trennung der verschiedenen Materialien ein Hindernis für die Wiederverwertung.

Von Rohstoffseite ist besonders die Rückgewinnung und Wiederverwendung von Seltenen Erden in Permanentmagneten wichtig. Diese sind als kritische Rohstoffe eingestuft. Trotz ihres hohen Gehalts an Seltenen Erden werden Permanentmagnete momentan zum größten Teil aus Primärrohstoffen hergestellt. Im Fall von Elektromotoren aus Elektrofahrzeugen oder Industriemotoren werden die Magnete oft zusammen mit weiterem Elektroschrott entsorgt und nicht ausgebaut. In Windenergieanlagen ist der Ausbau prinzipiell einfacher (Otto et al. 2023), aufgrund der bisher kleinen Rücklaufzahlen sind die hier anfallenden Stoffströme jedoch noch zu klein für ein wirtschaftliches Recycling. In Europa werden gerade erste Kapazitäten zum Recycling von Permanentmagneten aufgebaut (siehe z. B. (Heraeus Remloy 2024)).

Ein weiteres Problem für die effiziente Kreislaufführung von WEA stellen die Faserverbundstoffe der Rotorblätter dar. Da Verbundstoffe weiterhin nur unter Qualitätseinbußen stofflich verwertet werden können und oft thermisch verwertet werden, stellen die Rotorblätter eine besonders große Herausforderung für einen zukünftig höheren Sekundärrohstoffeinsatz in WEA dar. Es existieren bereits verschiedene Forschungsvorhaben, die mit dem Ziel einer höherwertigen Verwertung Abhilfe schaffen sollen. Ansätze sind hier beispielsweise neue Pyrolysetechnologien, die das Recycling von Kohlenstofffasern wirtschaftlich ermöglichen (Wilken 2025) oder der Einsatz von neuen wiederauflösbaren Harzsystemen, um die Fasern effizient wiederzugewinnen (Ludwig 2025). Auf industriellem Maßstab ist allerdings noch keines der Verfahren ausgereift.

A.4.5 Quellenverzeichnis Steckbrief „Windenergieanlagen“

Althoff, E.; Bichlmeier, T.; Bierhaus, L.; Dietzsch, N.; Dambeck, H.; Kemmler, A.; Krampe, L.; Lübbers, M.; Schulz, L.; Phuong Vu, M.; Wendring, P.; Wunsch, A.; Wunsch, M.; Ziegenhagen, I.; Betz, J.; Buchert, M.; Schön-Blume, N.; Eckert, D.; Göckeler, K.; Görz, W.; Heutmanek, U.; Merz, C.; Steinbach, I. (2023): Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045, Stiftung Klimaneutralität (Hg.). https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2023/11/Stiftung_Klimaneutralitaet_2023-Resiliente-Lieferketten_Langfassung-2.pdf (21.07.2025)

Buchert, M.; Göckeler, K.; Merz, C.; Schön-Blume, N.; Steinbach, I.; Görz, W.; Eckert, D.; Betz, J. (2023): Bedarf strategischer Rohstoffe für den Pkw- und Lkw-Sektor in Deutschland bis 2040 - Bericht im Rahmen des Projekts "Analysen und Bewertungen der Klimaschutzwirkung von Instrumenten und Maßnahmen zur Treibhausgasminimierung im Verkehr, Entwicklung von Gestaltungsoptionen" ELMO4010. Öko-Institut e.V., Darmstadt. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Rohstoffbedarf-Pkw-Lkw-Szenarien-D.pdf> (23.07.2025)

Bundesverband WindEnergie (Hg.) (2023): Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen, Informationsblatt. https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/02-technik-und-netze/09-rueckbau/20240322_BWE-Informationspapier_Rueckbau_und_Recycling_von_Windenergieanlagen.pdf (23.08.2025)

Bundesverband WindEnergie (Hg.) (2025): Status des Offshore-Windenergieausbaus in Deutschland Jahr 2024. <https://www.windindustrie-in-deutschland.de/publikationen/aktuell/status-des-offshore-windenergieausbaus-in-deutschland-2024> (23.08.2025)

CRMA (2024): Verordnung (EU) 2024/1252 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. April 2024 zur Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen und zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 und (EU) 2019/1020, ABl. L, 2024 vom 3.5.2024. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=OJ:L_202401252 (25.08.2025)

Deutsche WindGuard GmbH (2025): Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland Jahr 2024. https://www.windguard.de/jahr-2024.html?file=files/cto_layout/img/unternehmen/windenergiestatistik/2024/Jahr/Status%20des%20Windenergieausbaus%20an%20Land_Jahr%202024.pdf (23.08.2025)

EnBW Energie Baden-Württemberg AG (2024) Wunderwerk Windkraftanlage: Interessante Fakten über einen der wichtigsten Bausteine der Energiewende, EnBW ECO*Journal. <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/windkraftanlagen.html#wie-lange-ist-die-durchschnittliche-lebensdauer-einer-windkraftanlage> (09.07.2025)

Falkenberg, H.; Krampe, L.; Lampert, J.; Lübbers, S.; Lühr, O.; Sandhövel, M.; Buchert, M.; Sutter, J. (2019): Rohstoffbedarf im Bereich der erneuerbaren Energien. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hg.). <https://d-eiti.de/wp-content/uploads/2020/02/Rohstoffbedarf-im-Bereich-der-erneuerbaren-Energien.Langfassung.pdf> (09.07.2025)

Heraeus Remloy (2024): Neues Aufarbeitsverfahren für Neodym-Eisen-Bor-Magnete. https://www.heraeus.com/de/landingspages/hrm/recycling_benefits/Recyclingrareearthmagnets.html (09.07.2025)

Kaiser, O. S.; Seitz, H. (2014): Kurzanalyse Nr. 9: Ressourceneffizienz von Windenergieanlagen. VDI Technologiezentrum GmbH. https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/1_Themen/h_Publikationen/Kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-VDI-ZRE-09-Ressourceneffizienz-Windenergieanlagen.pdf (09.07.2025)

Ludwig, N. (2025): ReusaBlade: Recyclingfähige Materialien für Rotorblätter und deren Wiederverwertung. <https://www.iwes.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/aktuelle-projekte/reusablade.html> (17.09.2025)

Otto, S.-J.; Meyer, S.; Helmes, S.; Schmelting, R.; Rohde LL.M., M.; Rubner, P.; Ziehe, M.; Kraus, H.; Spohn, D.; Faulstich, M.; Hüther, J.; Joachimsthaler, C.; Meyer, F.; Schnurer, H. (2023): Entwicklung eines Konzepts und

- Maßnahmen zur Sicherung einer guten Praxis bei Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen. Umweltbundesamt (Hg.), Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_48-2023_entwicklung_eines_konzepts_und_massnahmen_zur_sicherung_einer_guten_praxis_bei_rueckbau_und_recycling_von_windenergieanlagen.pdf (09.07.2025)
- RDWind e.V. (2023): Daten & Fakten: Prognosen zu potenziell anfallenden EoL-Mengen aus dem Rückbau von Windenergieanlagen, RDWind e.V. (Hg.). <https://www.rdrwind.de/daten-fakten/> (09.07.2025)
- RWTH Aachen (2023): CFK-Recycling. RWTH Aachen (Hg.). <https://www.rwth-innovation.de/de/rwth-technologien/detail/cfk-recycling> (29.07.2024)
- Solarenergie.de (2023): Kleinwindkraftanlagen im Überblick. Solarenergie.de (Hg.). <https://solarenergie.de/hintergrundwissen/stromerzeugung/windenergie/kleinwindkraftanlage> (09.07.2025)
- Umweltbundesamt (2023): Windenergie an Land. Umweltbundesamt (Hg.). <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/windenergie-an-land#flaeche>, (29.07.2024)
- Umweltbundesamt (Hg.) (2024): Erneuerbare Energien in Deutschland, Daten zur Entwicklung im Jahr 2023, März 2024. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/2024_uba_hg_erneuerbareenergien_dt.pdf (12.09.2025)
- Wilken, R. (2025): Projekt »Re SORT – Pyrolyse dickwandiger Faserverbundwerkstoffe als Schlüsselinnovation im Recyclingprozess für Rotorblätter von Windenergieanlagen«. <https://www.ifam.fraunhofer.de/de/magazin/projekt-re-sort-recycling-windkraftanlagen.html> (17.09.2025)
- Williams, R.; Zhao, F. (2025): Global Offshore Wind Report 2025. Global Wind Energy Council (Hg.). <https://www.gwec.net/reports/globaloffshorewindreport#Download> (12.09.2025)
- Zotz, F.; Kling, M.; Langner, F.; Hohrath, P.; Born, H.; Feil, A. (2019): Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen für einen ressourcensichernden Rückbau von Windenergieanlagen - Abschlussbericht. Umweltbundesamt (Hg.). TEXTE 48/2023, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019_10_09_texte_117-2019_uba_weacycle_mit_summary_and_abstract_170719_final_v4_pdfua_0.pdf (16.07.2025)

A.5 Steckbrief „Photovoltaikanlagen“

Ende 2022 waren in Deutschland rund 2,66 Millionen netzgekoppelte Photovoltaik (PV)-Anlagen mit einer gesamten kumulierten Kapazität von rund 67,5 GW installiert (Fraunhofer ISE 2024). Bereits in den 90er Jahren stieg die Zahl installierter PV-Anlagen an und erfuhr in den 2000er Jahren ein schnelles Wachstum. Während Mitte der 2000er Jahre vorrangig kleine Anlagen installiert wurden, ging der Trend ab Ende 2000er zu größeren, zentralisierten Anlagen über (Hengstler et al. 2021). Da Photovoltaikmodule eine durchschnittliche Lebensdauer von etwa 20–30 Jahren haben, fallen bereits heute relevante Mengen an Altmodulen an, die ein hohes Potenzial für die Sekundärrohstoffnutzung aufweisen (Hengstler et al. 2021; Held und Wessendorf 2024; Wirth 2024). Zukünftig wird dieses Potenzial noch weiter zunehmen.

A.5.1 Status quo

Der Stromsektor in Deutschland soll bereits 2035 weitgehend klimaneutral sein. Der Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch⁹ muss daher bis 2030 auf 80 % angehoben werden. Im Jahr 2023 lag der Anteil der Erneuerbaren am Bruttostromverbrauch bei rund 52 % – damit wurde erstmals über die Hälfte des Stroms durch erneuerbare Energieträger gedeckt. Die Bruttostromerzeugung aus Photovoltaik (PV) erreichte 2023 etwa 61 TWh. Der Anteil der PV-Stromerzeugung lag im Jahr 2023 bei rund 12 % gemessen am Bruttostromverbrauch und 22 % gemessen an der Bruttostromerzeugung über alle Erneuerbaren hinweg (Umweltbundesamt 2024a).

In Deutschland sind aktuell ca. zwei Drittel der PV-Kapazitäten als Dachanlagen installiert (Günnewig et al. 2022). Bisher werden lediglich 10 % des Dachpotenzials und weniger als 0,1 % des Fassadenpotenzials genutzt (Wirth 2024). Doch nicht nur Gebäudehüllen, d. h. Dächer und Fassaden, bieten in Deutschland noch hohes Potenzial. Die Hälfte des PV-Zubaus soll auf Freiflächen erfolgen. Für die andere Hälfte des künftigen Zubaus sind Dachflächen oder gebäudeintegrierte Konzepte vorgesehen. Im März 2023 waren bisher auf Dächern und Grundstücken in Deutschland etwa 2,6 Millionen Photovoltaikanlagen¹⁰ installiert (Destatis 2023a).

Im selben Jahr wurden in Deutschland rund 3,4 Millionen Solarmodule¹¹, die in Photovoltaikanlagen verbaut werden, zum Absatz im In- und Ausland produziert – das entspricht 57 % mehr als im Jahr 2019 (Destatis 2024). Der Großteil der Solaranlagen, die in Deutschland installiert werden, stammt aus China. Die Volksrepublik hat eine kritische Monopolstellung und ist mit Abstand das wichtigste Herkunftsland für Photovoltaikanlagen in Deutschland. Im Jahr 2022 kamen rund 87 % der nach Deutschland importierten Photovoltaikanlagen aus China (Destatis 2023b).

Exkurs: Balkonkraftwerke

Balkonanlagen bzw. -kraftwerke (steckerfertige Solaranlagen) sind derzeit im Trend. Mit dem Solarpakt I, das im Frühjahr 2024 in Kraft getreten ist, können PV-Anlagen deutlich einfacher und unbürokratischer installiert werden. Das zeigt Wirkung: Die Bundesnetzagentur registrierte bis Juni 2024 über 500.000 Anlagen im Marktstammdatenregister. Unter Balkonkraftwerke fallen damit

⁹ Der Bruttostromverbrauch wird im Rahmen der gesetzlichen Ausbauziele der Energiewende als Bezugsgröße verwendet. Er schließt Netz-, Speicher- und Eigenverbrauchsverluste ein (Wirth 2024).

¹⁰ Erfasst werden nach Destatis alle Photovoltaikanlagen, die in die Netze der öffentlichen Versorgung einspeisen und über einen Stromzähler verfügen, der die eingespeisten Strommengen misst. Kleinere Anlagen, wie etwa die sogenannten Balkonkraftwerke, fallen daher in der Regel nicht darunter.

¹¹ GP19-261122403 Solarmodule

Geräte mit einer installierten Leistung von insgesamt maximal 2 kW und einer Wechselrichterleistung von maximal 800 Voltampere (Bundesregierung 2024a).

Da nicht alle Balkonanlagen registriert werden geht die Bundesnetzagentur davon aus, dass die tatsächliche Zahl der Anlagen noch höher ist. Das starke Wachstum der Balkonanlagen nimmt zwar noch einen eher geringen Anteil am gesamten deutschen Solarzubau ein (2023: 1,5 % bzw. 0,2 Gigawatt). Dies könnte sich in den kommenden Jahren aber deutlich steigern und den Transformationsprozess im Stromsektor fördern (Bundesnetzagentur 2024a; b; c).

Da laut des BMWK (2023) die überwiegende Zahl der PV-Anlagen für private Haushalte gemeinsam mit einem Speicher installiert wird, sei an dieser Stelle auf den Steckbrief zu den stationären Speichern verwiesen, die ebenfalls ein Aktionsfeld darstellen.

Für die derzeit anfallenden PV-Altmodule bestehen Sammel- und Entsorgungssysteme. Diese sind jedoch laut der Deutschen Umwelthilfe nicht ausreichend, um die in Zukunft erwartenden Mengen ressourceneffizient zu behandeln (Deutsche Umwelthilfe 2021).

Durch die WEEE-Richtlinie (Waste Electrical and Electronic Equipment Directive) sind PV-Produzenten verpflichtet, PV-Module ohne Kosten zurückzunehmen und dem Recycling zuzuführen. Für die als Abfall gesammelten Photovoltaik-Module gilt außerdem seit Oktober 2015 das in Deutschland in Kraft getretene Gesetz über die Inverkehrbringung, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (ElektroG 2022). PV-Module werden in einer eigenen Sammelgruppe (Kategorie 6) geführt. Im Gesetz werden Pflichten zur Rücknahme und die Finanzierung derer geregelt: Für Altgeräte der Kategorie 5 und 6 werden eine Verwertungsquote von 75 % sowie ein Anteil zur Vorbereitung zur Wiederverwendung und zum Recycling von mindestens 55 % vorgeschrieben (ElektroG 2022).

Verbraucher*innen können die eigenen Altmodule zudem in haushaltsüblichen Mengen selbst in kommunalen Wertstoffhöfen entsorgen (energie-experten 2024). Größere Mengen werden meist von Betreibern in Kooperation mit externen Dienstleistern entsorgt. Das Transport- und Recyclingunternehmen PV CYCLE, beispielsweise, bietet eine Sammlung von Annahmestellen und einen Abhol- und Recyclingservice in europäischen Ländern (PV CYCLE 2024).

Tabelle A 3 zeigt die angefallenen Abfallmengen zwischen 2016 und 2021.

Tabelle A 3: Angefallene Abfallmengen der PV-Module in Deutschland

Jahr	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Gesammelter Abfall [in t]	9.167	3.595	7.865	13.362	15.396	16.050

Quelle: Eigene Zusammenstellung basierend auf BMUV (2024) und Eurostat (2024)

A.5.2 Rohstoffe in Photovoltaikanlagen

Siliziumbasierte Zellen (c-Si) – die älteste Technologie am Markt – dominierte 2024 die globale Produktion mit einem Anteil von rund 98 % (Fraunhofer ISE 2024). Die monokristalline Technologie hat sich gegenüber den multikristallinen siliziumbasierten Solarzellen durchgesetzt – 2014 lag der Anteil der multikristalline Siliziummodule an den c-Si-Module noch bei 55 % (Weckend et al. 2016). Laut Fraunhofer ISE (2024) wurden die multikristallinen Solarzellen mittlerweile vom Markt verdrängt. Ein geringer Prozentanteil entfällt derzeit noch auf die Dünnschicht-PV-

Technologien (CIGS¹² und CdTe¹³). Daneben werden auch weitere, neuere Technologien unterschieden wie z. B. organische Solarzellen (Organic PV/dye-sensitised cells, OPV¹⁴) und Perowskit-Dünnschicht-PV¹⁵. Obwohl ein wachsender Marktanteil für die neuen Technologien prognostiziert wird, wird erwartet, dass Silizium-basierte Technologien den Markt bis 2030 dominieren werden (IEA 2022).

Tabelle A 4 zeigt den Materialbedarf von c-Si-Solarmodulen und gibt einen Überblick über die Hauptbestandteile und einige der Edel- und Sondermetalle. Bei einem durchschnittlichen Modulgewicht von 20–25 kg besteht ein kristallines Siliziummodul zu rund 76 % (15–18 kg) aus Glas (Kummer et al. 2020). Rund 7–12 % des Masseanteils (2–2,5 kg) entfallen auf Aluminium. Weitere 2–4 % entfallen auf Silizium (0,5–1 kg). Silber ist fast ausschließlich in c-Si-Modulen vorhanden. Der Silbergehalt liegt dabei zwischen 10–20 g (0,05 – 0,1 % des Moduls). Indium und Gallium sind vorrangig in CI(G)S-Dünnschichtmodulen enthalten. Der Indiumgehalt beträgt etwa 0,01–0,02 g/kg Modul und der Galliumgehalt liegt bei etwa 0,01 g/kg Modul (Kummer et al. 2020).

Tabelle A 4: Bestandteile und Materialbedarf eines c-Si-Solarmodulen

		Bošnjaković et al. (2023)	Bošnjaković et al. (2023)	Bošnjaković et al. (2023)	Kummer et al. (2020)	Kummer et al. (2020)	Kummer et al. (2020)
Material	Bestandteil	Gehalt [kg/kWp]	Masseanteil [%]	Anmerkung zum RC	Gehalt	Masseanteil [%]	Anmerkung zum RC
Aluminium (Al)	Rahmen	12,8	18	Al-Schrott, geeignet für die Herstellung von sekundärem Al	2–2,5 kg/Modul 103 kg Al/t	7–10 %	Den höchsten Aluminiumanteil besitzen a-Si-Module und CI(G)S-Module mit bis ca. 12 %. Der Al-Anteil von c-Si-Modulen liegt bei 7 bis 10 %
Silizium (Si)	Poly c-Si Chips	3,1	4	Rückgewinnung ~95%	0,5–1 kg/Modul	2–4 %	Die Rückgewinnungsquote von Si aus c-Si-Modulen kann mit > 75 % abgeschätzt werden
Silber (Ag)	Leiterbahnen und	0,03	0,05	Anwendung von	10–20 g/Modul	0,05–0,1 %	

¹² CIGS steht für Kupfer-Indium-Gallium-Selenid, ein Halbleitermaterial, das in der Dünnschichtphotovoltaik verwendet wird (Legite GmbH 2024a).

¹³ Cadmiumtellurid (CdTe) ist ein Halbleitermaterial, das häufig in Dünnschicht-Solarzellen verwendet wird. CdTe-Solarzellen sind eine der führenden Technologien für Dünnschicht-Photovoltaik (Legite GmbH 2024b).

¹⁴ Organische Solarzellen werden aus Kohlenwasserstoffverbindungen hergestellt und daher auch oft als „Plastik-“ oder „Kunststoffsolarzellen“ bezeichnet (solarenergie.de 2021).

¹⁵ Perowskit-Solarzellen sind hocheffiziente Dünnschicht-Solarzellen, die auf einer speziellen Kristallstruktur basieren und sich durch ihr starkes Lichtabsorptionsvermögen, ihre flexible chemische Zusammensetzung und ihre kostengünstige Herstellung bei niedrigen Temperaturen auszeichnen (Fraunhofer o.J.)

		Bošnjaković et al. (2023)	Bošnjaković et al. (2023)	Bošnjaković et al. (2023)	Kummer et al. (2020)	Kummer et al. (2020)	Kummer et al. (2020)
	Metall-kontakt			Elektrolyse oder Abscheidung von Laugenlösung			
Kupfer (Cu)	Busbar (metallische Sammelschiene/Leiterbahn) und Tabbing-Draht	0,45	2	Rückgewinnung aus Kabelabfällen (~97%)		k.A.	
(gehärtetes) Glas	Oberfläche	54,7	70	Scherben für die Glasherstellung		76 %	kristallines Siliziummodul zu 15 - 18 kg (bei durchschnittlichem Modulgewicht von 20 - 25 kg)
Polyvinylfluorid	Rückseitenfolie	17,1	1,5	Energierückgewinnung bei Verbrennung			
Ethylvinylacetat (EVA)	Einbettungsmaterial		5	Energierückgewinnung bei Verbrennung			
Indium (In)					0,015 g In/kg		Ist in Cl(G)S-Dünnschichtmodulen enthalten
Gallium (Ga)					0,01 g Ga/kg		ist in Cl(G)S-Dünnschichtmodulen enthalten

Quelle: Zusammenstellung auf Basis von (Bošnjaković et al. 2023) und Kummer (2020)

Innerhalb Deutschlands ist das Unternehmen Reilingen GmbH und Co. KG führend bei der Rückgewinnung von Rohstoffen aus ausgedienten PV-Module mit einer Spezialisierung auf Glas und Silizium. Die Altmodule werden an drei Recyclingstandorten behandelt: Sülzetal (Osterweddingen), Marienfeld und Torgau. Zusammen haben diese Standorte eine Kapazität von ca. 10.000 Tonnen pro Jahr für das Recycling von PV-Modulen, wobei derzeit schätzungsweise rund 6.000 Tonnen an PV-Modulen pro Jahr recycelt werden. In Münster existiert seit 2023 eine

Recyclinganlage mit einer Kapazität von bis zu 50.000 Tonnen pro Jahr (Held und Wessendorf 2024; Reiling GmbH 2024a).

In den meisten Recyclinganlagen werden bislang nur Glas und die Metalle Aluminium und Kupfer zurückgewonnen. Im Recyclingprozess werden Aluminiumrahmen, Anschlussdose und Glas vom Laminat getrennt. Im Anschluss wird das verbleibende Laminat geschreddert. Dies führt zu Verunreinigungen der Glasfraktion, die im Anschluss als Isoliermaterial oder Schaumglas genutzt wird. Die Demontage des Aluminiumrahmens vor der mechanischen Zerkleinerung ist Stand der Technik, Aluminium wird allerdings auch während des Behandlungsprozesses rückgewonnen. Das Metall kann durch die derzeit etablierten Behandlungsverfahren für PV-Module als reine Fraktion zurückgewonnen werden. Das Aluminiumrecycling benötigt erheblich weniger Energie als die Primärgewinnung von Aluminium aus Erz (Kummer et al. 2020).

Verfahren zur Stofftrennung für das verbleibende Laminat befinden sich in der Erprobung. Zu den wertvollen Bestandteilen eines Solarmoduls zählen Silizium, Silber auf den Solarzellen und das Kupfer der Zellverbinder. Die Rückgewinnung von Indium, Gallium, Silber und Silizium ist bislang nicht gesetzlich geregelt. Verfahren zur Rückgewinnung weiterer Materialien existieren vielfach erst als Prototypen bzw. werden in laufenden Forschungsprojekten untersucht. (Deutsche Umwelthilfe 2021)

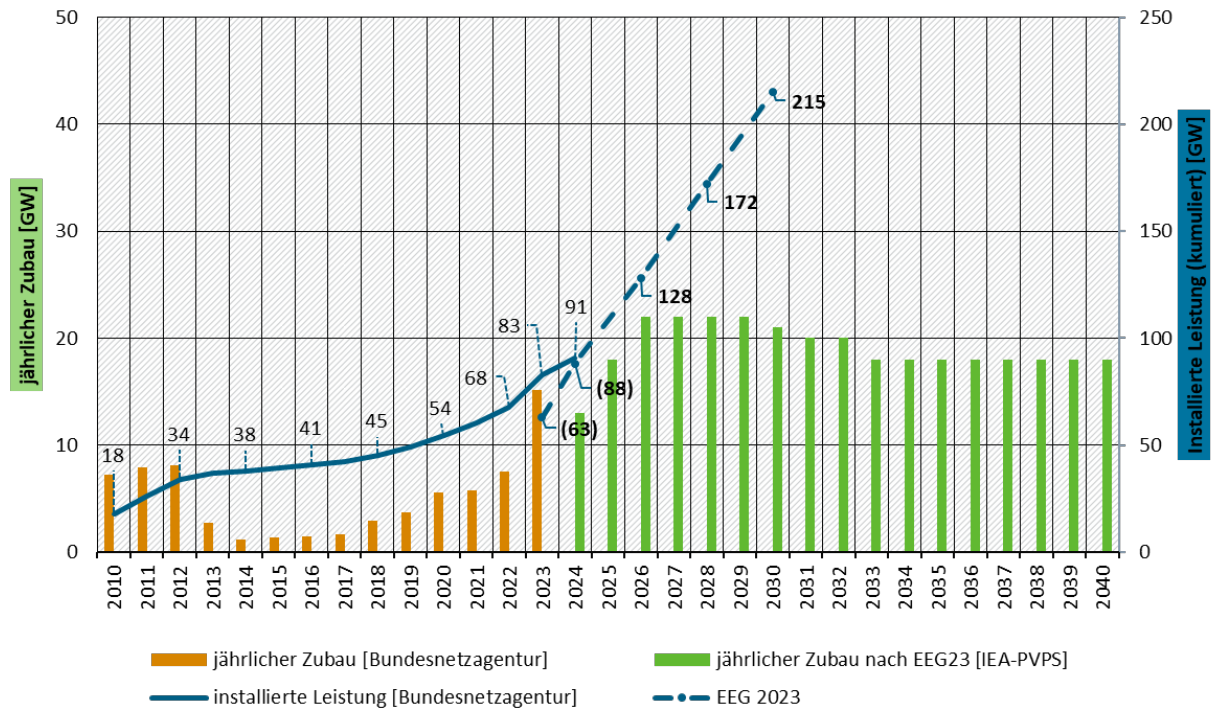
Für die derzeit anfallenden geringen Mengen an Gallium und Indium standen zum Stand 2020 keine großtechnischen Rückgewinnungsverfahren zur Verfügung. Auch Silber und Silizium werden nach diesem Stand noch nicht zurückgewonnen, obwohl Behandlungsverfahren existieren, die technisch geeignet sind (Kummer et al. 2020).

A.5.3 Zukünftiges Sekundärrohstoffpotenzial

Die Bundesregierung schätzt, dass der Bruttostromverbrauch bis zum Jahr 2030 auf rund 750 TWh ansteigen wird (Bundesregierung 2023, 2024b). Zum Vergleich: Derzeit liegt die Bruttostromerzeugung durch erneuerbare Energien insgesamt bei etwa 272 TWh. Ausgehend von einem höheren Strombedarf als ursprünglich angenommen, wurden die Ausbauziele für die Energiewende angepasst. Mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2023 wurden die Ausbaupfade für Wind- und Solaranlagen deutlich angehoben und gesetzlich verankert. Der geplante Zubau von PV-Kapazitäten im EEG 2023 sieht vor, dass im Jahr 2030 die installierten Leistungen von Solaranlagen 215 GW betragen und zu einem Solarstromanteil von etwa 30 % führen (BMWK 2023). Das ist ein äußerst ambitioniertes Ausbauziel, waren doch im EEG 2021 noch 100 GW an installierter Leistung von PV-Anlagen bis 2030 vorgesehen (Volkert und Hamann 2023).

Während der Zubau im Jahr 2022 noch bei rund 7,5 GW pro Jahr lag, konnte dieser sich im Jahr 2023 mit 14,6 GW pro Jahr beinahe verdoppeln (siehe Abbildung A 17). Zum Ende des Jahres 2023 lag die gesamte installierte Leistung zur Stromerzeugung aus PV bei rund 83 GW (ca. 49 % der gesamten Kapazitäten erneuerbarer Energien) (Umweltbundesamt 2024a; b). In den nachfolgenden Jahren sollen 13 GW (2024) bzw. 18 GW (2025) Leistungszubau angestrebt werden. Ab dem Jahr 2026 sind 22 GW pro Jahr vorgesehen (BMWK 2023). Wie Abbildung A 17 zeigt, konnte 2030 das EEG23 Ziel übertroffen werden. Für das Jahr 2024 geht die Bundesnetzagentur (2024d) von einer voraussichtlich installierten Kapazität von rund 91 GW aus, was einem Zubau von nur rund 8 GW entsprechen würde.

Abbildung A 17: Entwicklung jährlicher Zubau der PV-Kapazitäten seit 2010 bis 2040 in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Bundesnetzagentur (2024d) sowie Held und Wessendorf (2024)

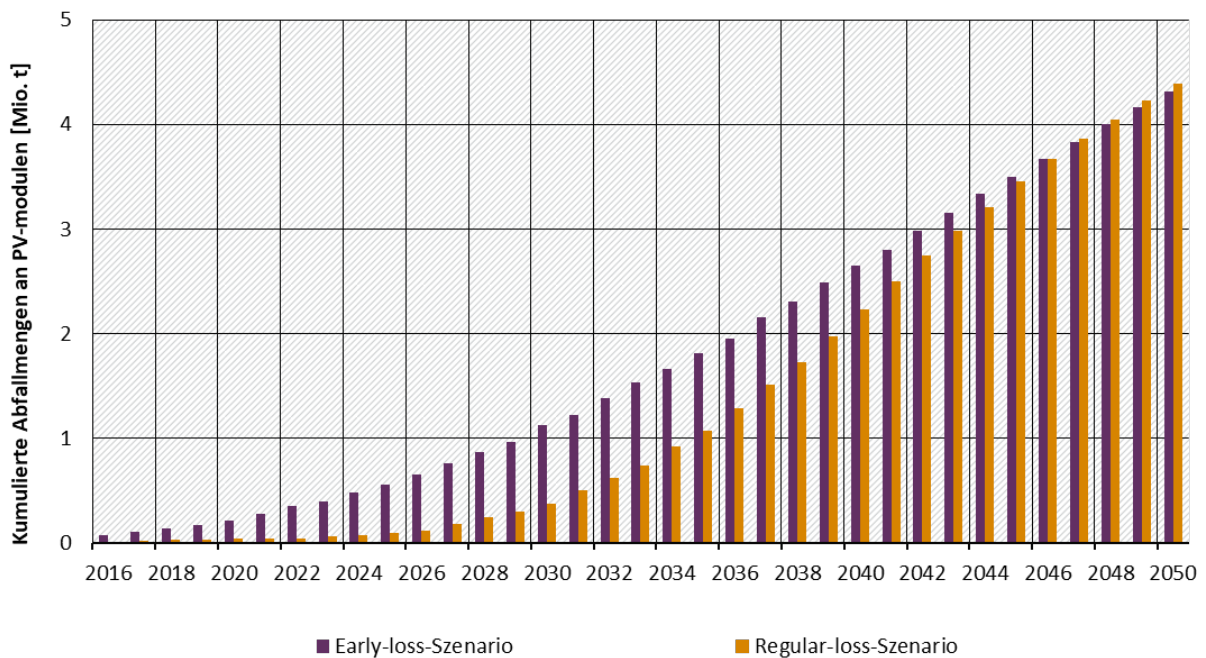
Im Zeitraum 2030–2040 werden die ersten großen PV-Anlagen ihr Lebensende erreichen und schrittweise ersetzt werden müssen. Die erwartete Lebensdauer von PV-Modulen beträgt, wie eingangs erwähnt, etwa 20–30 Jahre, so dass die derzeitige Anzahl an ausgedienten PV-Modulen noch gering ist.

In Szenarien von IRENA/IEA-PVPS (2016) wurden die voraussichtlichen Abfallströme von PV-Anlagen zum Ende ihres Lebens prognostiziert. Abbildung A 18 zeigt die Entwicklung der kumulativ anfallenden Abfallströme von PV-Anlagen bis zum Jahr 2050. In den kommenden Jahren ist mit einem erheblichen Anstieg der Abfallmenge bei PV-Modulen zu rechnen. Wie die Szenarien – zum einen das „Regular-loss“- und zum anderen das „Early-loss“-Szenario¹⁶ – verdeutlichen, sind die zukünftig anfallenden PV-Abfallmengen für den Zeitraum von 2023–2040 mit hohen Unsicherheiten verbunden. Bis zum Jahr 2030 werden zwischen 400.000 und einer Million Tonnen Abfälle aus PV-Modulen prognostiziert. Durchschnittlich (inkrementell auf 10 Jahre) fallen somit jährlich zwischen 38.000–80.000 Tonnen im Zeitraum von 2020 bis 2030 an, 160.000–180.000 Tonnen zwischen 2030 und 2040 und 180.000–210.000 Tonnen zwischen 2040 und 2050.

Ein Abgleich der tatsächlich erfassten kumulierten Menge des PV-Abfallaufkommens für die Jahre 2016–2020 zeigt, dass die offiziell gemeldeten Mengen (siehe Tabelle 1) bei rund 49.400 Tonnen liegen und damit etwa 2,5-mal so hoch sind, wie die geschätzten Mengen des „Regular-loss“-Szenarios von rund 20.000 Tonnen (siehe Abbildung A 18). Allerdings liegen die Mengen deutlich unter den im „Early-loss“-Szenario geschätzten 200.000 Tonnen. Selbst im „Regular-loss“-Szenario wird die Abfallmenge bis 2030 auf das Zwanzigfache ansteigen und wird von da an weiter exponentiell zunehmen.

¹⁶ Das „Regular-loss“-Szenario geht von einer 30-jährigen Lebensdauer von Solarmodulen aus, ohne vorzeitiger Abnutzung. Das „Early-loss“-Szenario berücksichtigt Defekte zu Beginn der Installation, zur „Lebensmitte“ und durch Verschleiß bis zum Ende der angenommenen 30-jährigen Lebensdauer.

Abbildung A 18: Prognostizierte Abfallmengen von PV-Anlagen für Deutschland bis 2050



Quelle: eigene Darstellung basierend auf Weckend et al. (2016)

Weckend et al. (2016) gehen in der Prognose der PV-Kapazität Deutschlands von 75 GW bis zum Jahr 2030 aus. Für diese prognostizierte Kapazität liegt das Sekundärrohstoffpotenzial, je nach Szenario, bei (kumuliert) rund 0,4 – 1 Million Tonnen bis zum Jahr 2030 (und bei 4,3 – 4,4 Millionen Tonnen bis zum Jahr 2050). Allerdings liegen die Ausbauziele der Bundesregierung bei einer angestrebten Kapazität von 215 GW und damit fast drei Mal höher als in der Studie von Weckend et al. (2016).

In Tabelle A 5 wurden die möglichen Spannweiten der jährlichen Abfallmengen jeweils für die Jahrzehnte bis 2050 mit den Materialanteilen aus verrechnet. Die Mengen liefern eine grobe Orientierung der zukünftigen Sekundärrohstoffpotenziale Deutschlands. Sollte der Ausbau der PV-Energie nach EEG2023 gelingen, so sind für die späteren Perioden noch höhere Abfallmengen zu erwarten.

Tabelle A 5: Sekundärrohstoffpotenzial für PV-Anlagen in Deutschland für die Jahre 2025 bis 2050

Jahr	Abfallmengen jährlich [t]		
	2020 – 2030 jährlich	2030-2040 jährlich	2040-2050 jährlich
Gesamt	38.000 – 80.000	160.000 – 180.000	180.000 – 210.000
Aluminium (Al)	2.660–14.400	12.600–28.800	14.700–32.400
Silizium (Si)	760–3.200	3.600–6.400	4.200–7.200
Silber (Ag)	19–80	90–160	105–180

Jahr	Abfallmengen jährlich [t]		
Kupfer (Cu)	760–1.600	3.200–3.600	3.600–4.200
(gehärtetes) Glas	26.000–60.800	121.000–126.000	136.800– 147.000
Polyvinylfluorid	570–1.200	2.400–2.700	2.700–3.150
Ethylvinylacetat (EVA)	1.900–4.000	8.000–9.000	9.000–10.500

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Weckend et al. (2016) sowie den Materialanteilen in Tabelle A 4 nach Bošnjaković et al. (2023) und Kummer et al. (2020).

A.5.4 Handlungsbedarf für eine optimierte Urban Mining Strategie

Die wachsende Vielfalt an PV-Technologien (z. B. Perowskite, Tandemsolarzellen, organische Stoffe etc.) führt zu einer weiter zunehmenden Komplexität bei Sammelsystemen und Behandlungsverfahren zur Rückgewinnung. Eine Herausforderung liegt daher darin, rechtzeitig Sammel- und Verwertungssysteme mit ausreichender Kapazität einzurichten (Held und Wessendorf 2024).

Mit den derzeit verfügbaren statistischen Daten ist die Nachverfolgung der Entsorgung von PV-Modulen schwierig. So werden z. B. intakte gebrauchte Module über Sekundärmärkte exportiert und/oder defekte Module werden illegal als funktionierende Gebrauchtmodule exportiert. Ein nicht ausreichendes Monitoring der Entsorgungswege und Stoffströme führt dazu, dass viele Module nicht erfasst werden (Held und Wessendorf 2024).

Die Transportkosten für die Anlieferung in die Erstaufbereitungs- und Recyclinganlagen stellen derzeit einen erheblichen Anteil der Gesamtkosten für das Recycling von PV-Modulen dar. Nach Schätzungen von PV Cycle liegen diese zwischen 100-250 Euro/Tonne (Held und Wessendorf 2024). Da es nur wenige Annahmestellen in Deutschland gibt, können lange Transportwege anfallen.

Verschiedene Modultechnologien (siliziumbasierte und nicht-siliziumbasierte Module) werden in Deutschland bislang getrennt den jeweiligen Behandlungsverfahren zugeführt. Dies ist auch erforderlich, um etwaige schadstoffhaltige Fraktionen aus PV-Modulen nicht mit schadstofffreien Fraktionen aus PV-Modulen zu vermischen oder zu verdünnen (Kummer et al. 2020). Zwar verlangt §21 ElektroG von zertifizierten Erstbehandlungsanlagen eine erste Vorsortierung der unterschiedlichen PV-Technologien, in der Praxis landen häufig gemischte Chargen bzw. fehlgeleitete Module in den Recyclinganlagen. Das Resultat sind ein erhöhter Sortieraufwand und Umwege für zunächst fehlgeleitete Module (Held und Wessendorf 2024).

Aufbereitungsunternehmen mit einer allgemeinen Genehmigung zur Annahme und (gemeinsamen) Behandlung aller PV-Modultypen und Technologien fehlen noch bzw. stecken in der Entwicklung. In einer Empfehlung des Umweltbundesamt für die Weiterentwicklung des ElektroG wurde festgehalten, dass die Getrenntbehandlung nicht vorgeschrieben werden sollte, da sonst mögliche Technologien zur gemeinsamen Behandlung von PV-Modulen ausgeschlossen werden würden (Held und Wessendorf 2024; Kummer et al. 2020).

Unsachgemäßer Umgang mit noch funktionsfähigen gebrauchten PV-Modulen führt häufig zu Schäden an den Modulen, wodurch diese für eine weitere Verwendung nicht mehr geeignet sind und recycelt werden müssen. Zu erhöhten Bruchraten kann es vor allem bei der Demontage und

dem Abbau von Anlagen und durch ungeeignete Lagerung bzw. Ladungssicherung beim Transport kommen. (Held und Wessendorf 2024). Dadurch steigt das Risiko von Schadstoffemissionen. Die Hauptschadstoffe in PV-Modulen sind Blei in den Loten von c-Si-Modulen und Cadmium und Blei in Dünnschichtmodulen (Kummer et al. 2020).

Bislang wird aus ausgedienten PV-Modulen vorrangig Glas und Aluminium wiedergewonnen. Zusammen machen diese Rohstoffe mehr als 80 Prozent der Modulmasse aus. Glas wird durch den mechanischen Aufschluss und das Schreddern verunreinigt. Die Glasfraktionen erfüllen dann nicht mehr die Qualitätsanforderungen für hochwertige Anwendungen und werden als Schaumglasprodukte, Glaswolle oder Akustik-/Isoliermaterial verwertet. Ein Einsatz der Glasfraktion in der Behälterglasindustrie bzw. in der Flachglasindustrie wird in Deutschland angestrebt. Dies setzt allerdings eine hochwertige stoffliche Verwertung des Altglases aus PV-Modulen voraus, etwa durch Separations- und Glasreinigungsverfahren (Kummer et al. 2020). Ein hochwertiges Glasrecycling ist Gegenstand der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Fraunhofer CSP zusammen mit der Reiling GmbH und Co. KG (Fraunhofer ISE 2019).

Für Aluminium aus EoL-Modulen besteht bereits eine großtechnische werkstoffliche Verwertung (teilweise auch eine nicht werkstoffliche z. B. als Desoxidationsmittel in der Stahlindustrie). Aluminium wird dabei als reine Fraktion durch Demontage des Rahmens vor der mechanischen Zerkleinerung oder während des Behandlungsprozesses zurückgewonnen. Aus den nachfolgenden Behandlungsprozessen kann es für eine weitere hochwertige werkstoffliche Verwertung genutzt werden (Kummer et al. 2020).

Verfahren, in denen auch Materialien wie Silizium, Silber und Kunststoffe rückgewonnen werden, sind derzeit in der Entwicklung (siehe z. B. Projekt „ReSolar“ (Fraunhofer ISC 2023), „RETRIEVE“ (Fraunhofer IMWS 2024), (Reiling GmbH 2024b; Storck 2024), „APOLLO – A Proactive Approach to the Recovery and Recycling of Photovoltaic Modules“ (Apolloproject.eu 2024)).

Zusammenfassend zählen zu den zentralen Herausforderungen:

- ▶ Geringes Sammelvolumen über das offizielle System und wenige geeignete Recyclingkanäle
- ▶ Geringe Transparenz der Ströme von EoL-PV-Modulen
- ▶ Hohe Transportkosten für die Rücknahmelogistik (Transport von den Sammelstellen zu den Behandlungsanlagen)
- ▶ Unterschiedliche Handhabung/Koordination der Sammlung von EoL-PV-Modulen (aus gewerblicher und privater Hand)
- ▶ Vergleichsweise hohe Bruchraten von intakten Modulen durch unsachgemäße Demontage, Lagerung oder Ladungssicherung beim Transport der gesammelten EoL-PV-Module
- ▶ Wenig hochwertige Verwertung von Glas und Aluminium, keine großtechnische Rückgewinnung der weiteren Materialien

A.5.5 Quellenverzeichnis Steckbrief „Photovoltaikanlagen“

Apolloproject.eu (2024): Key information. <https://www.apolloproject.eu/concept> (08.08.2024)

BMUV (2024): Elektro- und Elektronikgeräte. <https://www.bmuv.de/WS2742> (07.08.2024)

BMWK (2023): Photovoltaik-Strategie - Handlungsfelder und Maßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der Photovoltaik. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/photovoltaik-strategie-2023.html> (08.07.2024)

Bošnjaković, M.; Galović, M.; Kuprešak, J.; Bošnjaković, T. (2023): The End of Life of PV Systems: Is Europe Ready for It? In: Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Vol. 15, No. 23, S. 16466. DOI: 10.3390/su152316466

Bundesnetzagentur (2024a): Zubau Erneuerbarer Energien im ersten Halbjahr 2024. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20240719_EEZubauHJ1.html (07.08.2024)

Bundesnetzagentur (2024b): Bundesnetzagentur vereinfacht die Registrierung von Balkonkraftwerken. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20240328_MaStR_Reg.html (07.08.2024)

Bundesnetzagentur (2024c): Zubau Erneuerbarer Energien 2023. https://www.bundesnetzagentur.de/Shared-Docs/Pressemitteilungen/DE/2024/20240105_EEGZubau.html (07.08.2024)

Bundesnetzagentur (2024d): Statistik ausgewählter erneuerbarer Energieträger zur Stromerzeugung - Juni 2024. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEStatistikMaStR_XLS.xlsx?blob=publication-File&v=15 (07.08.2024)

Bundesregierung (2023): Mehr Energie aus erneuerbaren Quellen. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/energiewende-beschleunigen-2040310> (08.07.2024)

Bundesregierung (2024a): Mehr Photovoltaik mit Solarpaket, Bundesregierung. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/tipps-fuer-verbraucher/solarpaket-photovoltaik-balkonkraftwerke-2213726> (07.08.2024)

Bundesregierung (2024b): Wo steht Deutschland bei der Energiewende. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/faq-energiewende-2067498> (08.07.2024)

Destatis (2023a): 2,6 Millionen Photovoltaikanlagen in Deutschland installiert. Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2023/PD23_25_p002.html (08.07.2024)

Destatis (2023b): 87 % der importierten Photovoltaikanlagen kamen im Jahr 2022 aus China. Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/03/PD23_N012_43.html (08.07.2024)

Destatis (2024): Produktion im Verarbeitenden Gewerbe: Deutschland, Jahre, Güterverzeichnis (9-Steller). Statistisches Bundesamt. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=abruftabelleBearbeiten&levelindex=1&levelid=1720447907388&auswahloperation=abruftabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&code=42131-0004&auswahltext=&wertauswahl=619&wertauswahl=579&wertauswahl=623&wertauswahl=620&nummer=15&variable=15&name=GP19A9&werteabruf=Werteabruf#abreadcrumb> (08.07.2024)

Deutsche Umwelthilfe (2021): Kreislaufwirtschaft in der Solarbranche stärken – Alte Photovoltaik-Module für den Klima- und Ressourcenschutz nutzen. https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Pressemitteilungen/Kreislaufwirtschaft/210310_Wei%C3%9Fbuch_Kreislaufwirtschaft_Solarmodule_st%C3%A4rken_DEU_FINAL.pdf (07.08.2024)

energie-experten (2024): Recycling von Solarmodulen. <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/solarmodule/recycling> (07.08.2024)

ElektroG (2022): Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz - ElektroG) vom 20. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1739), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 8. Dezember 2022 (BGBl. I S. 2240) geändert worden ist, Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Bundesamt für Justiz. https://www.gesetze-im-internet.de/elektrog_2015/BJNR173910015.html (17.09.2025)

Eurostat (2024): Elektro- und Elektronikgeräte-Abfall (WEEE) nach Abfallbewirtschaftungsmaßnahmen - offener Anwendungsbereich, 6 Produktkategorien (ab 2018). https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_WASELEEOS_custom_12294836/default/table?lang=de (07.08.2024)

Fraunhofer ISE (o.J.): Perowskit-Dünnschichtphotovoltaik, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) (Hg.). <https://www.ise.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/photovoltaik-materialien-zellen-und-module/perowskit-duennschichtphotovoltaik.html> (16.09.2025)

Fraunhofer IMWS (2024): Recycling von Photovoltaik-Modulen für eine nachhaltige Wertschöpfungskette – Rückgewinnungstechnologien für die Wiederverwendung von Solarmodulen, Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen (IMWS) (Hg.). <https://www.imws.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/recycling-photovoltaik-module-nachhaltige-wertschoepfungskette.html> (08.08.2024)

Fraunhofer ISC (2023): ReSolar, Fraunhofer-Institut für Silicatiforschung (ISC). <https://www.fraunhofer.de/de/schnelleinstieg/alumni/news/Fraunhofer-Alumni-Award/ReSolar.html> (08.08.2024)

Fraunhofer ISE (2019): EoL – Entwicklung eines industrietauglichen Recycling-Prozesses für PV-Module, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) (Hg.). <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/eol.html> (29.07.2024)

Fraunhofer ISE (2024): Photovoltaics Report, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) (Hg.). <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/photovoltaics-report.html> (08.08.2024)

Günnewig, D.; Johannwerner, E.; Metzger, J.; Kelm, T.; Wegner, N. (2022): Umweltverträgliche Standortsteuerung von Solar-Freiflächenanlagen - Handlungsempfehlungen für die Regional- und Kommunalplanung. Umweltbundesamt (Hg.), Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba_umweltvertraegliche_standortsteuerung_von_solar-freiflaechenanlagen.pdf (15.09.2023)

Held, M.; Wessendorf, C. (2024): Status of PV Module Take-Back and Recycling in Germany 2024. Task 12 PV Sustainability Activities, Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP), Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) and International Energy Agency (IEA) (Ed.). <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/03/IEA-PVPS-T12-27-Report-PV-Recycling-in-Germany.pdf> (07.08.2024).

Hengstler, J.; Russ, M.; Stoffregen, A.; Hendrich, A.; Weidner, S.; Held, M.; Briem, A.-K. (2021): Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen. Umweltbundesamt (Hg.), Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-06_cc_35-2021_oekobilanzen_windenergie_photovoltaik.pdf (08.08.2024)

IEA (2022): Special Report on Solar PV Global Supply Chains. International Energy Agency (IEA) Publications (Ed.), Paris. <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains> (20.08.2025)

Kummer, S.; Strobelt, A.; Kohlmeier, R.; Kitazume, C.; Oehme, I.; Schnepel, C. (2020): Empfehlungen des UBA für die Weiterentwicklung der Behandlungsanforderungen nach ElektroG. Umweltbundesamt (Hg.), Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_148-2020_bericht_empfehlungen_zu_behandlungsanforderungen.pdf (29.07.2024)

Legite GmbH (2024a): CIGS (Copper Indium Gallium Selenide). Solarenergielexikon. <https://solarenergielexikon.de/2024/05/15/cigs-copper-indium-gallium-selenide/> (16.09.2025)

Legite GmbH (2024b): Cadmiumtellurid (CdTe). Solarenergielexikon. <https://solarenergielexikon.de/2024/05/15/cadmiumtellurid-cdte/> (16.09.2025)

PV CYCLE (2024): Sammlung und Recycling von Photovoltaik Modulen. <https://pvcycle.de/> (07.08.2024)

Reiling GmbH (2024a): Recycling & Produkte. <https://www.reiling.de/recycling-produkte> (07.08.2024)

Reiling GmbH (2024b): Zweifacher Durchbruch im PV-Recycling: Glasqualität für hochwertige Schmelzanwendungen und industrielle Rückgewinnung von Silizium. <https://www.reiling.de/article/zweifacher-durchbruch-im-pv-recycling-glasqualitaet-fuer-hochwertige-schmelzanwendungen-und> (08.08.2024)

solarenergie.de (2021): Organische Solarzellen: Vor- und Nachteile. <https://www.solarenergie.de/hintergrundwissen/solarenergie-nutzen/solarzellen/organische-solarzellen> (16.09.2025)

Storck, S. (2024): Reiling meldet Durchbrüche bei Glasqualität und Rückgewinnung von Silizium. EUWID Recycling und Entsorgung, Ausgabe 24/2014. <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/reiling-meldet-durchbrueche-bei-glasqualitaet-und-rueckgewinnung-von-silizium/> (08.08.2024)

Umweltbundesamt (UBA) (2024a): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#strom> (08.07.2024)

Umweltbundesamt (UBA) (2024b): Erneuerbare Energien in Zahlen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen> (08.07.2024)

Volkert, M.; Hamann, E. (2023): EEG 2023: 5 spannende Neuregelungen. <https://www.next-kraftwerke.de/energie-blog/neuregelungen-eeg-2023> (15.07.2024)

Weckend, S.; Wade, A.; Heath, G. (2016): End of Life Management. Solar Photovoltaic Panels. International Renewable Energy Agency (IRENA) and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems (IEA-PVPS) (Ed.). <https://www.osti.gov/servlets/purl/1561525/> (09.07.2024).

Wirth, H. (2024): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland - Fraunhofer ISE. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) (Hg.). <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.html> (11.04.2024)

A.6 Steckbrief „Fossile und nukleare Kraftwerke“

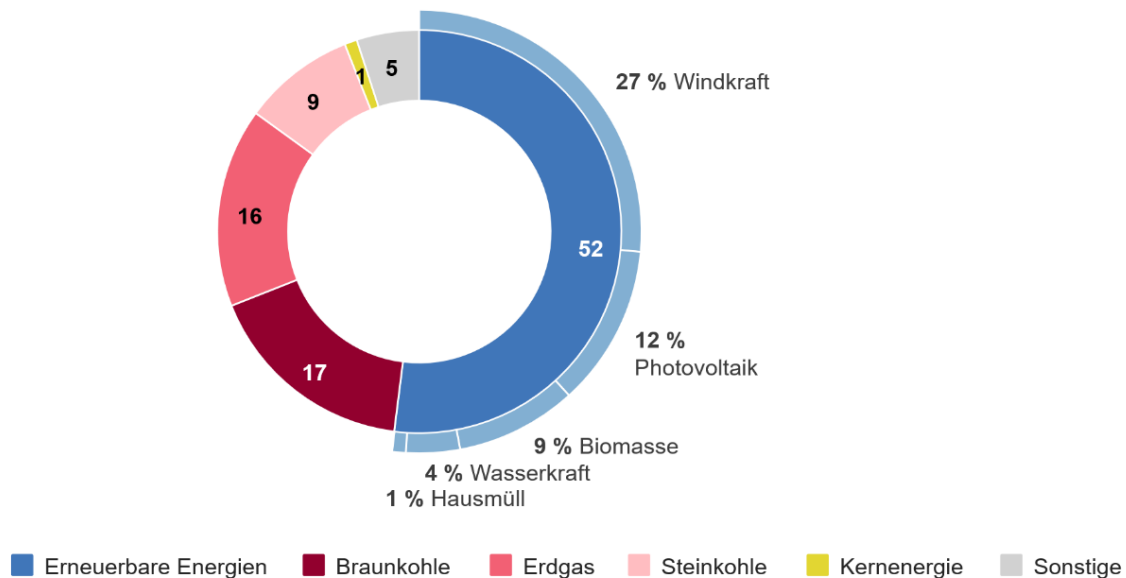
A.6.1 Status quo

Die Energieversorgung von Wirtschaft und Bevölkerung erfordert einen erheblichen Einsatz von Rohstoffen. Zur Energiegewinnung wurden in Deutschland bisher überwiegend konventionelle bzw. fossile Energieträger wie Kohle, Erdgas und Erdöl eingesetzt. Das heißt, diese Energieträger werden in entsprechenden Kraftwerken in Strom oder Wärme umgewandelt. Erneuerbare Energien wie Windkraft, Photovoltaik und Biogas sollen im Rahmen der Energiewende langfristig zur wichtigsten Energiequelle werden. Im Jahr 2023 wurden rund 515 Milliarden Kilowattstunden Strom aus inländischer Erzeugung in das deutsche Stromnetz eingespeist. Abbildung A 19 zeigt den Strommix für Deutschland für 2023. Der Anteil des Stroms aus erneuerbaren Energien an der gesamten eingespeisten Strommenge lag 2023 bei rund 52 Prozent. 42 % der gesamten Stromeinspeisung im Jahr 2023 stammte aus den fossilen Energieträgern Braunkohle, Steinkohle und Erdgas, die jeweils 17 %, 9 % bzw. 16 % der gesamten Stromeinspeisung ausmachen. Im Jahr 2023 stammte 1 % der gesamten eingespeisten Strommenge aus Kernkraftwerken. (Destatis 2024)

Abbildung A 19: Anteile an der Bruttostromerzeugung in Deutschland in 2023

Bruttostromerzeugung 2023

in %, insgesamt 515 Mrd. kWh



Rundungsbedingte Abweichung möglich. Vorläufige Angaben. Quelle: AGEE-Stat und AGEB

© Statistisches Bundesamt (Destatis), 2024

Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis 2024)

Fossile Kraftwerke

In Deutschland sind insgesamt 886 fossile Kraftwerke in Betrieb. Davon sind 36 Braunkohlekraftwerke, 74 Steinkohlekraftwerke und 776 Erdgaskraftwerke. Tabelle A 6 gibt einen Überblick über die Anzahl, die Nettoleistung auf Basis der Jahresvolllaststunden und das durchschnittliche Alter der fossilen Kraftwerke in Deutschland. Die Kraftwerke werden in zwei Gruppen unterteilt, eine Gruppe für Kraftwerke mit einer Bruttoleistung unter 300 MW und eine

Gruppe für Kraftwerke mit einer Bruttoleistung über 300 MW, da dies für die Berechnung der Rohstoffe relevant ist. Die Braunkohlekraftwerke sind mit 36 in geringster Anzahl vertreten, haben aber einen hohen Anteil an Kraftwerken mit hoher Leistung (>300 MW) und hoher Jahresvollstundenlast. Insgesamt haben die Braunkohlekraftwerke eine Nettoleistung von 15 094 MW und ein durchschnittliches Alter von 38,5 Jahren. In Deutschland sind 74 Steinkohlekraftwerke mit einer Bruttoleistung von insgesamt 18 878 MW in Betrieb, von denen 25 eine Nettoleistung von mehr als 300 MW haben. Das Durchschnittsalter der Steinkohlekraftwerke beträgt 39,6 Jahre. Erdgaskraftwerke stellen mit 776 den größten Anteil der Kraftwerke, wobei 751 davon eine Bruttoleistung von weniger als 300 MW aufweisen. Die gesamte Bruttoleistung beträgt 32 074 MW und das durchschnittliche Alter 20,4 Jahre.

Tabelle A 6: Übersicht über im Betrieb befindliche fossile Kraftwerke in Deutschland (Kraftwerksliste-Bundesnetzagentur 2024)

	< 300 MW			> 300 MW		
	Steinkohle	Braunkohle	Erdgas	Steinkohle	Braunkohle	Erdgas
Anzahl Kraftwerke	49	14	751	25	22	25
Bruttoleistg. [MW]	3 398	563	21 418	15 480	15 605	10 656
Mittelwert Alter [a]	44	46	20	32	34	28

Nukleare Kraftwerke

Mit dem 2011 beschlossenen Ausstieg aus der Kernenergie sind mittlerweile (Herbst 2025) alle Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland abgeschaltet und befinden sich in der Stilllegungsphase. Der Rückbau der Kernkraftwerke liegt in der Verantwortung der Kraftwerksbetreiber und erstreckt sich über einen Zeitraum von ca. 10 bis 15 Jahren.

Im Forschungsprojekt RecTecKA wurde die Verbesserung des Recyclings von hochwertigen metallischen Werkstoffen und Elektronikkomponenten beim Rückbau von Kernkraftwerken untersucht (Spieth-Achtnich et al. 2024). Am Standort des Kernkraftwerks Philippsburg wurde am Beispiel eines Siedewasserreaktors (KKP 1) und eines Druckwasserreaktors (KKP 2) eine umfassende und detaillierte Datenerfassung sowohl für Basismetalle bzw. -legierungen in Großbauteilen als auch für Edelmetalle in Elektronikbauteilen durchgeführt. Darauf aufbauend erfolgte eine Hochskalierung auf ganz Deutschland (Spieth-Achtnich et al. 2024). Tabelle A 7 gibt einen kurzen Überblick über die Kernkraftwerke, die für diese Massenabschätzung herangezogen wurden. Darin enthalten sind alle Reaktoren, die dauerhaft abgeschaltet sind oder sich im Rückbau befinden. Kleinere Versuchsreaktoren sind nicht enthalten. Ebenso sind die Reaktoren Greifswald 1-5 nicht in dieser Liste enthalten, da es sich um Druckwasserreaktoren sowjetischer Bauart handelt, die gegenüber westlichen Druckwasserreaktoren einige Besonderheiten aufweisen.

Tabelle A 7: Kernkraftwerke (Leistungsreaktoren)¹⁷ der Bundesrepublik Deutschland, Daten aus IAEA (2024) (Spieth-Achnich et al. 2024)

Kraftwerk	Brutto-Leistung (MW)	Netto-Leistung (MW)	Reaktortyp	Skalierungsfaktor	
Brunsbüttel	806	770	BWR	Brutto-Gesamtleistung SWR=7 654 MW, Brutto-Leistung KKP 1=926 MW →Skalierungsfaktor=8,26	
Gundremmingen a	250	237	BWR		
Gundremmingen b	1 344	1 244	BWR		
Gundremmingen c	1 344	1 249	BWR		
Isar 1	912	870	BWR		
Krümmel	1 402	1 260	BWR		
Philippsburg 1	926	864	BWR		
Würgassen	670	640	BWR		
Obrigheim	357	283	PWR		Brutto-Gesamtleistung DWR=17 126 MW, Brutto-Leistung KKP 2=1 468 MW →Skalierungsfaktor=11,66
Stade	672	630	PWR		
Biblis a	1 225	1 146	PWR_1G		
Biblis b	1 300	1 178	PWR_1G		
Brokdorf	1 480	1 307	PWR_1G		
Grafenrheinfeld	1 345	1 225	PWR_1G		
Grohnde	1 430	1 289	PWR_1G		
Mülheim-Kärlich	1 308	1 219	PWR_1G		
Neckarwestheim 1	840	805	PWR_1G		
Philippsburg 2	1 468	1 268	PWR_1G		
Unterweser	1 410	1 230	PWR_1G		
Isar 2	1 485	1 285	PWR_AR		
Emsland	1 406	1 242	PWR_AR		
Neckarwestheim 2	1 400	1 225	PWR_AR		

¹⁷ Nicht berücksichtigt in dieser Auflistung sind die sog. Prototypreaktoren, auch wenn diese zeitweise Elektrizität in das öffentliche Versorgungsnetz eingespeist (sog. Leistungsbetrieb) haben. Diese sind aufgrund ihrer Besonderheiten im Rahmen des Forschungshabens nicht zu berücksichtigen.

A.6.2 Rohstoffe in fossilen und nuklearen Kraftwerken

Fossile Kraftwerke

In Tabelle A 8 ist der Materialbedarf von Braunkohle-, Steinkohle- und Erdgaskraftwerken in Abhängigkeit von der Nettoleistung der Kraftwerke dargestellt. Die größte metallische Materialgruppe stellen unlegierte Stähle dar, in Abhängigkeit der Größe des Kraftwerks und der Art des Brennstoffs.

Tabelle A 8: Materialbedarf von Braunkohle-, Steinkohle- und Erdgaskraftwerken (Deutscher Bundestag 2023; Dones et al. 2007)

Materialgruppe	100 MW		500 MW		alle Größen
	Steinkohle	Braunkohle	Steinkohle	Braunkohle	Erdgas
	[t/MW]		[t/MW]		[t/MW]
Stahl (insgesamt)	100	130	80	100	88
unlegiert	90	117	72	90	
niedriglegiert	9	11,7	7,2	9	88
hochlegiert	1	1,3	0,8	1	
Kupfer	1,5	1,5	1,3	1,3	2
Aluminium	1	0,7	0,6	0,6	2

Nukleare Kraftwerke

Tabelle A 9 gibt einen Überblick über die Gesamtmenge der Wertstoffe der Blöcke 1 und 2 des Kernkraftwerks Philippsburg (KKP1 und KKP2). Kupfer und Kupferlegierungen stellen in beiden Blöcken die größte Menge dar (KKP 1: 1 617 t, KKP 2: 2 468 t). Mehr als 70 % davon sind in Kabeln enthalten. Nichtrostende Stähle sind in KKP 2 aufgrund der höheren Menge an nicht radioaktiv kontaminierten Bauteilen mit insgesamt 1 917 t von Bedeutung. In KKP 1 spielen sie mit 28 t eine untergeordnete Rolle. Aluminium findet sich mit einer Summe von 727 t in KKP 1 und 983 t in KKP 2 vor allem in Motoren und in Komponenten der Elektro- und Leittechnik. Edelmetalle sind in Komponenten der E- und Leittechnik und hier vor allem in Platinen enthalten. Den mengenmäßig größten Anteil hat Silber mit 1,3 t in KKP 1 und 1,8 t in KKP 2. Dagegen sind die Mengen an Gold und Palladium mit insgesamt ~ 100 kg (Summe KKP 1 und 2) geringer.

Tabelle A 9: Materialbedarf von Nuklearkraftwerken (Spieth-Achnich et al. 2024)

Block	Großkomponenten		Kabel		Motoren und Stellantriebe		Komponenten der E- und Leittechnik	
	KKP 1	KKP 2	KKP 1	KKP 2	KKP 1	KKP 2	KKP 1	KKP 2
Kupfer und Kupferlegierungen [t]	152	272	1195	1822	80	121	190	253
Aluminium [t]	28	43			128	179	571	761

	Großkomponenten		Kabel		Motoren und Stellantriebe		Komponenten der E- und Leittechnik	
Titan [t]		17						
Edelstahl [t]	26	1915					1,7	2,2
Silber [kg]							1322	1760
Gold [kg]							35,8	47,9
Palladium [kg]							8,94	12,0

A.6.3 Zukünftiges Sekundärrohstoffpotenzial

Fossile Kraftwerke

In Tabelle A 10 sind die Ergebnisse der Hochrechnung des Materialinventars aller fossilen Kraftwerke in Deutschland aufgelistet. Die Steinkohle- und Braunkohlekraftwerke sind nach ihrer Bruttoleistung aufgeschlüsselt, das durchschnittliche Alter der Kraftwerke sowie die gesamte Bruttoleistung aller Kraftwerke sind angegeben.

Tabelle A 10: Hochrechnung des Materialinventars fossiler Kraftwerke in Deutschland

	Einheit	< 300 MW		> 300 MW		Erdgas
		Steinkohle	Braunkohle	Steinkohle	Braunkohle	
Kraftwerke	Anzahl	49	14	25	22	776
Bruttoleistung Kraftwerke	MW	3639	452	13805	14642	31040
Mittelwert Alter	a	44	46	32	34	20
Stahl (insgesamt)	Tsd. t	339,8	73,2	1238,4	1560,5	2833,7
unlegiert	Tsd. t	305,8	65,9	1114,6	1404,5	
niedriglegiert	Tsd. t	30,6	6,6	111,5	140,4	2833,7
hochlegiert	Tsd. t	3,4	0,7	12,4	15,6	
Kupfer	Tsd. t	5,1	0,8	20,1	20,3	53,2
Aluminium	Tsd. t	3,4	0,4	9,3	9,4	77,1

Das Kohleausstiegsgesetz regelt deutschlandweit das Ende der Kohleverstromung (KohleAusG 2022). Bis spätestens im Jahr 2038 soll das letzte Kohlekraftwerk in Deutschland stillgelegt werden. Das Gesetz aus dem Jahr 2020 definiert den Pfad zur schrittweisen Reduzierung der Erzeugung elektrischer Energie durch den Einsatz von Kohle. Das Gesetz sah vor, dass bis zum Jahr 2022 der Anteil der Kohleverstromung durch Stein- sowie Braunkohlekraftwerke auf jeweils rund 15 Gigawatt zurückgefahren werden soll. Aktuell liegt die Gigawatt Leistung der Stein-

sowie Braunkohlekraftwerke bei ca. 35 GW und damit 5 GW über den geplanten 30 GW. Bis 2030 ist eine weitere Reduktion auf rund acht Gigawatt Leistung bei den Steinkohlekraftwerken und neun Gigawatt Leistung bei den Braunkohlekraftwerken vorgesehen. Spätestens mit Ablauf des Jahres 2038 sollen die letzten Kohlekraftwerke stillgelegt werden. (KohleAusG 2022)

Die geplante Reduktion der Leistung der der Stein- sowie Braunkohlekraftwerke auf 8 bzw. 9 GW Leistung bis 2030, würde einer jährlichen Reduktion um 1,4 GW bzw. 0,9 GW entsprechen. Die weitere Reduktion von 2030 bis 2039 entspricht einer jährlichen Reduktion um 0,9 GW für Steinkohle- bzw. 1 GW für Braunkohlekraftwerke pro Jahr. Dies entspricht einem theoretischem jährlichen Sekundärrohstoffpotenzial von 2,2 Tsd. t hochlegiertem Stahl, 3,2 Tsd. t Kupfer und 1,7 Tsd. t Aluminium aus Stein- und Braunkohlekraftwerken bis 2030. Im Zeitraum von 2031 bis 2039 liegt das gemeinsame Potenzial aus Stein- und Braunkohlekraftwerken bei 2 Tsd. t hochlegiertem Stahl, 2,6 Tsd. t Kupfer und 1,4 Tsd. t Aluminium. Dies entspricht einem Gesamt-Sekundärrohstoffpotenzial von 15,8 Tsd. t hochlegiertem Stahl, 22,1 Tsd. t Kupfer und 11,7 Tsd. t Aluminium bis 2030, bzw. 33,4 Tsd. t hochlegiertem Stahl, 45,9 Tsd. t Kupfer und 24 Tsd. t Aluminium welche bis 2039 als Sekundärrohstoffe zur Verfügung ständen. Dabei ist zu beachten, dass der Rückbau solch großer technischer Anlagen über einen längeren Zeitraum stattfindet und die Sekundärrohstoffe somit nicht unmittelbar verfügbar sind.

Tabelle A 11: Abschätzung des Sekundärrohstoffpotenzial bis 2039 und das Gesamtrohstoffpotenzial

[Tsd. t]	Sekundärrohstoffpotenzial pro Jahr 2024 - 2030		Sekundärrohstoffpotenzial pro Jahr 2031 - 2039		Gesamtmenge Sekundärrohstoffpotenzial	
	Steinkohle	Braunkohle	Steinkohle	Braunkohle	2024 - 2030	2031 - 2039
Stahl (insgesamt)	122,4	103,0	80,0	115,0	1577,9	1755,0
unlegiert	110,1	92,7	72,0	103,5	1420,1	1579,5
niedriglegiert	11,0	9,3	7,2	10,4	142,0	158,0
hochlegiert	1,2	1,0	0,8	1,2	15,8	17,6
Kupfer	1,9	1,3	1,2	1,4	22,1	23,8
Aluminium	1,1	0,6	0,7	0,7	11,7	12,3

Tabelle A 12 zeigt die Anzahl der bisher in Deutschland stillgelegten fossilen Kraftwerke. Auch hier sind die Kraftwerke nach ihrer Bruttoleistung gegliedert und das durchschnittliche Alter der Kraftwerke zum Zeitpunkt der Stilllegung angegeben.

Tabelle A 12: Durchschnittliches Alter stillgelegter fossiler Kraftwerke in Deutschland (Kraftwerksliste Bundesnetzagentur 2024)

	< 300 MW		> 300 MW		Erdgas
	Steinkohle	Braunkohle	Steinkohle	Braunkohle	
Anzahl stillgelegter Kraftwerke	23	36	23	6	73
Mittelwert Alter [a]	46	48	35	43	30

Vergleicht man die Altersstruktur der in Betrieb befindlichen Kraftwerke aus Tabelle A 9 mit dem durchschnittlichen Alter der Kraftwerke bei Stilllegung aus Tabelle A 12, fällt auf, dass insbesondere die Steinkohle- und Braunkohlekraftwerke mit einer Bruttoleistung unter 300 MW mit einem Durchschnittsalter von 44 bzw. 46 Jahren nahe am durchschnittlichen Alter der Kraftwerke bei ihrer Stilllegung (Steinkohle: 46, Braunkohle: 48) liegen. Daher sind hier zukünftig die größten Sekundärrohstoffpotenziale zu erwarten. Obwohl in Deutschland 63 Stein- und Braunkohlekraftwerke mit einer Bruttoleistung von weniger als 300 MW in Betrieb sind, sind die zu erwartenden Gesamtmassen gering, da es sich um kleinere Kraftwerke handelt. Insgesamt werden in diesen Kraftwerken 4,1 Tsd. Tonnen hochlegierter Stahl, 5,9 Tsd. Tonnen Kupfer und 3,8 Tsd. Tonnen Aluminium eingesetzt.

Das Durchschnittsalter der Stein- und Braunkohlekraftwerke mit einer Leistung von mehr als 300 MW ist deutlich jünger als das der kleineren Kraftwerke, was den Trend zum Bau größerer Kraftwerke mit zunehmendem technologischem Fortschritt widerspiegelt. Vergleicht man das Alter der in Betrieb befindlichen Steinkohlekraftwerke (>300 MW) in Deutschland mit den bereits stillgelegten Kraftwerken dieses Typs, so zeigt sich, dass die Steinkohlekraftwerke <300 MW im Durchschnitt nach 35 Betriebsjahren stillgelegt wurden. Das Durchschnittsalter der in Betrieb befindlichen Kraftwerke dieses Typs liegt bei 32 Jahren. Es ist daher davon auszugehen, dass zumindest ein Teil des Steinkohlekraftwerksparks mit einer Leistung von mehr als 300 MW in relativ naher Zukunft stillgelegt wird und die Wertstoffe als Sekundärrohstoffe zur Verfügung stehen. Insgesamt sind in den Steinkohlekraftwerken (>300 MW) 12,4 Tsd. t hochlegierter Stahl, 20,1 Tsd. t Kupfer und 9,3 Tsd. t Aluminium vorzufinden. Bei den Braunkohlekraftwerken liegt das Durchschnittsalter der in Betrieb befindlichen Kraftwerke bei 34 Jahren, das der stillgelegten bei 43 Jahren. Hier ist also noch mit einer deutlich längeren Laufzeit eines Großteils des Bestandes zu rechnen. Insgesamt werden in Braunkohlekraftwerken (>300 MW) 15,6 Tsd. t hochlegierter Stahl, 20,3 Tsd. t Kupfer und 9,4 Tsd. t Aluminium eingesetzt.

Der Gaskraftwerkspark in Deutschland besteht überwiegend aus vergleichsweise jungen Kraftwerken (Durchschnittsalter: 20 Jahre) mit geringer Bruttoleistung, die für einen dynamischen Parallelbetrieb mit erneuerbaren Energien ausgelegt sind. Die Abschätzung des zukünftigen Sekundärrohstoffpotenzials über das Alter der Kraftwerksflotte stellt nur einen Aspekt zur Abschätzung des zukünftigen Potenzials dar. Ein weiterer wichtiger Faktor sind die tatsächlich gefahrenen Volllaststunden. Zudem bleibt unberücksichtigt, dass moderne Kraftwerke aufgrund von Technologie- und Materialfortschritten längere Laufzeiten aufweisen können.

Nukleare Kraftwerke

Zur Ermittlung des zukünftigen Sekundärrohstoffpotenzials der in Deutschland bis 2023 betriebenen Siede- und Druckwasserreaktoren wurde eine Hochskalierung der Wertmetalle bzw. Wertlegierungen auf Basis der KKP 1 (Siedewasserreaktor) und KKP 2 (Druckwasserreaktor) vorgenommen. Nicht berücksichtigt wurden dabei Detailunterschiede zwischen einzelnen Reaktorgenerationen etc. innerhalb der jeweiligen Siedewasserreaktor- bzw. Druckwasserreaktorfamilie. Mit dieser Einschränkung konnte die Hochrechnung einfach über die installierten Bruttoleistungen der Siede- und Druckwasserreaktoren in Deutschland vorgenommen werden (siehe auch Tabelle A 13). Des Weiteren sind in den ermittelten Mengen der Hochskalierung nur solche Stoffströme enthalten, die ohne Probleme in die Freigabe überführt werden können, d.h. radioaktiv kontaminierte oder gar aktivierte Komponenten sind nicht Bestandteil der hochskalierten Daten. In Tabelle A 13 sind die Inventare der Wertmetalle und Legierungen für alle in Deutschland installierten Siede- und Druckwasserreaktoren zusammengefasst.

Tabelle A 13: Inventare an Wertmetallen und Wertlegierungen aller in Deutschland installierten Siede- sowie Druckwasserreaktoren (Spieth-Achtnich et al. 2024)

	Materialien	Menge [t]	Materialwert [Mio. €]
Alle Druckwasserreaktoren DE	Kupfer und Kupferlegierungen	28.762	311
	Aluminium	11.457	
	Titan	201	
	Edelmetalle	21	
	Edelstahl	22.357	
Alle Siedewasserreaktoren DE	Kupfer und Kupferlegierungen	13.354	122
	Aluminium	5.996	
	Titan	-	
	Edelmetalle	11	
	Edelstahl	233	

Aus den Ergebnissen der Hochskalierung lässt sich ableiten, dass für die Druckwasserreaktoren in Deutschland mengenmäßig vor allem große Mengen an Kupfer und Kupferlegierungen, aber auch an Edelstählen und Aluminium als potenzielle zukünftige Sekundärrohstoffe zu gewinnen sind. Bei den Siedewasserreaktoren dominieren ebenfalls Kupfer und Kupferlegierungen, aber auch Aluminium stellt ein relevantes Potenzial dar. Die hochskalierten Edelstahlmengen sind bei den Siedewasserreaktoren deutlich geringer als bei den Druckwasserreaktoren. Dies ist damit zu erklären, dass viele Großkomponenten, die bei Druckwasserreaktoren leicht freigesetzt werden können, bei Siedewasserreaktoren radioaktiv kontaminiert sind und daher wegen der aufwendigen Dekontaminationsmaßnahmen und Freigabeverfahren bei dieser Hochskalierung nicht berücksichtigt wurden.

Hochskaliert ergibt sich für alle Druckwasserreaktoren in Deutschland eine Materialmenge von 22,4 Tsd. t Edelstahl, 28,8 Tsd. t Kupfer und 11,5 Tsd. t Aluminium. Dies entspricht einem Materialwert von etwas über 300 Mio. Euro. Für Siedewasserreaktoren beläuft sich die Hochrechnung auf gut 0,2 Tsd. t hochlegierter Stahl, 13,4 Tsd. t Kupfer und 6 Tsd. t Aluminium mit einem Materialwert von rund 130 Mio. Euro. Durch ein hochwertiges Recycling der abgeschätzten Metallmengen ergibt sich ein Einsparpotenzial an Treibhausgasemissionen von insgesamt 846 Tsd. t CO₂-Eq (Spieth-Achtnich et al. 2024).

A.6.4 Handlungsbedarf für eine optimierte Urban Mining Strategie

- Der Rückbau von fossilen und nuklearen Kraftwerken in Deutschland stellt u.a. für Kupfer, Aluminium und Edelstähle eine attraktive und bedeutende Quelle für Sekundärrohstoffe dar.

- ▶ Für die Abschätzung des Sekundärrohstoffpotenzials von Edelmetallen wie Gold, Silber und Palladium aus fossilen Kraftwerken liegen keine Daten vor. Daten könnten skaliert von Kernkraftwerken übernommen werden, jedoch sind die Anforderungen in Kernkraftwerken höher und daher eine direkte Skalierung über die Bruttoleistung fehlerbehaftet. Erhebung der Edelmetallmengen in fossilen Kraftwerken sollte Teil zukünftiger Forschungsprojekte sein.
- ▶ Um eine möglichst zeitnahe Erschließung des Sekundärrohstoffpotenzials und ein optimales Recycling zu ermöglichen, sind zügige und gut strukturierte Rückbauprozesse erforderlich. Dazu sollte auf eine sortenreine Trennung von Komponenten und Bauteilen besonders geachtet werden.
- ▶ In den nächsten Jahren sind noch erhebliche Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen für eine mögliche Dekontamination und nachfolgende Ausweitung der Freigabe von Komponenten aus Kernkraftwerken erforderlich. Weitere Potenziale sind in diesem Zusammenhang noch für einzelne, besonders relevante Komponenten zu erschließen. Angesichts der erheblichen und weiter steigenden Endlagerkosten für radioaktiv kontaminierte Abfälle sind durch eine Verringerung der entsprechenden Abfallmengen entsprechend positive wirtschaftliche Effekte zu erwarten.

A.6.5 Quellenverzeichnis Steckbrief „Fossile und nukleare Kraftwerke“

Deutscher Bundestag (2023): Material- und Ressourceneinsatz für den Bau von Kraftwerken, Ausarbeitung, Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestags. <https://www.bundestag.de/resource/blob/928968/WD-5-138-22-pdf.pdf> (12.09.2025)

Dones, R.; Bauer, C.; Bolliger, R.; Burger, B.; Heck, T.; Röder, A.; Emmenegger, M. F.; Frischknecht, R.; Jungbluth, N.; Tuchschnid, M. (2007): Life Cycle Inventories of Energy Systems: Result for Current Systems in Switzerland and other UCTE Countries. https://ecolo.org/documents/documents_in_english/Life-cycle-analysis-PSI-05.pdf (12.09.2025)

IAEA (2024): Country statistics - Germany, PRIS database. <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/Country-Details.aspx?current=DE> (12.09.2025)

KohleAusG (2022): Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung und zur Änderung weiterer Gesetze (Kohleausstiegsgesetz), Kohleausstiegsgesetz vom 8. August 2020 (BGBl. I S. 1818), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 19. Dezember 2022 (BGBl. I S. 2479) geändert worden ist. <https://www.gesetze-im-internet.de/kohleausg/BJNR181800020.html> (12.09.2025)

Kraftwerkliste Bundesnetzagentur (2024): Kraftwerkliste der Bundesnetzagentur, bundesweit; alle Netz- und Umspannebenen, Stand 15. 04.2024 <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Elektrizitaetund-Gas/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerkliste/start.html> (15.04.2024)

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2024): Bruttostromerzeugung in Deutschland für 2023. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Grafik/Interaktiv/bruttostromerzeugung-erneuerbare-energien.html> (21.02.2025)

Spieth-Achnich, A.; Buchert, M.; Usthalova, V.; Pistner, C.; Mayer, F.; Schön-Blume, N.; Claus, M.; Schütz, J.; Wille, K.; Kranz, S.; Etes, R.; Luh, J.; Goldmann, D. (2024): (RecTecKA) – Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben. <https://www.oeko.de/publikation/recycling-von-technologiemetallen-aus-dem-rueckbau-kerntechnischer-anlagen-unter-beruecksichtigung-strahlenschutzrechtlicher-vorgaben-rectecka/> (12.09.2025)

A.7 Steckbrief „Mineralische Baustoffe im Hochbau sowie in Straßen und Brücken“

A.7.1 Status quo

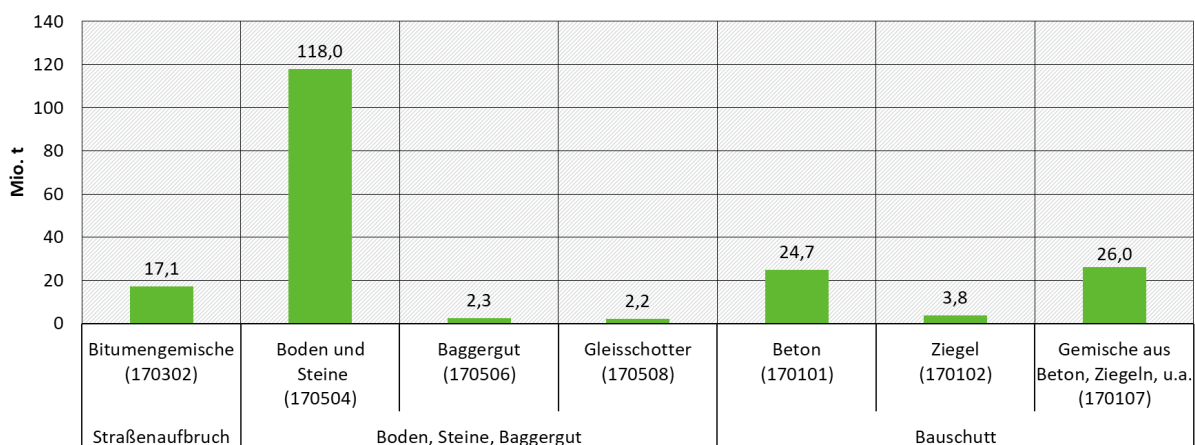
Die Bereiche Hoch- und Tiefbau machen den überwiegenden Teil der Massen im anthropogenen Lager aus. Rund 55 % entfallen auf Wohn- und Nichtwohngebäude, rund 44 % der Lagermasse sind im Tiefbau gebunden, der die Infrastrukturen für Verkehr, Trink- und Abwasser, Energie sowie Informations- und Kommunikationsnetze umfasst (UBA 2022).

Dieser Steckbrief bezieht sich auf das Lager mineralischer Materialien und dessen Dynamik in Wohn- und Nichtwohngebäuden sowie in Straßen und Brücken. Weitere Teilbereiche mit dem gegenüber geringerer Mengenrelevanz wie Schienen bzw. Bahntrassen, Tunnel sowie wasserbauliche Anlagen werden nicht mit aufgeführt. Im Fokus stehen die Rohstoffe Kies und Splitt, Sand und Beton.

Aufkommen und Verwertung von Bauabfällen

Bauabfälle müssen gemäß § 8 Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) getrennt erfasst und vorrangig einer Wiederverwendung oder einem Recyclingverfahren zugeführt werden. Tatsächlich werden jedoch knapp 50 % des Bauschutts aus dem Hochbau als gemischte, nicht sortenreine Fraktionen erfasst (siehe Abbildung A 20).

Abbildung A 20: Aufkommen der Bauabfälle in Deutschland im Jahr 2022



Quelle: Eigene Darstellung ifeu basierend auf Destatis (2024a)

Wie aus Abbildung A 20 zu entnehmen ist, betrug die **Fraktion Boden, Steine und Baggergut** (Nr. 17 05 nach Abfallverzeichnisverordnung, AVV) im Jahr 2022 rund 120 Mio. t¹⁸. Darunter fällt neben Boden und Steine (AVV 17 05 04) und Baggergut (AVV 17 05 06) auch Gleisschotter (AVV 17 05 08). Diese Fraktion allein hat einen Anteil von 60 % an den statistisch erfassten Bauabfällen. Wie die aktuell verfügbare Analyse des Bundesverbands Baustoffe (bbs) für das Jahr 2022 darlegt, wurden von der gesamten Fraktion rund drei Viertel in übertägigen Abgrabungen bzw. im Deponiebau verwertet, nur 11,5 % wurden zu Recyclingbaustoffen verarbeitet. Beseitigt wurden weiterhin rund 13 % (Kreislaufwirtschaft Bau 2024). Die Aufbereitung von Altmaterial aus **Frostschutz- und Schottertragschichten** kann über eine Absiebung der Feianteile

¹⁸ Das tatsächliche Aufkommen dieser Fraktion dürfte deutlich über den statistisch erfassten Mengen liegen. Bodenaushub zählt – sofern es sich um nicht kontaminiertes Bodenmaterial handelt – nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) rechtlich nicht als Abfall. Somit werden Böden, die direkt am Anfallort verwertet werden oder unmittelbar in einer anderen Baumaßnahme eingesetzt werden, über die Abfallstatistik nicht erfasst (Muchow et al. 2022).

erfolgen. Dieses Material kann dann zum Neuaufbau des Oberbaus der Straße, insbesondere für Frostschutzschichten oder kombinierte Frost- und Schottertragschichten, wiedereingesetzt werden.

Die Fraktion **Bauschutt** (AVV 17 01) betrug 2022 etwa 55 Mio. t, wovon ca. 82 % einem Recycling zugeführt und überwiegend im Straßenbau eingesetzt wurden (Kreislaufwirtschaft Bau 2024). Im Jahr 2020 lag diese Fraktion noch bei rund 60 Mio. t, wovon beinahe 80 % recycelt wurden (Kreislaufwirtschaft Bau 2023). Hierbei ist allerdings zu beachten, dass gemischt erfasseter Bauschutt (AVV 17 01 07) neben Ziegel (AVV 17 01 02) und Fliesen und Keramik (AVV 17 01 03) auch relevante Mengen an Beton (AVV 17 01 01) enthält. Aktuell stehen keine repräsentativen wissenschaftlichen Untersuchungen über die Zusammensetzung des gemischt erfassten Bauschutts zur Verfügung (Muchow et al. 2022). Allerdings wird geschätzt, dass Beton den größten Masseanteil in den Bauschuttgemischen ausmacht: verschiedene Studien einzelner Bundesländer haben gezeigt, dass Bauschutt bis zu 80 % Beton enthalten kann (Muchow et al. 2022). Die daraus gewonnenen Recyclingbaustoffe werden in der Regel im ungebundenen Wege- oder Erdbau eingesetzt. Die Zuordnung von Bauschutt zu gemischtem Bauschutt erfolgt bundesweit nicht einheitlich und häufig in Abhängigkeit von der Verwertbarkeit (u. a. aufgrund von regionalen und betriebsinternen Aufbereitungs- und Absatzmöglichkeiten).

Beton lässt sich in Bauschuttrecyclinganlagen zu einer Gesteinskörnung aufbereiten, die in Betonwerken wiedereingesetzt werden kann (Knappe et al. 2025). Derzeit werden nur geringe Mengen Bauschutt als Betonzuschlag im Hochbau eingesetzt. Ausschlaggebend hierfür sind u.a. die höheren Anforderungen an die Aufbereitung und Nutzung von RC-Gesteinskörnungen im Hochbau in Verbindung mit der meist hohen Nachfrage im Straßenbau. Beton ist nach den Regelwerken des Straßenbaus und der Betonindustrie als Sekundärrohstoff (rezyklierte Gesteinskörnungen) in hohen Anteilen zulässig. Fahrbahnbetone von Bundesautobahnen werden vor Ort gebrochen und entweder zum Bodenaustausch, d.h. zur Erhöhung der Tragfähigkeit des Planums, eingesetzt oder zu einer qualifizierten Frostschutzschicht aufgearbeitet (UBA 2019).

Bitumenhaltiger **Straßenaufbruch** (AVV 17 03 02), wurde nach Kreislaufwirtschaft Bau (2024) im Jahr 2022 zu über 90 % einem hochwertigen Recycling zugeführt, was darauf zurückzuführen ist, dass die so verwendeten Baustoffe aufgrund der spezifischen Bauweise als Monofraktionen anfallen (Muchow et al. 2022). Etwa 5 % wurden im Jahr 2022 im Rahmen von Deponiebau bzw. in der Verfüllung von Abgrabungen verwertet; weitere 2 % wurden auf Deponien beseitigt (Kreislaufwirtschaft Bau 2024). Die Rückführung von Asphalt erfolgt entweder durch den Einsatz in Mischwerken durch Zugabe von Bitumen oder durch Aufarbeitung und Wiedernutzung direkt auf der Baustelle. Dabei werden vorhandene Deckschichten erwärmt und durch Zugabe von Gesteinskörnungen, Bitumen oder neuem Asphalt wieder eingebaut (Deutscher Asphaltverband e. V. [DAV] 2014).

A.7.2 Materiallager im Hochbau sowie in Straßen und Brücken

Aktuelle Daten weisen ein verbautes Materiallager in Höhe von 28 Mrd. t im deutschen Gebäudebestand aus (Schinke et al. 2025). Laut UBA entfallen davon 93 % auf nichtmetallische mineralische Materialien und 86 % auf nichtmetallische mineralische Massenbaustoffe wie Beton, Mauersteine, Sand, Schotter und Kies (Schiller et al. 2015). Hochbau (53 %) und Tiefbau (47 %) tragen zu ähnlichen Anteilen zum Anthropogenen Lager mineralischer Baustoffe bei. Bei den Flüssen in und aus dem Lager dominieren die Mengen im Tiefbau (ca. 60 % der Zuflüsse und ca. 85 % der abgehenden Mengen; basierend auf Schiller et al., 2015). Der überwiegende Teil der dem Tiefbau zugeordneten Materialien findet sich in Straßen. Im Hochbau finden sich erhebliche

Anteile mineralischer Baustoffe in Kunststeinen wie Beton, Kalksandstein, Porenbeton, Mörtel. Dagegen dominieren im Tiefbau Gesteinsschüttungen (Schiller et al. 2015).

Hochbau

Der Gebäudebestand in Deutschland hat sich in den letzten Jahrzehnten stetig vergrößert (Destatis 2022). Damit steigt auch die Summe der Materialien, die in der gebauten Umwelt lagern, um ca. 0,8 Mrd. t an Material pro Jahr (UBA 2022). Laut neuen Berechnungen beinhalten die 51,6 Millionen Gebäude in Deutschland ca. 20,8 Mrd. t Baumaterial, wovon Beton mit 46 % den Großteil ausmacht und mineralische Baustoffe insgesamt etwa zwei Drittel. Diese Materialmengen hat das Materialkataster des IÖR mittels 3D-Gebäudemodellen erfasst und systematisch aufgearbeitet, um die Informationen der Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen (s. Schinke et al. 2025). Diese Informationen, die in Materialkennzahlen für verschiedene Gebäudetypen münden, liefern Richtwerte für Baumaterialzusammensetzung vergleichbarer Gebäude und begründet damit Potenziale für den strategischen Ausbau regionaler Materialkreisläufe.

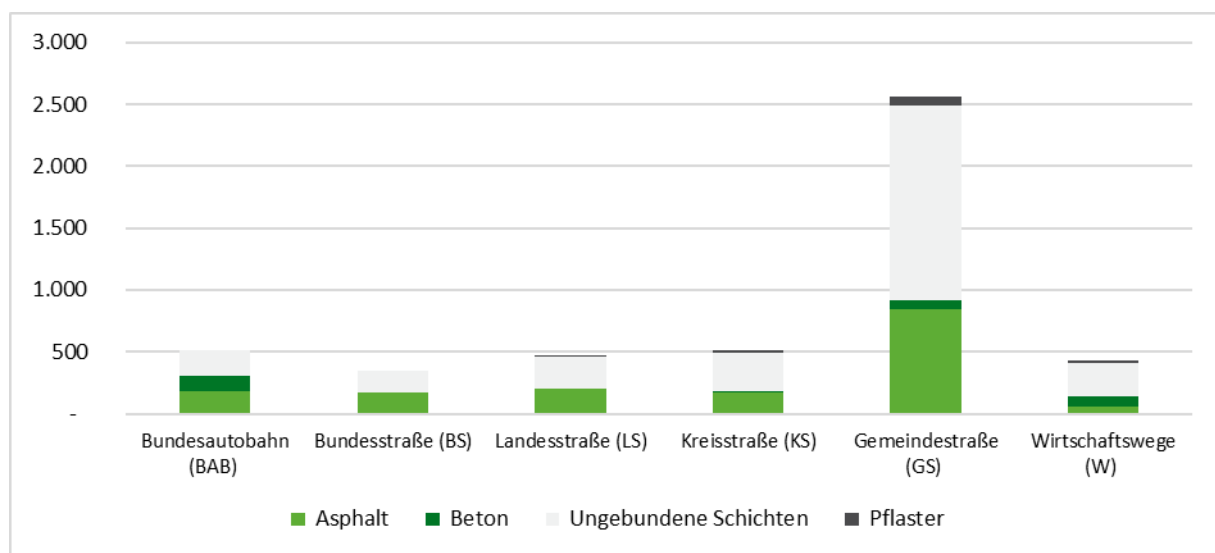
Straßen und Brücken

Das überörtliche **Straßennetz** Deutschlands betrug im Jahr 2024 rund 230.000 km, sonstige Straßen werden auf weitere 600.000 km geschätzt (Bundesministerium für Verkehr [BMV] 2024). Für die Straßenkörper inklusive der Wirtschaftswege ergibt sich ein Materiallager von etwa 4,2 Mrd. Tonnen (zum Jahr 2014). Hierzu tragen die ungebundenen Schichten, d.h. die Frostschutz- und Schottertragschichten, entscheidend bei. Aufgrund des großen Anteils der Gemeindestraßen am gesamten Straßennetz, binden diese allein deutlich mehr als 50 % der Materialien. Die Bundesfernstraßeninfrastruktur stößt aufgrund wachsender Beanspruchung und ihres steigenden Alters in den kommenden Jahren auf Anforderungen, die für einen großen Teil des Bestands eine Grunderneuerung der Fahrbahnbefestigungen erfordert (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [BMVI] 2016).

Der Straßenoberbau besteht aus Frostschutz- und Schottertragschichten (aus Sand, Kies und Schotter) sowie Tragschichten mit Bindemittel und einer Deckschicht aus Asphalt, Beton oder einer Pflasterung. Darüber hinaus sind in der Straßeninfrastruktur auch Erdbaumassen enthalten, insbesondere zur Aufschüttung von Dämmen und Wällen oder als Bodenaustauschmaterial zur Verbesserung der Tragfähigkeit des Untergrundes (Knappe 2022).

Für die Straßenoberbauten inklusive der Wirtschaftswege ergibt sich nach Knappe et al. (2015) Stand 2014 ein Materiallager von etwa 4,8 Mrd. t, wozu die ungebundenen Schichten, d.h. die Frostschutz- und Schottertragschichten, entscheidend beitragen. Aufgrund des großen Anteils der Gemeindestraßen am gesamten Straßennetz binden diese allein deutlich mehr als 50 % der Materialien (siehe Abbildung A 21) (Knappe et al. 2015). Bergmann et al. (2015) ermittelten für das Materiallager des Straßenoberbaus ca. 4,4 Mrd. t mineralische Rohstoffe. Nach Schiller et al. (2015) sind im Materiallager der gesamten Verkehrsinfrastruktur in Deutschland ca. 9,3 Mrd. t mineralische Rohstoffe gebunden, wovon ca. 80 %, also ca. 7,4 Mrd. t auf die reine Straßeninfrastruktur entfallen.

Abbildung A 21: Materiallager des Straßenkörpers [Mio. t]



Quelle: eigene Darstellung IÖR nach Knappe et al. 2015

Als Hauptmaterialien des Brückenbaus kommen in Deutschland im Wesentlichen Beton, Stahl oder Kombinationen daraus als Stahlverbundbrücken zum Einsatz. Der überwiegende Anteil der Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen besteht mit rund 70 %, gemessen an der Brückenfläche, aus Spannbeton (BMV 2023). Nach Knappe et al. 2015 befinden sich im Materiallager der Brückenbauwerke ca. 107,1 Mio. t Beton. Bergmann et al. (2015) ermittelten 86,5 Mio. t Beton in Brückenbauwerken. Schiller et al. (2015) geben keine separate Abschätzung für Brücken an, schätzen aber die Gesamtheit der Straßenausstattung, Lärmschutzwände und Ingenieurbauwerke der Straßeninfrastruktur auf ca. 4 % des gesamten Materialbestandes des anthropogenen Lagers.

A.7.3 Zukünftiges Sekundärrohstoffpotenzial

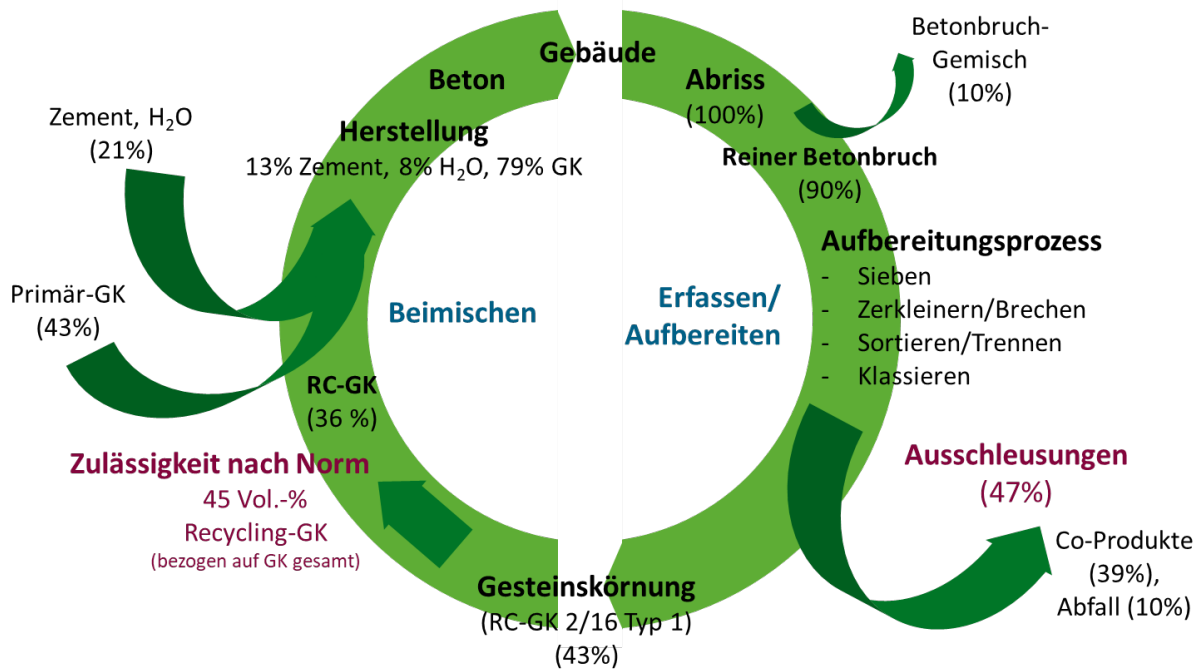
Mineralische Recycling-Baustoffe werden heute sowohl im Bereich des Tiefbaus als auch im Hochbau (z. B. als RC-Gesteinskörnung im Beton) eingesetzt. Im Folgenden werden auf Basis bestehender Studien die zukünftigen Sekundärrohstoffpotenziale im Hoch- und Tiefbau abgeschätzt.

Hochbau

Auf Basis von Recycling-Anteilen unterschiedlicher Bauprodukte hat das BBSR Recyclingpotenzialrechnungen durchgeführt (Deilmann et al. 2014, 2017). Die Recycling-Anteile sind dabei sehr optimistische Zukunftsannahmen, die von den damals beteiligten Fachverbandsvertreter*innen geschätzt wurden. (Deilmann et al. 2014, 2017) In einer aktuelleren Kalkulation sind gleichfalls Recyclingpotenzialrechnungen durchgeführt worden, jedoch beispielhaft für Beton und ohne die geschätzten Recyclinganteil-Annahmen der BBSR-Studien. Diese Annahmen wurden durch konkrete Prozesskettenbetrachtungen ersetzt. Sie berücksichtigen alle notwendigen Aufbereitungsprozesse sowie Einbaustandards/-regulierungen für Recyclingmaterialien vom Abbruch-/Ausgangsmaterial bis zu Recyclingmaterial in einem neuen Bauprodukt (Abbildung A 22) (Bimesmeier et al. 2020; Gruhler & Schiller 2023). Auf diesem Prozesskettenwissen basierend wurden die für Deutschland neu kalkulierten Zu- und Abflüsse von Beton analysiert, um Recyclingpotenziale genauer zu benennen (Abbildung A 23). Wie die Prozesskette von Beton zeigt (vgl.

Abbildung A 22), ergeben sich durch unterschiedliche Bearbeitungsprozesse aus 100 % Beton 43 % Recycling-Gesteinskörnung (RC-GK) 2/16.

Abbildung A 22: Prozesskettenbetrachtung - Verarbeitung von reinem Betonbruch zu Recyclinggesteinskörnung und ihrer Verwendung in Hochbau-Fundamentbeton

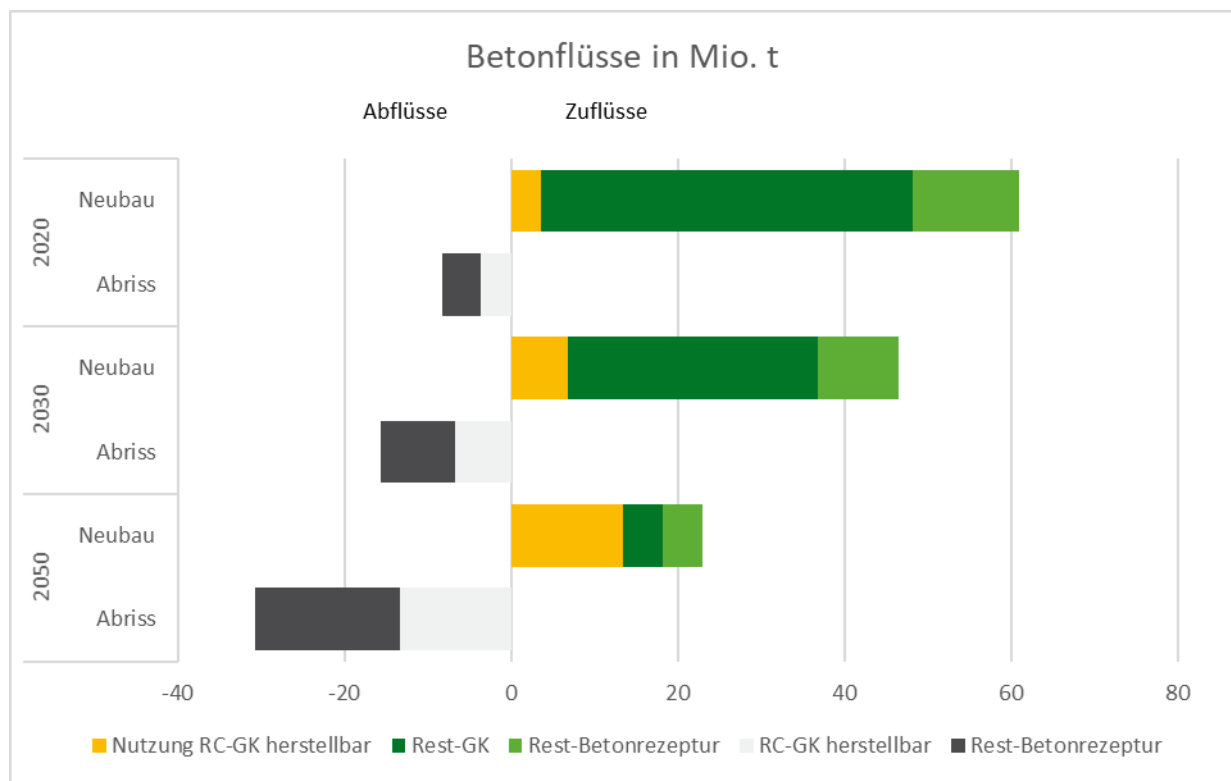


Quelle: IÖR-ISBE

Die aktualisierte Berechnung basiert zudem auf aktualisierten Berechnungsgrundlagen zur Berechnung der Ab- und Neubauquote auf Basis von Mittelwerten aus der Zeitspanne 2010-2021, ebenso wie die Korrekturfaktoren für Abriss und Neubau. Hierfür wurde ebenso eine aktuellere Bevölkerungsvorausberechnung herangezogen. Variante G2L2W2 der 15. koordinierten Bevölkerungsvorausrechnung geht von einer moderaten Entwicklung bei mittlerem Wanderungssaldo aus (Destatis 2022).

Auf Basis dieser Annahmen wurden die Berechnungen nach Deilmann (2017) in vereinfachter Art und Weise wiederholt. Dabei ergeben sich absoluten Mengen von 3,6 Mio. t in 2020, 6,8 Mio. t in 2030 und 13,3 Mio. t RC-GK 2/16 in 2050. Diese RC-GK-Mengen könnten jeweils vollständig bei der Herstellung von Hochbaubeton für Neubauzwecke genutzt werden. Die Gesteinskörnung im Beton (ca. 79 % der Gesamt Rezeptur) könnte so 2010 zu 8 %, 2030 zu 18 % und 2050 zu 74 % durch RC-GK ersetzt werden. 2050 würden die möglichen Anteile (74 %) sogar die aktuell laut Norm vorgegebenen $\geq 45 \%$ übersteigen (siehe Abbildung A 23).

Abbildung A 23: Zu- und Abflüsse von Beton inklusive der Potenziale für Herstellung und Einsatz von RC-GK 2/16 Typ 1



Quelle: Eigene Darstellung IÖR

Entsprechend ist die Summe der Materialzuflüsse, auch aufgrund der langen Lebensdauer von Wohn- sowie Nichtwohngebäuden und Infrastruktur, derzeit deutlich größer als die der Abflüsse (Destatis 2022).

Hierbei zeigt sich ähnlich wie bei Deilmann (2017), dass sich, während sich Neubauaktivitäten verringern werden, der Abriss von Bestandsgebäuden deutlich ansteigen wird, sodass im Jahr 2050 ein Großteil der benötigten Baumaterialien direkt aus dem anthropogenen Lager stammen könnte.

Die hier dargestellten Ausführungen zeigen, dass Recycling aus materieller Sicht (Reduktion des Bedarfs an Primärmaterial durch verstärkten Einsatz von RC-Material) Sinn ergibt. Allerdings beziehen sich diese Studien auf deutschlandweite Potenziale, die aufgrund der Methoden vereinfacht und nicht regionalisiert dargestellt werden. Sie können daher regionale Potenziale und Bedarfe nicht ausdifferenzieren.

Straßen und Brücken

Im Straßenbau entstehen die Massenflüsse grundsätzlich aus dem Zubau von Straßenkörpern, ihrem Rückbau, einem Ausbau (Veränderung des Querschnitts) oder den notwendigen Erhaltungsmaßnahmen.

Mittelwerte zur prognostizierten Bautätigkeit wurden von Knappe et al. (2015) für fünf Szenarien abgeschätzt. Für das Referenzszenario („Business as usual“) wurden Annahmen zur gängigen Praxis und Recyclingquoten der einzelnen Materialien im Straßenbau unterstellt. Sowohl Pflaster als auch Beton und das Material ungebundener Schichten werden als RC-Material in ungebundenen Schichten eingesetzt. Die Szenarien 1–4 zeigen mögliche Korridore der Entwicklung

bis zu den Jahren 2030 und 2050 auf. Für weitere Details siehe Knappe et al. (2015). Im Folgenden werden die Ergebnisse des Referenzszenarios aus Knappe et al. (2015) beschrieben.

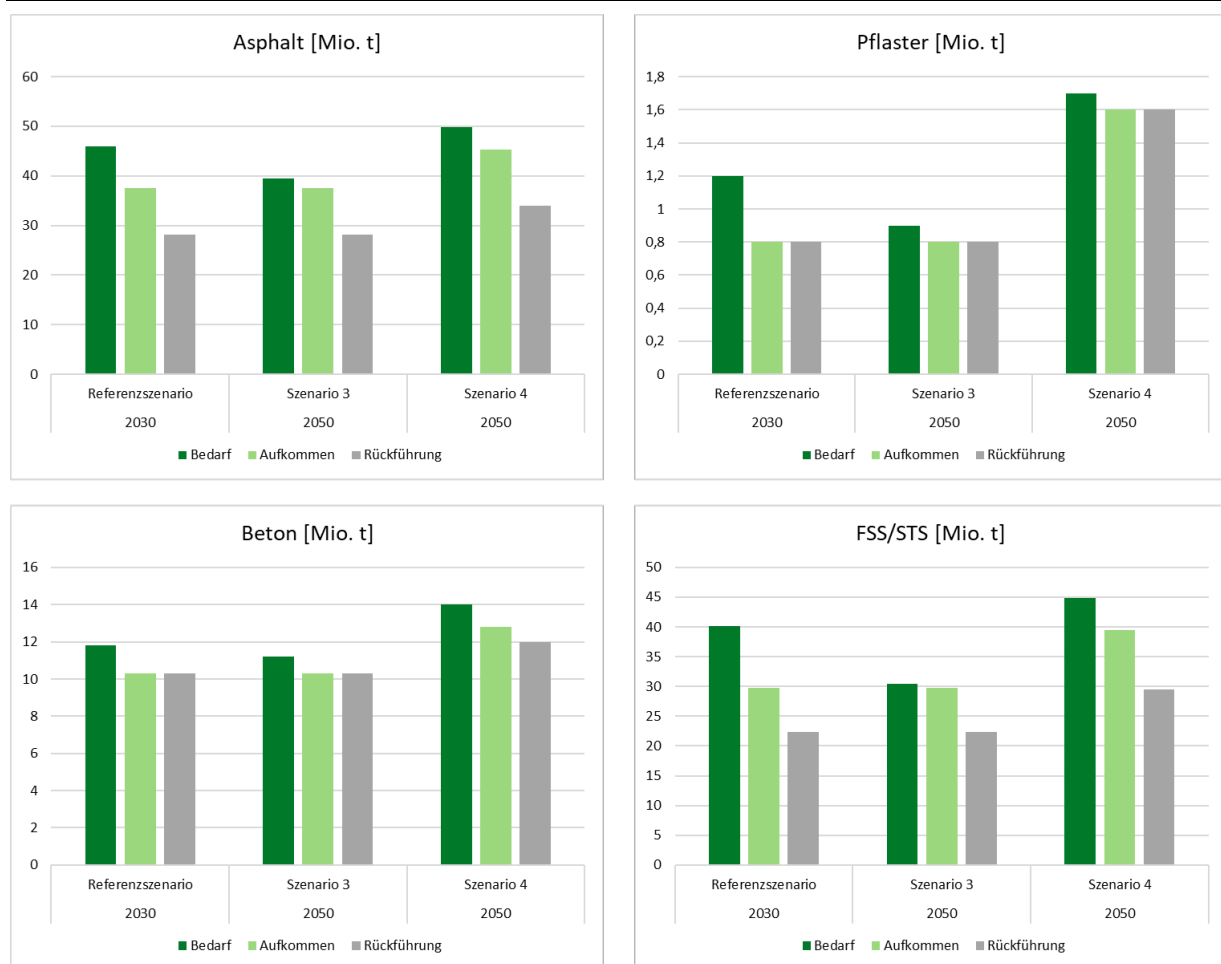
Tabelle A 14: Zentrale Annahmen der Szenarien

Straßenmaterial	Referenz (2030)	Szenario 3 (2050)	Szenario 4 (2050)
Siedlungsflächenentwicklung	30 ha/Tag	0 ha/Tag	15 ha/Tag
Planzahlen Bundesstraßen	Mittlere	Kein Zuwachs	50 % von Referenz
Rückführung:			
Asphalt	75 %	75 %	75 %
Beton/Pflaster	100 %	100 %	100 %
Ungeb. Schichten	75 %	75 %	75 %

Quelle: Auszug aus Knappe et al. (2015)

Im Referenzszenario werden bis zum Jahr 2030 jährlich rund 100 Mio. t an Rohstoffen für die prognostizierte Bautätigkeit im Tiefbau benötigt. Zugleich liegen der Abfluss aus dem Tiefbau bei rund 79 Mio. t und das verfügbare Recyclingmaterial bei rund 62 Mio. t. Die Nachfrage nach ungebundenen Schichten liegt bei rund 40 Mio. t, das prognostizierte Abfallaufkommen bei rund 30 Mio. t. Durch die angesetzte Rückführungsrate von 75 % ergibt sich ein eine potenziell verfügbare Masse sekundärer Rohstoffe von rund 22 Mio. t. Knappe et al. (2015) schließen in ihrer Studie eine Rückführung von zurückgebautem Beton in die Betonproduktion für den Straßen- und Wegebau aus. Beton wird gebrochen und vollständig als ungebundener Straßenbaustoff verarbeitet. Dadurch erhöht sich die zur Verfügung stehende Menge an sekundärem Material für ungebundene Schichten (FSS/STS) in den Szenarien. Die Rückführungsrate von Altbeton in ungebundene Schichten wurde in der Studie mit 100 % angenommen. Für Pflastersteine wurden die gleichen Annahmen getroffen wie für Altbeton. Zusammen ergeben diese Abfallmassenströme ein Aufkommen in Höhe von rund 33 Mio. t verwertbarem Material. Stellt man im Referenzszenario das aus der angenommenen Rückführung zur Verfügung stehende Recyclingmaterial dem Aufkommen an Asphalt gegenüber, so zeigt sich, dass zukünftig rechnerisch 61 % des Asphaltbedarfs durch sekundäre Rohstoffe gedeckt werden können. Ungebundene Schichten können potenziell zu knapp über 80 % durch sekundäre Rohstoffe gedeckt werden (einschließlich Altbeton und Altpflaster).

Abbildung A 24: Ergebnisse der Szenarioanalyse der Recyclingpotenziale für Asphalt, Pflaster, Beton und FSS/STS im Straßenbau



Quelle: eigene Darstellung IÖR/ifeu nach Knappe et al. (2015)

In den Szenarien für 2050 (Szenarios 3 und 4) liegt der jährliche Bedarf nach Asphalt bei 39–50 Mio. t mit potenzieller Deckung durch Sekundärrohstoffe von 68 – 71 %. Betonbedarfe liegen 2050 bei 11–14 Mio. t, in ungebundene Schichten rückgeführt werden können rund 86–92 % dieses Bedarfs. Der Bedarf nach Pflaster 2050 ist deutlich niedriger mit 0,9 – 1,7 Mio. t, wovon wiederum 90–98 % als Altpflaster zur Bedarfsdeckung ungebundener Schichten eingesetzt werden können. Die in den Szenarien abgebildeten Bedarfe für die ungebundenen Schichten liegen bei 30–45 Mio. t. Werden die anfallenden Altbetone und Altpflaster miteinbezogen, so ergibt sich 2050 ein Sekundärrohstoffpotenzial von 96 – 110 % der jährlichen Nachfrage nach FSS/STS zu deren Bedarfsdeckung (Knappe et al. 2015).

Laut BMV sind auch eine Reihe von Brückenmodernisierungen notwendig: Deutschlandweit ist eine prioritäre Sanierung von rund 4.000 Bauwerken (innerhalb eines Zeitraums von 10 Jahren) und langfristig weiteren 4.000 Brücken (bzw. Brücken-Teilbauwerke) im Kernnetz von teilweise stark belasteten Autobahnen notwendig (BMV 2023). Aus dem Bundesverkehrswegeplan geht hervor, dass für etwa ein Drittel der Bauwerksflächen der Autobahnbrücken bis 2030 mittelfristig Erhaltungsmaßnahmen notwendig sein werden. Bei den Bundesstraßenbrücken besteht mittelfristiger Bedarf für 27 % der Bauwerksflächen (BMVI 2016). Im Rahmen der Brückenmodernisierung werden derzeit viele ältere Brücken angepasst, verstärkt oder durch einen leistungsfähigen Ersatzneubau ersetzt (BMV 2019). Auch aus Straßen und Brücken sind daher große Mengen an anfallendem Sekundärmaterial zu erwarten. Insgesamt zeigt sich also, dass der

Baustoffbedarf des Tiefbaus zukünftig in erheblichem Umfang aus dem Aufkommen an Altmaterialien gedeckt werden könnte.

Zusammenfassend kann man sagen, dass sowohl im Tiefbau- als auch im Hochbau in Zukunft erhöhte Substitutionspotenziale zu erwarten sind. Die hier aufgezeigten Berechnungen zu Sekundärrohstoffpotenzialen in der Zukunft betrachten jeweils nur ein Bereich der beiden, wobei diese in der Praxis untrennbar miteinander verbunden sind. Um die steigenden Sekundärrohstoffpotenziale bestmöglich auszunutzen, müssen die Bereiche also zusammen gedacht werden.

A.7.4 Handlungsbedarf für eine optimierte Urban Mining Strategie

Menge der Sekundärrohstoffe

Aufgrund einer zu erwartenden Verschiebung der Materialströme des Hochbaus hin zu Abflüssen verbessert sich die Verfügbarkeit von Sekundärmaterialien, insbesondere bezüglich des Einsatzes von RC-Material als Zuschlagsstoff bei der Betonherstellung. Dadurch steigt das Potenzial der Deckung des Materialbedarfs zur Herstellung von Betonen durch Sekundärmaterial deutlich an. Im Straßenbau sind in Bezug auf die Materialien aus der Deckschicht (insbesondere Asphalt) die Kreisläufe bereits nahezu vollständig geschlossen. Für die Schottertrag- und Frostschuttschichten, welche mengenmäßig deutlich stärker ins Gewicht fallen, trifft dies nicht zu. Zwar ist bei Großvorhaben zu beobachten, dass ausgehobenes Material häufig vor Ort aufbereitet und wiedereingesetzt wird, ohne dass es das Abfallregime durchläuft. Für zahlreiche Kleinbaustellen, welche den Straßenerhalt insgesamt dominieren, trifft dies allerdings nicht zu. Hier liegen Hinweise vor, dass das ausgebaute Material, deklariert als Boden und Steine, z.B. zur Verfüllung im Tagebau eingesetzt wird. Gelingt es, diesen Materialfluss in die Aufbereitung zu RC-Material umzulenken, steigt auch die Verfügbarkeit von RC-Material aus dem Straßenbau deutlich an. Angesichts dieser beiden Trends ist davon auszugehen, dass hinsichtlich Verfügbarkeit an RC-Material sowohl im Hoch- als auch im Tiefbau deutliche Potenziale für die Schließung von Kreisläufen existieren. Für die Materialflüsse sollte eine Durchlässigkeit zwischen den beiden Bereichen erhalten bleiben, da eine nachhaltige Bauwirtschaft auf regionale Kreisläufe angewiesen ist und regionale Unterschiede in Angebot und Nachfrage bezüglich mineralischer Sekundärrohstoffe bestehen.

Qualität der Sekundärrohstoffe

Theoretisch könnte heute von den in Deutschland jährlich anfallenden rund 60 Mio. t Bauschutt insgesamt mehr als die Hälfte in Form von rezyklierter Gesteinskörnung Verwendung finden (Bundesingenieurkammer e. V. 2023). Allerdings wird Betonbruch, der im Grunde für die Herstellung von Recyclingbeton gut geeignet wäre, derzeit nur zu kleinem Anteil in die Betonproduktion zurückgeführt. Dies ist z.B. in der konstant hohen Nachfrage im Straßenbau begründet. Laut Statistischem Bundesamt lag die Menge an aufbereitetem Bauschutt, die für die Verwendung in Betonmischanlagen eingesetzt wurde, im Jahr 2020 bei 0,9 Mio. t; im Jahr 2022 ist diese sogar um über 20 % zurückgegangen (Destatis 2024b).

In Bezug auf Straßen und andere Asphalt- und Betonbauwerke werden trotz bereits bestehender getrennter Erfassung von z. B. Beton große Mengen Beton und Asphalt unter den gemischt erfassten Abfallschlüsseln vermutet. Auch Boden und Steine (AVV 17 05 04), die mengenmäßig dominante Bauabfallfraktion, setzt sich aus sehr unterschiedlichen Materialien zusammen und kann relevante Anteile Naturstein, Beton- oder Ziegelbruch enthalten, die aus ungebundenen Schichten oder von einer vorhergehenden Bebauung im städtischen Bereich stammen. In der Regel endet der Verwertungsweg für den Bodenaushub in übertägigen Abbaustätten (z.B. Kies, Sand- oder Tongruben) als Verfüllmaterial zur Rekultivierung. Außerdem ist unklar, inwieweit

Bauabfälle zur Herstellung von Recyclingbaustoffen in Erdbaumaßnahmen eingehen, während diese auch für den Oberbau einer Straße geeignet wären. Diese derzeitige Entsorgungspraxis zeigt, dass in der Entsorgungswirtschaft keine zielgerichteten Aufbereitungsstrategien für diese meist gering belastete Böden etabliert sind. Aussortierte und konfigurierte Gesteinskörnungen aus Steinen, Sanden, Lehmen oder Tonen könnten hingegen in der Beton-, Ziegel- oder Lehm-bauindustrie eingesetzt werden und Primärrohstoffe ersetzen. Beispiele aus der Praxis zeigen, dass ein großes Potenzial der Bodenbestandteile für die RC-Baustoffproduktion besteht (Muchow et al. 2022).

Verfüllung im übertägigen Bergbau gilt rechtlich als Verwertung, wodurch hohe Verwertungsquoten für mineralische Baustoffe, besonders Boden und Steine, erzielt werden. Dies ist irreführend, da ein großer Teil des verfüllten Materials in Steinbrüchen endet – eine höherwertige Verwertung der mineralischen Abfallfraktionen würde nicht nur primäres Gestein einsparen, sondern damit auch die Nachfrage nach Verfüllmaterial (Dierks et al. 2024). Dies zeigt, dass eine Erhöhung der Recyclingqualität notwendig ist, um natürliche Rohstoffe zu schonen und Emissionen einzusparen.

Zu einer funktionierenden Getrennterfassung und nachfolgend einer hochwertigen Verwertung gehört ebenfalls, dass die mögliche Anwesenheit von Schad- und Störstoffen angemessen adressiert wird, um sowohl hohe Recyclingquoten als auch gesundheitlich unbedenkliche Verwertungen von Sekundärmaterial zu gewährleisten (siehe Urban Mining Strategie, Querschnittsthema Schadstoffe).

Der Zementanteil der beim Brechen von Beton entstehenden Feinfraktion, welche aktuell aufgrund mangelnder Absatzwege meist noch verfüllt wird, kann reaktiviert werden, um Zement zu ersetzen und wird voraussichtlich in Zukunft an Bedeutung für das Urban Mining gewinnen (Höffgen et al. 2025).

Regionale Verwertungssysteme

Im anthropogenen Lager dominieren mineralische Baumaterialien, die aufgrund einer geringen spezifischen Wertschöpfung und des damit verbundenen hohen Anteils des Transports an den Gesamtemissionen aus ökologischer Sicht auf regionale Kreisläufe angewiesen sind (Dierks et al. 2021; Dierks et al. 2024). Entsprechend kann das hohe Potenzial für Baustoffwiederverwertung nur sinnvoll ausgeschöpft werden, wenn die entsprechenden Materialschöpfungsketten und -ströme regionalisiert werden. Ein hoher Bedarf zur Unterstützung mit großen Substitutionspotenzial besteht direkt bei Gemeinden. Diese stehen vor der großen Herausforderung den hohen Anteil an Gemeindestraßen im gesamten Straßennetz instand zu halten, in dem, wie zuvor beschrieben, ein maßgeblicher Teil der Materialmassen gebunden ist.

Akzeptanz von RC-Baustoffen

In der Praxis zeigt sich, dass Recyclingbaustoffe trotz umfassender Gütesicherungssysteme und infolgedessen kontrollierter und hoher Qualität unter einem schlechten Image leiden. Sie werden in öffentlichen Ausschreibungen oft nicht oder nur beschränkt zugelassen. Folglich werden relevante Anteile der Bauabfälle nicht ihren bautechnischen Eigenschaften entsprechend verwertet, sondern untergeordneten Verwertungswegen zugeführt (Muchow et al. 2022).

Fazit

Hoch- und Tiefbau sind stark miteinander verknüpft. Mineralische Baustoffe wie Kies, Splitt, Sand und Zement werden sowohl im Hoch- als auch im Tiefbau eingesetzt. Der Großteil der mineralischen Abfallströme des Hochbaus als Schottertrag- und Frostschuttschichten oder Füllmaterial im Straßenbau oder übertägigen Abgrabungen verwertet.

Sowohl im Hoch- als auch im Tiefbau sind Verwertungsquoten zwar hoch, aber die Verwertungswege überwiegend minderwertig bzw. qualitätsmindernd und der Recyclinganteil an den eingesetzten Baustoffen gering, wodurch die Schonung natürlicher Rohstoffe unter ihren Möglichkeiten bleibt. In Zukunft ist zu erwarten, dass sich das Angebot an mineralischen Abfallströmen und damit an Recyclingmaterial im Verhältnis zum Bedarf an mineralischen Baustoffen deutlich erhöht und ein Großteil des Bedarfs aus recyceltem Material gedeckt werden kann.

Durch die steigende Relevanz von RC-Beton steigt voraussichtlich die Verfügbarkeit hochwertiger Verwertungswege für recycelte mineralische Baustoffe. Zwar wird erwartet, dass sich das Verhältnis von Zufluss zu Abfluss von Baustoffen im Hochbau bis 2050 so verschiebt, dass mehr mineralische Abfälle anfallen als Baustoffe benötigt werden. Durch Recyclingverluste wird aber weiterhin nicht der gesamte Bedarf an mineralischen Baustoffen aus Recyclingbaustoffen gedeckt werden können. Auch im Tiefbau ist in absehbarer Zukunft eine vollständige Deckung des Bedarfs an mineralischen Baustoffen aus Recyclingmaterial unwahrscheinlich.

A.7.5 Quellenverzeichnis Steckbrief „Mineralische Baustoffe im Hochbau sowie in Straßen und Brücken“

Bergmann, T.; Bleher, D.; Jenseit, W. (2015): Ressourceneffizienzpotenziale im Tiefbau - Materialaufwendungen und technische Lösungen. VDI ZRE Publikationen: Studien VDI Zentrum Ressourceneffizienz, Berlin.

Bimesmeier, T.; Gruhler, K.; Deilmann, C.; Reichenbach, J.; Steinmetzer, S. (2020): Sekundärstoffe aus dem Hochbau: Energie- und Materialflüsse entlang der Herstellung und des Einsatzortes von Sekundärstoffen aus dem Hochbau für den Baubereich. Forschungsinitiative Zukunft Bau Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

Bundesministerium für Verkehr (BMV) (2019): Brücken: Zahlen, Daten, Fakten. In: Bundesministerium für Verkehr. <https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/bruecken-zahlen-daten-fakten.html> (22.07.2025)

Bundesministerium für Verkehr (BMV) (2023): FAQ zur Brücken-modernisierung. In: Bundesministerium für Verkehr. <https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/K/brueckenmodernisierung-faq.html> (22.07.2025)

Bundesministerium für Verkehr (BMV) (2024): Infrastruktur. Bundesministerium für Verkehr, Berlin, Bonn. <https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/infrastruktur-statistik.html>

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2016): Bundesverkehrswegeplan 2030. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin. https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/bundesverkehrswegeplan-2030-gesamtplan.pdf?__blob=publicationFile (22.07.2025)

Bundesingenieurkammer e. V. (2023): Beton: Rezyklatanteil könnte deutlich höher sein. In: Deutsches Ingenieurblatt. <https://www.deutsches-ingenieurblatt.de/fachartikel/artikeldetail/beton-rezyklatanteil-koennte-deutlich-hoeher-sein> (14.08.2024)

Deutscher Asphaltverband e. V. (DAV) (2014): Wiederverwenden von Asphalt. Deutscher Asphaltverband e.V., Bonn. https://dav.wmg-webdesign.de/wp-content/uploads/woocommerce_uploads/2024/02/wiederverwenden_2014-nwpydb.pdf (22.07.2025)

Deilmann, C.; Krauß, N.; Gruhler, K.; Reichenbach, J. (2014): Sensitivitätsstudie zum Kreislaufwirtschaftspotenzial im Hochbau.

Deilmann, C.; Reichenbach, J.; Krauß, N.; Gruhler, K. (2017): Materialströme im Hochbau: Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft. Zukunft Bauen Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn.

- Destatis (2022): 15. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. In: Statistisches Bundesamt. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/begleitheft.html> (31.03.2025)
- Destatis (2024a): Abfallentsorgung: Deutschland, Jahre, Abfallarten. Code: 32111-0002. In: Statistisches Bundesamt. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online#astructure> (22.08.2024)
- Destatis (2024b): Bauschuttzubereitungsanlagen: Deutschland, Jahre, Abfallarten. Code: 32141-0002. In: Statistisches Bundesamt. <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/table/32141-0002/table-toolbar> (31.03.2025)
- Dierks, C.; Hagedorn, T.; Campitelli, A.; Bulach, W.; Zeller, V. (2021): Are LCA Studies on Bulk Mineral Waste Management Suitable for Decision Support? A Critical Review. In: Sustainability. Vol. 13, No. 9, S. 4686.
- Dierks, C.; Hagedorn, T.; Mack, T.; Zeller, V. (2024): Consequential life cycle assessment of demolition waste management in Germany. In: Frontiers in Sustainability. Frontiers. Vol. 5.
- GewAbfV (2022): Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung - GewAbfV), In der Fassung der Bekanntmachung vom 18. April 2017 (BGBl. I S. 896), zuletzt geändert durch Artikel 3 der Verordnung vom 28. April 2022, BGBl. I S. 700, 720. https://www.gesetze-im-internet.de/gewabfv_2017/GewAbfV.pdf (25.08.2025)
- Gruhler, K.; Schiller, G. (2023): Grey energy impact of building material recycling – a new assessment method based on process chains. In: Resources, Conservation & Recycling Advances. Vol. 18, S. 200139.
- Höffgen, J. P.; Knittel, L.; Bauer, M.; Stutz, H. H.; Dehn, F. (2025): Baugrundverbesserung mit thermisch-mechanisch aufbereitetem Betonbrechsand. In: Bautechnik. S. bate.202400038.
- Knappe, F.; Reinhardt, J.; Bergmann, T.; Mottschall, M.; Keck, I.; Köstlin, S. (2015): Substitution von Primärrohstoffen im Straßen- und Wegebau durch mineralische Abfälle und Bodenaushub; Stoffströme und Potenziale unter Berücksichtigung von Neu-, Aus- und Rückbau sowie der Instandsetzung. ifeu Heidelberg; Öko-Institut; Keck Informationstechnologie. Umweltbundesamt, Heidelberg. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3712_33_324_primaerrohstoffe_strassenbau_bf.pdf (16.09.2025)
- Knappe, F. (2022): Kreislaufwirtschaft auf dem Bau – Rückführung als qualifizierte RC-Baustoffe für den Hoch- und Tiefbau. In: M. PORTH: / H. SCHÜTTRUMPF: Wasser, Energie und Umwelt: Aktuelle Beiträge aus der Zeitschrift Wasser und Abfall II. Springer Fachmedien, Wiesbaden. S. 147–156.
- Kreislaufwirtschaft Bau (2023): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2020 - Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2020. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V, Berlin. <https://kreislaufwirtschaft-bau.de/Download/Bericht-13.pdf> (25.02.2023)
- Kreislaufwirtschaft Bau (2024): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2022 - Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2022. Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e. V. S. 16. https://cdn.prod.website-files.com/664355396b105bd9a4e9cadb/6751c8aa10492c7b73491e18_Bericht-14min.pdf (31.03.2025)
- Muchow, N.; Knappe, F.; Reinhardt, J. (2022): Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes – Themenfeld: Bauabfälle. ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg, Berlin.
- Umweltbundesamt (UBA) (2019): Beton Factsheet. Erarbeitet im Projekt „Kartierung des Anthropogenen Lagers III – Etablierung eines Stoffstrommanagements unter Integration von Verwertungsketten zur qualitativen und quantitativen Steigerung des Recyclings von Metallen und mineralischen Baustoffen“ (FKZ 3716 35 3230) Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/factsheet_beton_fi_barrierefrei.pdf (16.09.2025)

Umweltbundesamt (UBA) (2022): Das anthropogene Lager. In: Umweltbundesamt. Text, Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining/das-anthropogene-lager> (27.03.2025)

Schiller, G.; Ortlepp, R.; Krauß, N.; Steger, S.; Schütz, H.; Fernandez, J. A.; Reichenbach, J.; Wagner, J.; Baumann, J. (2015): Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft (KartAL I), Texte | 83/2015, S. 315, Umweltbundesamt (Hg.), Oktober 2015. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_83_2015_kartierung_des_anthropogenen_lagers.pdf (09.09.2025)

Schinke, R., Hennersdorf, J., Gruhler, K., Grießbach, U., Schiller, G., & Leibniz Institute Of Ecological Urban And Regional Development. (2025). Material Cadastre of Buildings in Germany 2022 (matcad2022, adm2022)

A.8 Steckbrief „Kunststoffe im Hoch- und Tiefbau“

A.8.1 Status quo

Kunststoffe, oft auch Plastik genannt, sind hochmolekulare organische Verbindungen, die durch chemische Reaktionen aus natürlichen Stoffen oder Monomeren synthetisiert werden (Hengstmann & Tamminga 2022). Durch unterschiedliche Kombinationen von Monomeren und Polymerstrukturen können verschiedenste Kunststoffarten hergestellt werden. Deutschlandweit ist der Bausektor nach dem Verpackungssektor der zweitgrößte Verbraucher von Kunststoffen (Hoffmann & Ganz 2025). Im Bauwesen tragen Kunststoffe zur Verbesserung der Energiebilanz von Gebäuden bei, außerdem zeichnen sie sich durch Langlebigkeit, Flexibilität und Resistenz gegenüber Fäulnis und Korrosion aus. Zudem ist ihre Installation und Wartung einfach (Klimaforum Bau 2021).

Jährlich werden große Mengen an Kunststoffen im Baubereich eingesetzt – und die Mengen steigen stetig an. 2017 wurden rund 2,6 Mio. Tonnen an Kunststoffen in den zentralen Anwendungsbereichen des Bauwesens eingesetzt¹⁹. Im Zeitraum von 2005 bis 2017 wurden durchschnittlich pro Jahr 1,7 Mio. Tonnen an Kunststoffen verbaut (= durchschnittlicher Nettozuwachs des anthropogenen Lagers) (Bendix et al. 2021). Basierend auf den Auswertungen der Conversio-Studie zeigt sich, dass im Jahr 2021 bereits rund 3,4 Mio. Tonnen an Kunststoffen verbaut wurden (Lindner et al. 2022). Da die zugebaute Menge das Abfallaufkommen übersteigt, nehmen die im anthropogenen Lager enthaltenen Mengen auch weiterhin zu (Muchow et al. 2022). Folglich besteht ein zukünftig hohes Potenzial an anfallenden Sekundärmaterialien (siehe Kapitel 1.3) – dies birgt Chancen, aber auch Risiken.

Die potenziell anfallende Kunststoffmenge ist stark von branchenspezifischen Nutzungsdauern der unterschiedlichen Produktarten abhängig. Verglichen mit den kurzlebigen Verpackungen verbleiben Bauprodukte deutlich länger im anthropogenen Lager. Die aktuell verbauten Kunststoffprodukte werden erst in mehreren Jahrzehnten wieder für eine Nachnutzung bzw. ein Recycling zur Verfügung stehen. Aufgrund des erst seit 40 Jahren stattfindenden, aber seither steigenden, Einsatzes von Kunststoffwerkstoffen im Bauwesen (Lindner et al. 2022) ist aber mit einem deutlich steigenden Abfallstrom und somit mit einem relevanten Abschöpfungspotenzial zu rechnen (Bendix et al. 2021). Prognosen gehen davon aus, dass sich das Abfallaufkommen bis 2030 im Vergleich zu 2005 verdoppeln wird (Bendix et al. 2021) (siehe Kapitel 1.3).

Im Jahr 2023 wurden 119.700 Tonnen Kunststoffe aus dem Baubereich unter der EAV 170203 entsorgt. Ein Großteil (rund 77 %) wurde sonstigen Behandlungsanlagen zugeführt. Weitere 17 % wurden Sortieranlagen zugeführt. Nur etwa 3 % sind direkt in einer thermischen Verwertung/Feuerungsanlage verwertet worden (Destatis 2025a; b). Zusätzlich werden erhebliche Mengen Kunststoff als gemischter Baustellenabfall erfasst. Grobe Abschätzungen hinsichtlich der Zusammensetzung des Gemisches zeigen, dass der Kunststoffanteil regelmäßig 20–30 % betragen kann. Dies entspricht etwa 0,7–1 Mio. Tonnen zusätzliche kunststoffbasierte Baustellenabfälle (Muchow et al. 2022). In der Praxis werden Kunststoffe aufgrund des geringen Massenanteils im Vergleich zu mineralischen Baustoffen üblicherweise als Gemisch erfasst (Bergs et al. 2021). Bei den im Gemisch erfassten Kunststoffen handelt es sich nicht nur um Bauprodukte, sondern auch um Verpackungsmaterial, in denen die Baustoffe angeliefert werden. Die im Gemisch erfassten Kunststoffe werden überwiegend energetisch verwertet (Muchow et al. 2022).

¹⁹ Kunststoffbasierte Bauprodukte bestehen in der Regel aus fossilen Rohstoffen; biobasierte Kunststoffe – aus nachwachsenden Rohstoffen gefertigt und/oder biologisch abbaubar – spielen mit einem Anteil von rund 1 % eine untergeordnete Rolle im Bauwesen (Klingler und Kaschub 2024).

Sind Kunststoffe in ausreichender Menge und Qualität vorhanden, werden diese als getrennte Fraktionen auf der Baustelle separat erfasst. Dies erfolgt insbesondere für Fensterprofile, Rohre, Bodenbeläge sowie Kabelkanäle, Deckenverkleidungen und Dachabdichtungsbahnen (Bergs et al. 2021).

Im Gegensatz zu anderen Baustoffarten sind europaweit umfangreiche Produkt-Rücknahmesysteme für rückgebaute Kunststoffe etabliert (Bendix et al. 2021). Muchow et al. (2022) gehen davon aus, dass über die statistischen Daten diese Rücknahmesysteme unter den sonstigen Behandlungsanlagen subsumiert sind und so den Hauptentsorgungsweg der getrennt erfassten Kunststoffe darstellen.

Die am häufigsten verbaute Kunststoffart im Bausektor ist Polyvinylchlorid (PVC) (siehe Kapitel 1.2), weshalb sich in Deutschland etablierte Rücknahmesysteme auf die Rücknahme von PVC-Produkten fokussiert haben (Bendix et al. 2021). Darunter fallen beispielsweise das Unternehmen *Rewindo*, das das Recycling von Fenstern, Rollen und Türen aus PVC organisiert, *Roof Collect*, ein Unternehmen, das sich auf kunststoffbasierte Abdichtungsbahnen spezialisiert hat, und das Unternehmen *Tarkett*, das Bodenbeläge und Verlegeverschnitte zurücknimmt und zu Rezyklaten für z. B. Teppichrückseiten verarbeitet (Bendix et al. 2021).

Die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV 2022) schreibt Erzeuger*innen sowie Besitzer*innen von Bau- und Abbruchabfällen eine getrennte Sammlung von u. a. Kunststoffen, Bitumengemischen, Kabeln und Dämmmaterial vor. Diese müssen befördert und vorrangig einer Vorbereitung zur Wiederverwendung bzw. einem Recycling zugeführt werden. Für eine Getrennthaltung des Kunststoffstromes werden eigene Abfallbehälter und eine entsprechende Sammellogistik benötigt (Bendix et al. 2021). In der Praxis treten Kunststoffe jedoch selten sauber und sortenrein auf; zudem werden Kunststofffraktionen aufgrund ihres geringen Masseanteils zum Großteil als gemischte Fraktion erfasst. Eine Getrennterfassung ist überwiegend für Fenster und Rohre zu erwarten. (Bergs et al. 2021)

Für eine Aufbereitung von beispielsweise Altrohren und Verarbeitungsresten, Fensterprofilen, Verpackungen sowie Schraubverschlusskappen aus Kunststoff werden diese gereinigt und werkstofflich oder rohstofflich verwertet. Bei der werkstofflichen Verwertung werden die gebrauchten Kunststoffe zu Mahlgut verarbeitet, aus welchem wiederum neue Produkte, wie Rohre, gefertigt werden können. Bei der rohstofflichen Aufbereitung bzw. dem chemischen Recycling werden die Kunststoffe in ihre chemischen Ausgangsstoffe zerlegt, die für die Herstellung von neuen Kunststoffen verwendet werden können. (Kunststoffrohrverband e.V. (KRV) 2019)

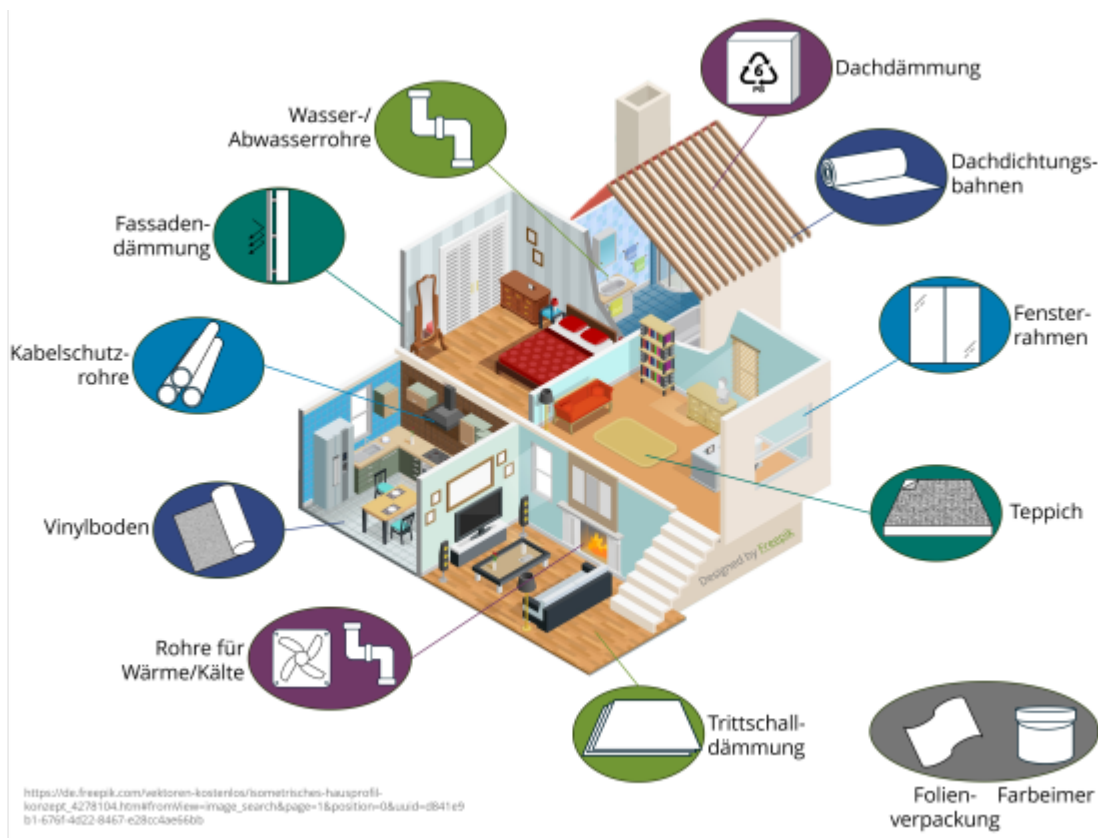
Sortenreine, wenig modifizierte Bauprodukte, wie Rohre und Fensterprofile, lassen sich besonders gut recyceln. Produkte mit vielen Additiven, Verbundstoffen oder problematischen Inhaltsstoffen – etwa Dämmstoffe und Glasfaserverstärkende Kunststoffe (GFK) – hingegen weisen eine deutlich schlechtere Recyclingfähigkeit auf. Maßgeblich sind daher eine recyclinggerechte Produktgestaltung, verstärkte sortenreine Erfassung sowie eine wirtschaftliche Trennbarkeit der Kunststoffe – insbesondere von komplexen, verbundenen oder schadstoffbelasteten Produkten.

A.8.2 Relevante Kunststoffe und -komponenten im Hoch- und Tiefbau

Auf Baustellen des Hoch- und Tiefbaus finden sich bei weitem nicht nur Beton und Stahlträger; auch Rohre und Abdichtungsplanen fallen in großen Mengen an. Die relevanten Kunststoffkomponenten im Baubereich lassen sich vor allem in vier Anwendungsbereichen finden: Rohre, Dämmung, Profile und sonstige Bereiche (siehe Abbildung A 25). Der Anwendungsbereich Rohre umfasst nicht biegsame und biegsame Rohrleistungssysteme sowie Schächte (u. a. Kontroll- und

Kabelschächte). Im Bereich der Dämmmaterialien werden Kunststoffe neben der Schalldämmung zu 80 % als Wärmedämmprodukte eingesetzt (u. a. Sandwich-Elemente, Schaumkunststoffe). Profile setzen sich in erster Linie aus Bauprofilen, Rollläden, Türen und Fenstern zusammen. Des Weiteren zählen auch Trockenbauprofile, Handläufe und Sockelleisten u. ä. dazu. Sonstige Bauprodukte aus verschiedenen Kunststoffen bzw. Kunststoff- und anderen Materialverbunden umfassen etwa Abdichtungsmaterial (z. B. Bitumenbahnen/-schindeln, Elastomer-Dichtungen), Bodenbeläge, Elektroinstallation/-material (z. B. Kabel, Leitungen, Steckdosen, Schalter), Folien, Vliese und Gewebe, Sanitärausstattung, Platten und Tafeln, Produkte des Garten- und Landschaftsbaus, Produkte des Straßenbaus sowie kleinere Bauprodukte (z. B. Dübel, Fugenbänder, Gitterroste) (Bendix et al. 2021).

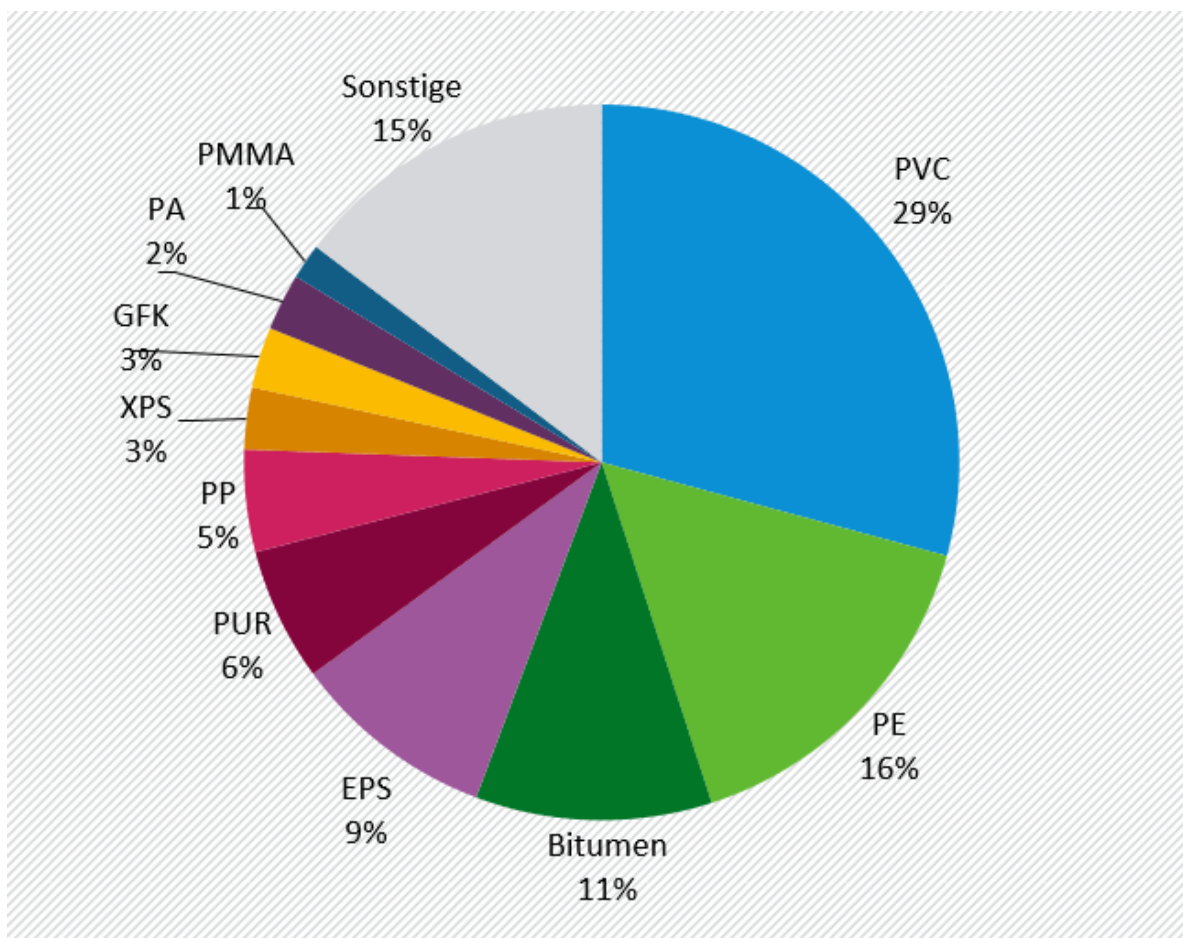
Abbildung A 25: Überblick über verbaute Kunststoffe im Baubereich



Quelle: Abbildung von Freepik und Ergänzungen durch ©realcycle GmbH 2025

Im anthropogenen Lager sind verschiedene Kunststoffe verbaut. In Abbildung A 26 sind die wichtigsten Kunststoffarten im Baubereich dargestellt.

Abbildung A 26: Verbaute Kunststoffe (Bestand) in Deutschland 2017 [in %]



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Bendix et al. (2021); Anmerkung: PVC = Polyvinylchlorid, PE = Polyethylen, EPS = Expandiertes Polystyrol, PUR = Polyurethan, PP = Polypropylen, XPS = Extrudiertes Polystyrol, GFK = Glasfaserverstärkter Kunststoff, PA = Polyamid, PMMA = Polymethylmethacrylat

Der mengenmäßig meistverbaute Kunststoff im Hoch- und Tiefbau ist Polyvinylchlorid (PVC), der 2017 knapp ein Drittel der verbauten Kunststoffe ausmachte. PVC wird in vielfältigen Produkten wie Bauprofilen, Rohren, Abdichtungsbahnen, Bodenbelägen und Kabelisolierungen eingesetzt. Insbesondere für Rohre und Bauprofile ist außerdem der Kunststoff Polyethylen (PE) relevant, der mit 16 % einen weiteren großen Teil der verbauten Kunststoffmenge darstellt. Bitumen, welches hauptsächlich für Abdichtungsbahnen verwendet wird, hat einen Anteil von 11 % an den insgesamt verbauten Kunststoffarten. Ein bedeutender Anwendungsbereich für Kunststoffe im Hoch- und Tiefbau sind die Dämmstoffe. Expandiertes Polystyrol (EPS), bekannt als Styropor, wird für diesen Zweck verwendet, aber auch Polyurethan (PUR) und extrudiertes Polystyrol (XPS) kommen in diesem Anwendungsbereich häufig zum Einsatz.

Außerdem finden sich Kunststoffe in Textilböden, insbesondere Polypropylen (PP) und Polyamid (PA). Glasfaserverstärkende Kunststoffe (GFK) werden Rohren und Profilen zugefügt. Auch in der Beleuchtungsinfrastruktur finden sich im Bausektor einige Kunststoffe wieder – so bestehen Lichtkuppeln und -bänder häufig aus GFK oder Polymethylmethacrylat (PMMA), das auch im Sanitätsbereich zur Anwendung kommt (Bendix et al. 2021).

Recyclingfähigkeit und Rezyklateinsatz

Der Bausektor ist noch vor dem Verpackungsbereich das wichtigste Einsatzgebiet von Sekundärkunststoffen. Im Jahr 2023 wurden in Deutschland rund 0,75 Mio. Tonnen an Kunststoffrezyklaten und Nebenprodukten im Bauwesen eingesetzt – das entspricht rund 39 % des gesamten Einsatzes von Kunststoffrezyklaten und wieder eingesetzten Nebenprodukten in Deutschland (UBA 2025). Derzeit werden zur Herstellung von Bauprodukten aus Kunststoff 77 % Primärkunststoff und 23 % Rezyklat verbaut (Bendix et al. 2021; Lindner et al. 2020). Der Einsatz von Sekundärrohstoffen und das Ausschöpfen des bisher ungenutzten Potenzials wird ausdrücklich vom Gesetzgeber gewünscht, ist aber auch mit einigen anwendungsspezifischen Herausforderungen verbunden.

Eine große Herausforderung für die Kreislaufführung von Kunststoffen ist deren „Abnutzung“ bzw. Qualitätsverlust. Durch lange Nutzungsdauern im Bauwesen sind die Kunststoffe über lange Zeit den Einwirkungen von Wärme, Sauerstoff und UV-Strahlung ausgesetzt. Dies führt zur Degradation der Polymerketten und verändert die mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe. Auch das Recyclingverfahren selbst, bei dem die Kunststoffe durch mehrfache Extrusion (= Formgebungsverfahren) thermomechanischen Belastungen ausgesetzt werden, führt zu einer Minderung der Qualität und der Langzeiteigenschaften (Bendix et al. 2021). Die Recyclingzyklen von vielen Kunststoffen sind daher auch begrenzt. Im Gegensatz zu vielen Metallen können Kunststoffe also nicht beliebig oft rezykliert werden, ohne dass sich Materialeigenschaften ändern bzw. Qualitätsverluste auftreten (Jetzke & Richter 2020).

Dies bedeutet, dass Rezyklate teilweise nur in Anwendungsbereichen mit niedrigeren Qualitätsanforderungen eingesetzt werden können. In sicherheitsrelevanten Anwendungsbereichen wie Rohren für Trinkwasser und Gas sind Rezyklate sogar verboten (Betz et al. 2022). Weitere Hemmnisse für den Rezyklateinsatz sind die diskontinuierliche Verfügbarkeit von Rezyklaten, und die erhöhte Komplexität von Herstellungsverfahren (Bendix et al. 2021).

Trotz dieser Herausforderungen besteht das Potenzial, den derzeitigen Anteil Rezyklat von 5–8 % an der insgesamt in Rohren eingesetzten Kunststoffe anzuheben. Aus technischer Sicht wäre ein Rezyklateinsatz in Abwasserrohren von rund 10–15 % möglich, in Kabelschutzrohren und Regenwasser-Managementsystemen sogar 100 % (Betz et al. 2022). Im Bereich der Fensterprofile gestaltet sich das Recycling und die Anwendung recycelter Materialien als einfacher: Der Rezyklatanteil an der Fensterprofilproduktion liegt derzeit bei 18 %; der maximal mögliche Rezyklateinsatz wird auf 50–70 % geschätzt (European PVC Window Profile and related Building Products Association (EPPA) 2018). Fußbodendämmungen könnten ohne nennenswerte qualitative Unterschiede sogar zu 100 % aus Rezyklat statt aus Neuware bestehen (Albrecht & Schwitalla 2015).

Querschnittsthema: Schadstoffe

Für das Recycling stellen neben Fremdstoffen (z. B. Lack, Klebstoffe), kritische Zusatzstoffe (Additive) wie Stabilisatoren, Weichmacher und Flammschutzmittel große Herausforderungen dar. Stabilisatoren (z. B. aus Cadmium und Blei) in PVC und Flammschutzmittel, die in EPS und XPS angewendet wurden, sind als besorgniserregend eingestuft und verboten. Weichmacher sind im Bausektor vor allem in Kabel- und Bodenbelägen zu finden und können derzeit nicht wirtschaftlich abgetrennt werden. Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) gelten derzeit als nicht rezyklierbar (Bendix et al. 2021).

Teilweise wurden Materialien vor Jahrzehnten verbaut, die inzwischen als Schadstoffe eingestuft und im Neubau verboten sind. Trotzdem fallen die Stoffe weiterhin in Abbruchabfällen an und können nicht oder nur mit hohem Aufwand während des Recyclingverfahrens von den Kunststoffen abgetrennt werden. Im Rezyklat verbleiben somit häufig relevante

Konzentrationen. Wenn Zulassungsgrenzwerte überschritten werden, schränkt dies den Einsatz der Sekundärkunststoffe stark ein und macht ein vollständiges Schließen der Stoffkreisläufe unmöglich.

Dämmstoffe bieten energetische Vorteile, sind aber mit alternden Bausubstanzen eine wachsende Herausforderung für die Kreislaufwirtschaft – insbesondere in Bezug auf Recycling, Rückbau und den Umgang mit Additiven. Eine stoffliche Verwertung von Dämmstoffen bzw. deren Komponenten – insbesondere EPS (expandiertes Polystyrol) und XPS (extrudiertes Polystyrol) – wird maßgeblich durch kritische Zusatzstoffe limitiert. Zu diesen zählen vor allem Stabilisatoren, Weichmacher und Flammschutzmittel wie HBCD (Hexabromcyclododecan). HBCD ist ein gesundheitsschädliches Flammschutzmittel (Fehn et al. 2019). Erst mit der POP-Verordnung (EG) Nr. 850/2004 über persistente organische Schadstoffe wurde 2016 eine HBCD-Konzentrationsgrenze von 100 mg/kg festgelegt (Reinhardt et al. 2022). Ein Großteil der anfallenden EPS-Dämmstoffe enthält nach wie vor HBCD was eine Aufbereitung und Verwertung erschwert und eine Rückführung des EPS als Sekundärrohstoff an den Markt verhindert (Fehn et al. 2019). XPS-Dämmstoffe, die heute zurückgebaut werden, enthalten in der Regel außerdem die Treibmittel FCKW oder HFCKW. Während FCKW bereits 1995 verboten wurde, durfte HFCKW noch bis Ende 2001 industriell verwendet werden. Aktuell können XPS-Abfälle noch nicht stofflich verwertet werden, da sie durch ihr hohes Treibhausgaspotenzial und ihre ozonabbauenden Eigenschaften umweltgefährdend sind. Es erfolgt daher eine thermische Verwertung (Verbrennung). (Reinhardt et al. 2022)

Ein ökologisch und materialtechnisch sinnvoller Umgang mit zurückgebauten Dämmstoffen wird für die kommenden Jahre allerdings immer wichtiger, da das zu erwartende Abfallaufkommen an Dämmstoffen durch Sanierung und Abriss deutlich ansteigen wird (Reinhardt et al. 2022). Die wirtschaftliche und technische Verwertung von EPS und XPS ist unter aktuellen regulatorischen und technologischen Rahmenbedingungen nur bei HBCD-freien und sortenrein rückgebauten Abfällen möglich. Ist eine Entfernung von Flammschutzmitteln oder Problemadditiven technisch nicht oder nur mit extremem Aufwand möglich, bleibt nur die thermische Verwertung als rechtskonformer Entsorgungsweg. Obwohl bei der thermischen Verwertung Entlastungen im Energiesektor bringt, bleibt netto insbesondere bei der Müllverbrennung eine relevante Klimagaslast bestehen, die im direkten Vergleich zeigt, dass aus ökologischer Sicht die stoffliche Verwertung und Nutzung von synthetischen Dämmstoffen besonders prioritär ist (Reinhardt et al. 2022).

Durch die langen Nutzungsdauern von Kunststoffen im Bausektor werden auch in Zukunft noch Schadstoffe in Abfällen zu finden sein. Ein von Schmidt et al. (2024) entwickeltes Materialflussmodell prognostiziert, dass PVC-Abfälle auch im Jahr 2050 noch relevante Konzentrationen an Problemstoffen aufweisen werden. Außerdem ist zu beachten, dass die Regulationslandschaft sich dynamisch weiterentwickelt. Werden weitere Stoffe als kritisch bekannt, muss dies auch beim Recycling und dem Rezyklateinsatz mitbedacht werden (Bendix et al. 2021). Wenn keine neuen Technologien zur gezielten Schadstoffentfernung entwickelt werden, geht ein erhebliches Potenzial des Kunststoffrecyclings verloren. Schmidt et al. (2024) schätzen, dass im Zeitraum 2034 bis 2100 allein 3,2 Mio. Tonnen an PVC-Fensterprofilen nicht rezykliert werden können, wenn eine Bereinigung des PVC nicht technisch möglich gemacht wird.

A.8.3 Zukünftiges Sekundärrohstoffpotenzial

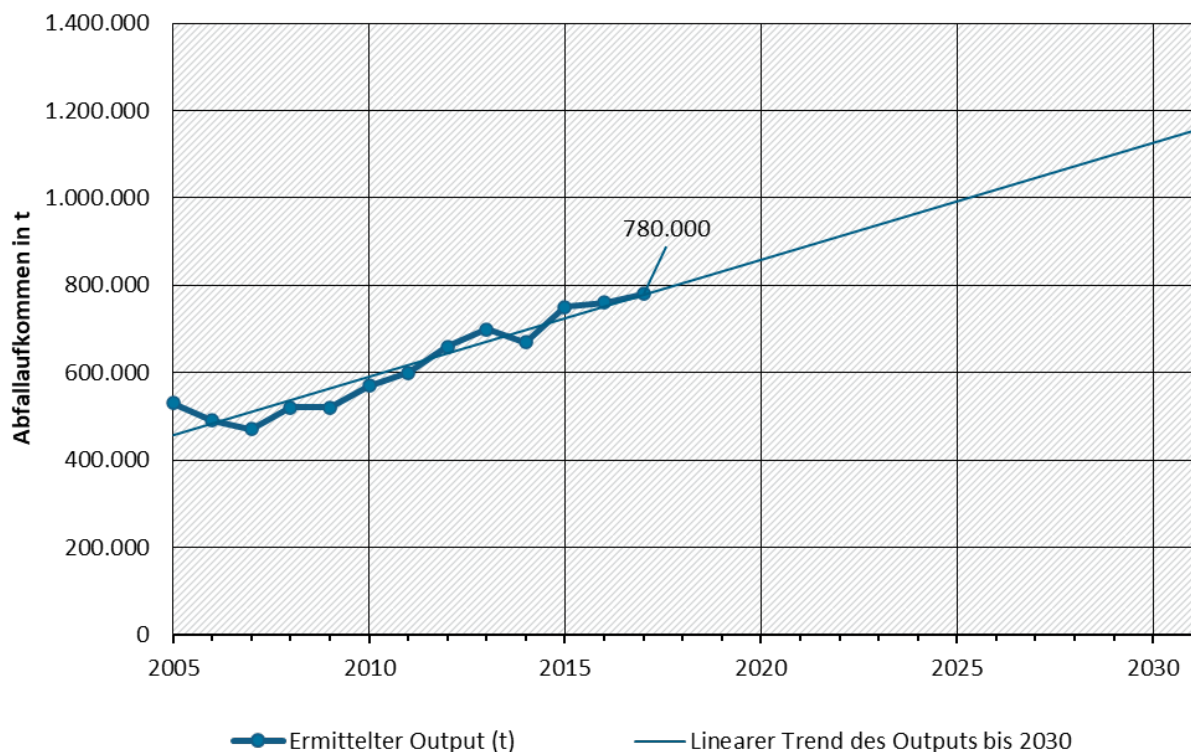
Die Nutzungsdauern der Bauprodukte aus Kunststoffen sind im Vergleich zu den Nutzungsdauern von z. B. Verpackungskunststoffen deutlich länger. Sie reichen von mindestens 10 Jahren bei Tapeten bis zu mehr als 50 Jahren bei der Fußbodendämmung. Zwischen dem Input in das

anthropogene Lager und dem Output am Ende der Nutzungsdauer liegen demnach große Zeitspannen (Bendix et al. 2021).

Zwischen 2005 und 2017 wurden rund 30,3 Mio. Tonnen an Kunststoffen verbaut. Für den gleichen Zeitraum ergibt sich, wie bereits erwähnt, eine Abfallmenge von rund 7,9 Mio. Tonnen. Der Nettobestandszuwachs des anthropogenen Lagers belief sich somit für diesen Zeitraum auf rund 22 Mio. Tonnen (Bendix et al. 2021). Der Anstieg geht mit einem erheblichen Bedarf einher, die Datengrundlage hinsichtlich Mengen, Kunststoffsorten und der Art des Einbaus zu verbessern, um die zukünftig zu entsorgenden Kunststoffabfälle aus dem Baubereich zu identifizieren und entsprechende Recyclingstrukturen aufzubauen (Bergs et al. 2021).

Die hier dargestellten Ergebnisse basieren auf der Studie von Bendix et al. (2021), die neben den Ermittlungen der Input- und Outputströme des anthropogenen Lagers auch Abschätzungen zur zukünftigen Entwicklung des Sekundärrohstoffpotenzials darlegen. Die steigende Tendenz des Outputs aus dem anthropogenen Lager wurde mittels linearer Regression fortgeschrieben und lässt vermuten, dass sich das Abfallaufkommen im Jahr 2030 im Vergleich zum Jahr 2005 verdoppelt haben wird (Bendix et al. 2021). So stehen im Jahr 2030 potenziell über 1,1 Mio. Tonnen an Kunststoffen aus dem Baubereich für ein Recycling zur Verfügung (siehe Abbildung A 27).

Abbildung A 27: Abfallaufkommen von Kunststoffen aus dem Baubereich 2005–2017 einschließlich geschätzter Entwicklung bis 2030



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Bendix et al. (2021)

Eine aktuelle Studie, die insbesondere PVC in den Blick nimmt, prognostiziert einen Anstieg der PVC-Abfallmengen in den Hauptanwendungsbereichen Profile, Rohre und Bodenbeläge. Demnach wird die Menge von 246.000 Tonnen im Jahr 2022 auf voraussichtlich 449.000 Tonnen im Jahr 2050 ansteigen (Schmidt et al. 2024).

PVC stellt etwa 29 % des im Baubereich verbauten Kunststoffes dar (siehe Abbildung A 26). Für den Vergleich der Prognose wurde angenommen, dass dieser Anteil sich analog auf die

Abfallmengen übertragen lässt. Basierend auf den Daten von Bendix et al. (2021) für das Jahr 2022 läge das Abfallaufkommen von PVC demnach bei rund 261.000 Tonnen. Damit weisen die Prognosen sehr ähnliche Größenordnungen auf.

A.8.4 Handlungsbedarf für eine optimierte Urban Mining Strategie

Der Gebäudebestand steht vor einer Sanierungswelle, bei der der Umgang mit kunststoffbasierten Bauprodukten entscheidend für Ressourcenschutz und Klimaziele ist. Die wachsenden Mengen an Kunststoffabfällen stellen die Entsorgungs- und Kreislaufwirtschaft vor neue technische, organisatorische und rechtliche Anforderungen.

Kunststoffe werden im Bau aufgrund ihres geringen Massenanteils gegenüber mineralischen Baustoffen und den damit verbundenen logistischen, organisatorischen sowie technologischen Herausforderungen meist im Gemisch erfasst und werden vorrangig energetisch verwertet. Sie treten selten in ausreichender Qualität bzw. (Sorten-)Reinheit auf, zusätzlich erschwert der Umgang mit Schadstoffen eine aufwendige, kostenintensive Aufbereitung. Deshalb werden Kunststofffraktionen im Abbruch oft nicht prioritär behandelt. Zusätzlich sind ihre Rückgewinnung und Qualität begrenzt, da Recyclingzyklen vieler Kunststoffe limitiert sind und der Rückbau, z. B. von verklebten oder mit Putz haftenden Dämmstoffen, technisch anspruchsvoll ist.

Forschungsarbeiten im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (zuvor Bildung und Forschung) und des Umweltbundesamtes zeigen, dass die Rezyklierbarkeit von Kunststoffen im Bausektor verbessert werden kann. Zentral sind dabei eine recyclinggerechte Planung und Einbau sowie der Ausbau von geeigneten Rücknahmesystemen (z. B. Verbundprojekt KARE (Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) 2023))

Außerdem bestehen ökologische Vorteile: Durch gezielte Sammlung und Recycling von Kunststoffbauprodukten wie Rohrabschnitten, Dämmstoffen, Bodenbelägen und Fensterrahmen könnten erhebliche Treibhausgaseinsparungen erzielt werden: 16 % der THG-Emissionen aller Kunststoffe im Bausektor ließen sich vermeiden (Subal & Wiprächter 2023). Zusätzlich kann die Sortierung und das Recycling von PE, PP und PVC aus Bausperrgut weitere 11 % der Emissionen einsparen (Subal & Wiprächter 2023). Haupthemmnis bleibt die Finanzierung, da es derzeit an Anreizen für saubere Materialtrennung mangelt und die günstige Entsorgung in Müllverbrennungsanlagen die Sortierung unattraktiv macht.

Erfassung, Trennung & Aufbereitung

Eine große Herausforderung für das Recycling stellt die fehlende Getrennterfassung dar. Bei Abbrüchen ist eine getrennte Erfassung von Kunststoffen, abgesehen von Verpackungsmaterialien, unüblich. Ausschlaggebend sind die, im Vergleich zu mineralischen Abfallmengen, geringen Massenanteile an Kunststoffen (Bendix et al. 2021; Bergs et al. 2021).

Der Ausbau vieler Kunststoffprodukte ist umständlich bis unmöglich. Besonders problematisch ist die sortenreine Trennung von Dämmstoffen, die oft mit Putz, Kleber oder Anhaftungen belastet sind. Für die Baustelle ist es vielfach einfacher und ggf. auch kostengünstiger, keinen sortenreinen Rückbau von Dämmstoffen und damit keine stoffliche Verwertung anzustreben (Reinhardt et al. 2022). Neben der sauberen und sortenreinen Sammlung und Bereitstellung, stellen auch Aufbereitung und Behandlung einen großen Mehraufwand dar, der dazu führt, dass Sekundärrohstoffen teurer sein können als Primärrohstoffe (Reinhardt et al. 2022). Der Erlös aus Sekundärkunststoff deckt die Mehrkosten bei Rückbau oder Abbruch meist nicht (Bendix et al. 2021). Somit besteht neben einem geringen Masseanteil auch ein geringer Materialwert

(verglichen mit Metallen) (Bergs et al. 2021). Die Problematik wird durch die rechtliche Situation verschärft: Zwar schreibt § 8 GewAbfV eine getrennte Sammlung von Kunststoffabfällen vor, bei technischen oder wirtschaftlich unzumutbaren Bedingungen ist jedoch eine gemeinsame Entsorgung mit dem Bauschutt zulässig (Bendix et al. 2021).

Um wirtschaftliche Hemmnisse beim sortenreinen Rückbau zu überwinden, könnten finanzielle Anreize ergänzend zu gesetzlichen Vorgaben geschaffen werden. Eine Verteuerung der Beseitigungskosten würde den Mehraufwand für den sortenreinen Rückbau lohnenswert machen, da stoffliche Entsorgungswege dadurch wirtschaftlich attraktiver werden (Reinhardt et al. 2022). Mit der Einführung finanzieller Anreize für den sortenreinen Rückbau sollte auch die Subventionierung von Produkten mit Sekundärrohstoffanteilen erfolgen. Dies schafft einen wirtschaftlichen Ausgleich und erhöht die Wettbewerbsfähigkeit von Produkten mit Recyclingmaterial gegenüber Primärprodukten (Reinhardt et al. 2022).

Technologische Herausforderungen

Viele aktuelle Sortieranlagen erkennen zum Beispiel schwarzes Plastik nicht zuverlässig (Fraunhofer LBF 2025). Außerdem fehlt es bislang an Technologien für hartnäckig verbaute Kunststoffe z. B. bei verklebten Dämmstoffen. Dämmstoffe lassen sich in Abhängigkeit von der Verbauweise und aufgrund ihrer Ausführung als Verbundbaustoff teilweise nur schwer sauber und sortenrein bereitstellen. Rückstände des Klebemörtels von der Verklebung am Untergrund bleiben am Dämmstoff oft haften und gelangen somit in den Verwertungsweg. Auf der Baustelle schwer trennbar sind außerdem Mauersteine, die mit Dämmstoff gefüllt sind. Die Auftrennung von Klebverbindungen oder ausgeschäumten Mauersteine, ist kaum möglich. Auch bei Flachdachdämmungen, die mit Bitumen vergossen oder durch aufgeschweißte Bitumenbahnen fest verbunden (verbacken) sind, bleibt nach dem Abtrennen stets eine gewisse Anhaftung bestehen. (Reinhardt et al. 2022)

Handlungsbedarf gibt es daher im Bereich effizienter und praxistauglicher Ausbau- und Sortierverfahren, aber auch bei der Schadstoffentfernung ist verstärkte Forschung und Entwicklung notwendig. Bestehende Recyclingverfahren stoßen an ihre Grenzen – innovative Techniken zur Entfernung von Störstoffen und Schadstoffen sind erforderlich, etwa physische, chemische oder enzymatische Methoden (Schmidt et al. 2024). Mechanischen Recyclingverfahren wird aufgrund ihres geringeren Energieverbrauchs der Vorrang eingeräumt. Sie sind effizient, technisch ausgereift und wirtschaftlich. Allerdings können nicht alle Kunststofffraktionen mechanisch verarbeitet werden, insbesondere für stark kontaminierte oder stofflich komplexe Materialien sind chemische Recyclingverfahren als ergänzende Technologien notwendig (Kehl & Rioussat 2024).

Aktuell existieren labor- und pilotmaßstäbliche Verfahren, um HBCD und weitere kritische Flammschutzmittel aus EPS und XPS zu extrahieren (z.B. mittels PS-Loop, CreaSolv®- oder solventbasierter Prozesse) und so einen Sekundärrohstoff zu gewinnen, der recycelbar ist. Allerdings ist dieses Vorgehen technisch anspruchsvoll und wirtschaftlich (noch) herausfordernd. Bei Fehlschlag verbleibt einzig die thermische Verwertung als zulässige Entsorgungsoption. (Fehn et al. 2019)

Hier stellen allerdings Wirtschaftlichkeit und technische Hürden große Herausforderungen dar (Bendix et al. 2021).

Regulierung und Politikgestaltung

Um das Kunststoffrecycling bzw. den Rezyklateinsatz in Deutschland zu fördern, werden in verschiedenen Bereichen Maßnahmen vorgeschlagen, die produktspezifische Rezyklateinsatzquoten oder polymerspezifische Quoten umfassen. Grundsätzlich liegen die Vorteile einer

polymerspezifischen Quote²⁰ in ihrer großen Hebelwirkung über alle Kunststoffe hinweg und fördert somit den Gesamtmarkt für Rezyklate branchenübergreifend. Demgegenüber erhöht eine produktspezifische Quote gezielt den Rezyklateinsatz in einzelnen Produktbereichen, birgt jedoch das Risiko, dass Rezyklate aus anderen, nicht quotierten Bereichen umgelenkt werden, ohne die Gesamtmenge zu steigern. Allerdings können produktspezifische Quoten gezielt bestimmte Rezyklatqualitäten in gewünschte Anwendungen lenken und dadurch hochwertiges Recycling sichern. (Betz et al. 2022) Derzeit besteht eine Rezyklat-Quote für PET-Einwegflaschen in der EU und Deutschland (Einwegkunststoffrichtlinie 2019). Denkbar wäre eine breitere Anwendung der gesetzlichen Rezyklat-Quote, die auch die Baubranche miteinschließt (Science Media Center 2022).

Recyclinggerechtes Bauen und der Erfolg stofflicher Verwertung hängen primär von sortenreinem Rückbau, praxisgerechten Konstruktionslösungen und einer breiten Akteursbeteiligung entlang der gesamten Wertschöpfungskette ab. Durch eine gezielte politische Gestaltung von Regulierungen können diverse zukünftige Herausforderungen bereits im Zuge von Bauvorhaben adressiert und erheblich reduziert werden:

- ▶ Bauweisen bewusst so wählen, dass Dämmstoffe zerstörungsfrei und möglichst ohne Anhaftungen rückgebaut werden können
- ▶ Standards zum selektiven Rückbau und zur getrennten Bereitstellung in Ausschreibungen und Vergabepaxis vorschreiben. Es besteht Handlungsbedarf, damit Recyclingkunststoffe in öffentlichen Ausschreibungen berücksichtigt und nicht von vornherein ausgeschlossen werden (Bendix et al. 2021)
- ▶ Die Einführung einer erweiterten Herstellerverantwortung (wie in Frankreich ab 2022 für Baustoffe): Hersteller müssen Rücknahme und Entsorgung sortenreiner Materialfraktionen sicherstellen, dies könnte auch spezielle Sammelstrukturen und Investitionen in Recyclingtechnologien anreizen (Reinhardt et al. 2022)

A.8.5 Quellenverzeichnis Steckbrief „Kunststoffe im Hoch- und Tiefbau“

Albrecht, W.; Schwitalla, C. (2015): Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS: Möglichkeiten der Wiederverwertung von Bestandteilen des WDVS nach dessen Rückbau durch Zuführung in den Produktionskreislauf der Dämmstoffe bzw. Downcycling in die Produktion minderwertiger Güter bis hin zur energetischen Verwertung. Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau (IRB) Verlag, Stuttgart. <https://www.irbnet.de/daten/rswb/15029008835.pdf> (17.06.2025)

Bendix, P.; Berg, H.; Sebestyén, J.; Ritthoff, M.; Perschel, L.; Eckert, D.; Kocina, R.; Achenbach, H. (2021): Förderung einer hochwertigen Verwertung von Kunststoffen aus Abbruchabfällen sowie der Stärkung des Rezyklateinsatzes in Bauprodukten im Sinne der europäischen Kunststoffstrategie. Umweltbundesamt (Hg.), Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021-11-23_texte_151-2021_rebaupro_0.pdf (13.05.2025)

Bergs, L.; Dobers, K.; Feil, A.; Fricke, C.; Hülsmann, T.; Koller, M.; Kopka, J.-P.; Mohmeyer, S.; Netsch, N.; Ritthoff, M.; Sartorius, I.; Simons, M.; Stapf, D.; Walter, G.; Wendler, K. (2021): Schlussbericht zum BMBF-Verbundvorhaben „KUBA – Nachhaltige Kunststoffwertschöpfungskette: Pilotfall Kunststoffe in Bauwirtschaft und

²⁰ Die polymerspezifische PCR-Quote verpflichtet die Hersteller von Primärkunststoffen dazu, für jede in der EU in Umlauf gebrachte Menge an Kunststoffgranulat auch einen festgelegten Anteil an Post-Consumer-Rezyklat (PCR) auf den Markt zu bringen. (Betz et al. 2022)

Gebäuden“. S. 1–54. https://dechema.de/-p-20114105/_/BMBF_FKZ_033R214A-F_KUBA_Schlussbericht.pdf (17.07.2025)

Betz, J.; Hermann, A.; Bulach, W.; Hermann, C.; Dieroff, J.; Mehlhart, G.; Müller, R.; Wiesemann, E. (2022): Prüfung konkreter Maßnahmen zur Steigerung der Nachfrage nach Kunststoffzyklen und rezyklathaltigen Kunststoffprodukten. Umweltbundesamt (Hg.), Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_128-2022_pruefung_konkreter_massnahmen_zur_steigerung_der_nachfrage_nach_kunststoffzyklen_und_rezyklathaltigen_kunststoffprodukten.pdf (24.07.2025)

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) (2023): Kompetenzen Aufbauen für die Kreislaufwirtschaft von Kunststoffen (KARE). <https://www.zukunft-der-wertschoepfung.de/projekte/kompetenzen-aufbauen-fuer-die-kreislaufwirtschaft-von-kunststoffen-kare/> (23.07.2025)

Destatis (2025a): Abfallentsorgung: Deutschland, Jahre, Abfallarten; Code: 32111-0002. <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/url/1d74c6af> (17.07.2025)

Destatis (2025b): Abfallentsorgung: Deutschland, Jahre, Anlagenart, Abfallarten; Code: 32111-0004. <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/url/a152d6a1> (17.07.2025)

Einwegkunststoffrichtlinie (2019): Richtlinie (EU) 2019/904 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 über die Verringerung der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt, S. 1–19. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj> (17.09.2025)

European PVC Window Profile and related Building Products Association (EPPA) (2018): Kunststoff-Fensterprofilesysteme mit Rezyklatanteil Wissenswertes über den Einsatz von Rezyklat in Kunststofffenstersystemen. https://www.gkfp.de/fileadmin/user_upload/News_WirinderPresse/2018/EPPA_Positionspapier_Recyclinganteil.pdf (25.06.2025)

Fehn, T.; Teipel, U.; Schweppe, R.; Schulz, D. (2019): Recycling von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS). Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hg.). S. 1–93. <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/88328> (17.09.2025)

Fraunhofer LBF (2025): Wiederverwerten statt wegwerfen: Effizientes Recycling und erweiterte Nutzung von kunststoffhaltigen Abfallströmen. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF) (Hg.). <https://www.lbf.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/waste-for-future-werkstoffliches-recycling-kreislaufwirtschaft.html> (17.09.2025)

GewAbfV (2022): Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung - GewAbfV), In der Fassung der Bekanntmachung vom 18. April 2017 (BGBl. I S. 896), zuletzt geändert durch Artikel 3 der Verordnung vom 28. April 2022, BGBl. I S. 700, 720, S. 1-12. https://www.gesetze-im-internet.de/gewabfv_2017/GewAbfv.pdf (25.08.2025)

Hengstmann, E.; Tamminga, M. (2022): Was ist Plastik? In: Hengstmann, E.; Tamminga, M. [Hrsg.]: Plastik in der Umwelt: Wo kommt es her, wo geht es hin und wie wirkt es sich aus? Springer, Berlin, Heidelberg. S. 1–17. https://doi.org/10.1007/978-3-662-65864-2_1

Hoffmann, A.; Ganz, P. (2025): Circular Economy im Bausektor – Chancen und Perspektiven unter Berücksichtigung von Stoffströmen. Ludwig-Fröhler-Institut – Forschungsinstitut im Deutschen Handwerksinstitut (Hg.). https://lfi-muenchen.de/wp-content/uploads/2025/02/250206_Zirkula%CC%88re_Verwendung_im_Bausektor.pdf (09.07.2025)

Jetzke, T.; Richter, S. (2020): Hochwertiges Recycling für eine Kunststoffkreislaufwirtschaft. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) (Hg.). DOI: 10.5445/IR/1000133939 <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000133939> (17.09.2025)

- Kehl, C.; Rioussel, P. (2024): Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes. Mit Fallstudien zu Kunststoffverpackungen, Elektrogeräten sowie Baustoffen. Arbeitsbericht Nr. 207, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) (Hg.), Berlin. https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/01-bvse/2024/0311-TAB-Arbeitsbericht_AB207.pdf (08.05.2025)
- Klimaforum Bau (2021): Kunststoffprodukte in der Baubranche: Vorteile, Probleme, Lösungsansätze. <https://klimaforum-bau.de/2021/06/kunststoffprodukte-in-der-baubranche-vorteile-probleme-loesungsansaetze/>. (17.07.2025)
- Klingler, M.; Kaschub, J. (2024): Infoblatt Biokunststoffe. ECOBIS - Ökologisches Baustoffinformationssystem. <https://www.wecobis.de/service/sonderthemen-info/gesamttxt-biokunststoffe-info.html>. (16.09.2025)
- Kunststoffrohrverband e.V. (KRV) [Hrsg.] (2019): Kreislaufwirtschaft in der Kunststoffrohrindustrie. KRV impulse, Mai 2019, S. 1–8. https://krv.de/wp-content/uploads/2025/02/krv-impulse-web_210519.pdf (25.06.2025)
- Lindner, C.; Schmitt, J.; Fischer, E.; Hein, J. (2022): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen – Kurzfassung. Conversio Market & Strategy GmbH (Hg.), Mainaschaff. https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/03-Kunststoff/2022/Kurzfas-sung_Stoffstrombild_2021_13102022_1_.pdf (17.07.2025)
- Lindner, C.; Schmitt, J.; Hein, J. (2020): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019. Conversio Market & Strategy GmbH (Hg.), Mainaschaff. https://www.conversio-gmbh.com/res/News_Media/2020/Kurzfas-sung_Stoffstrombild_2019.pdf (25.06.2025)
- Muchow, N.; Knappe, F.; Reinhardt, J. (2022): Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes – Themenfeld: Bauabfälle. Gutachten im Auftrag des Deutschen Bundestages – vorgelegt dem Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag; ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg, Berlin.
- Reinhardt, J.; Veith, C.; Knappe, F.; Mellwig, P. (2022): Der Gebäudebestand steht vor einer Sanierungswelle – Dämmstoffe müssen sich den Materialkreislauf erschließen. Endbericht. Forschungsprojekt, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (AZ 34426_02-25) und dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft BadenWürttemberg. ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg, Berlin. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/pdf/2022_04_07_D%C3%A4mmstoffe_II_JR_CV_FK.pdf (17.09.2025)
- Schmidt, S.; Verni, X.-F.; Aguirre Molina, L.; Biwer, A.; Gibon, T.; Laner, D. (2024): Schadstoffbedingte Herausforderungen für PVC-Kreisläufe im Bausektor in Deutschland. In: Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT) und Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV) [Hrsg.]: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft. Vol. 76, No. 9, S. 382–392. <https://doi.org/10.1007/s00506-024-01057-0>
- Science Media Center (2022): Kunststoffrecycling in Deutschland und der EU: Probleme und Lösungen. Science Media Center Germany gGmbH (Hg.). https://media.sciencemediacenter.de/legacy/user_upload/Fact_Sheets_PDF/Kunststoffrecycling-in-Deutschland-und-der-EU_SMC-Factsheet_24112022.pdf (17.09.2025)
- Subal, L.; Wiprächter, M. (2023): Circoplast – Circular Construction Plastics. realcycle GmbH (Hg.), Zürich. S. 1–23. https://realcycle.ch/wp-content/uploads/2023/10/Abschlussbericht_Circoplast.pdf (17.09.2025)
- Umweltbundesamt (UBA) (2025): Kunststoffabfälle. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfaelle> (18.07.2025)

B Anhang - Übersicht auf wichtige Strategien, Initiativen und Rahmensetzungen mit Schnittstellen zur nationalen Urban Mining Strategie (UMS)

In den nachfolgenden beiden Tabellen sind wichtige Strategien, Initiativen und Rahmensetzungen mit Schnittstellen zur nationalen Urban Mining Strategie (UMS) aufgelistet. Die Auflistung ist nur eine qualitative Auswahl und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Wie aus den umfassenden Ausführungen zu den Aktionsfeldern und Querschnittsthemen zu entnehmen ist, muss eine nationale Urban Mining Strategie stets im Kontext zu vielen bestehenden und zukünftigen Schnittstellen gesehen werden.

Tabelle A 15: Nationale Ebene (Deutschland)

Strategien, Initiativen, Rahmensetzungen	Wesentliche Schnittstellen zur UMS	Bemerkungen	Quelle
GreenTech Innovationswettbewerb – Digitale Technologien als Hebel für die Kreislaufwirtschaft, Förderaufruf auf Grundlage des Förderprogramms „Entwicklung digitaler Technologien“	Querschnittsthema Digitalisierung	Hat Relevanz für alle Aktionsfelder und Querschnittsthemen	(BMW 2025)
Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie - NKWS	Alle Aktionsfelder und prioritären Querschnittsthemen	UMS ist wichtiger Teilbereich der NKWS	(BMUV 2024)
Förderung von Projekten zum Thema „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Urban Mining: Erschließung anthropogener Lager als Rohstoffquelle“	Vor allem Bezug zum Aktionsfeld „Mineralische Baustoffe im Hochbau sowie in Straßen und Brücken“ sowie zu den prioritären Querschnittsthemen	Aktueller Schwerpunkt vor allem auf die wirtschaftliche Erschließung ungenutzter Sekundärrohstoffpotenziale aus Bergbau- und Hüttenhalden, Schlacken, Müllverbrennungsrückständen, Filterstäuben und -schlämmen und aus Gebäuden, Infrastruktur und langlebigen Gütern	(BMFTR 2024a)
Integrierte Sicherheit für Deutschland. Wehrhaft. Resilient. Nachhaltig. Nationale Sicherheitsstrategie	Alle Aktionsfelder und prioritären Querschnittsthemen	Übergreifende Strategie	(Bundesregierung 2023)
Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz - ElektroG)	Aktionsfeld Elektro(nik)geräte	Veränderung mittelfristig zu erwarten in Folge der Revision der europäischen WEEE Directive	(ElektroG 2022)

Strategien, Initiativen, Rahmensetzungen	Wesentliche Schnittstellen zur UMS	Bemerkungen	Quelle
Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke (Ersatzbaustoffverordnung – ErsatzbaustoffV)	Aktionsfeld Mineralische Baustoffe im Hochbau sowie in Straßen und Brücken	Gültige Verordnung	(ErsatzbaustoffV 2021)
Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III – 2020 bis 2023) - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen	Alle Aktionsfelder und prioritären Querschnittsthemen	Kann als teilweise als Vorläuferprogramm zur NKWS aufgefasst werden	(BMU 2020)
Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie, Weiterentwicklung 2021	Alle Aktionsfelder und Querschnittsthemen	Übergreifende Strategie	(Bundesregierung 2020)
Rohstoffstrategie der Bundesregierung, Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nicht-energetischen mineralischen Rohstoffen	Adressiert die überwiegende Zahl der prioritären Aktionsfelder	Vorläuferstrategie für aktuellere Strategien	(BMWi 2019)

Tabelle A 16: EU-Ebene

Strategien, Initiativen, Rahmensetzungen	Wesentliche Schnittstellen zur UMS	Bemerkungen	Quelle
European Commission: The Clean Industrial Deal: A joint roadmap for competitiveness and decarbonisation	Alle Aktionsfelder und prioritären Querschnittsthemen	Übergreifende Strategie	(EU COM 2025a)
European Commission: COMMUNICATION FROM THE COMMISSION Ecodesign for Sustainable Products and Energy Labelling Working Plan 2025-2030	Viele prioritäre Aktionsfelder	Übergreifende Strategie: relevant vor allen bzgl. Produktpässen	(EU COM 2025d)
Verordnung (EU) 2024/1781 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-	Viele prioritäre Aktionsfelder	Übergreifende Strategie	(ESPR 2024)

Strategien, Initiativen, Rahmensetzungen	Wesentliche Schnittstellen zur UMS	Bemerkungen	Quelle
Anforderungen für nachhaltige Produkte			
Critical Raw Materials Act (CRMA)	Alle Aktionsfelder, die relevant für kritische Rohstoffe sind	Übergreifende Strategie	(CRMA 2024)
Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Anforderungen an die kreislauforientierte Konstruktion von Fahrzeugen und über die Entsorgung von Altfahrzeugen	Aktionsfeld Fahrzeuge	AltfahrzeugVO befindet sich aktuell im Revisionsprozess	(AltfahrzeugVO-Entwurf 2023)
Verordnung (EU) 2023/1542 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien	Aktionsfelder Fahrzeuge sowie Lithium-Ionen-Batterien: Stationäre Anwendungen	In den kommenden Jahren gelten für eine Reihe wichtiger Zielgrößen wie Recyclingquoten verbindliche Vorgaben	(BattVO 2023)
European Commission: A new Circular Economy Action Plan. For a cleaner and more competitive Europe	Alle Aktionsfelder und prioritären Querschnittsthemen	Basisstrategie für aktuellere Strategien	(EU COM 2020)