

TEXTE

47/2022

Kartierung des anthropogenen Lagers III (KartAL III)

Abschlussbericht

TEXTE 47/2022

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3716 35 323 0

FB000616

Kartierung des anthropogenen Lagers III (KartAL III)

Abschlussbericht

Von

Dr. Matthias Buchert; Daniel Bleher, Dr. Winfried Bulach

Öko-Institut e. V., Rheinstraße 95, 64295 Darmstadt

Florian Knappe, Nadine Muchow, Joachim Reinhardt

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
gGmbH, Wilckensstraße 3, 69120 Heidelberg

Ingo Meinshausen

Ifu Hamburg GmbH, Max-Brauer-Allee 50, 22765
Hamburg

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

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Öko-Institut e. V.
Rheinstr. 95
64295 Darmstadt

Abschlussdatum:

Mai 2021

Redaktion:

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

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, April 2022

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

Kurzbeschreibung: Kartierung des anthropogenen Lagers III (KartAL III)

Das Vorhaben „KartAL III - Kartierung des Anthropogenen Lagers III – Etablierung eines Stoffstrommanagements unter Integration von Verwertungsketten zur qualitativen und quantitativen Steigerung des Recyclings von Metallen und mineralischen Baustoffen“ untersuchte intensiv die Stoffströme und Verwertungswege von sieben Metallen bzw. Legierungen und neun mineralischen Baustoffen.

Das Ziel des Vorhabens war es, einen systematischen und partizipativen Beitrag zur Fortentwicklung der Kreislaufwirtschaft zu einer ressourcenschonenden Stoffstromwirtschaft zu leisten. Die im Fokus stehenden Materialien wurden im Hinblick auf das Recycling dahingehend untersucht, welche Qualitäten erreicht werden müssen, um als Ersatz für Primärmaterialien dienen zu können. Zusätzlich wurden noch weitere Einsatzpotenziale von Rezyklaten identifiziert. Dies wurde mit allen beteiligten Akteuren diskutiert, um sensitive Wertschöpfungsstufen zu identifizieren, in denen äußere Einflüsse dazu führen, dass es zu keinem hochwertigen Recycling der Sekundärrohstoffe kommt. Es wurden Probleme identifiziert und Lösungsansätze dazu entwickelt. Zudem wurde dieser Prozess durch eine Mengenstromprognostik unterstützt, um relevante Abfallströme zu identifizieren, deren Verbesserung eine große Wirkung entfalten kann. Diese Prognose beinhaltet für die betrachteten Materialien eine Modellierung der zukünftigen Entwicklungen, welche wichtige Trends wie z. B. die Elektromobilität berücksichtigt. Der Rückfluss an Materialien aus dem anthropogenen Lager zurück in den Wirtschaftskreislauf und die Wirkung des Recyclings auf Verluste wurde hiermit dargestellt. Im Fokus des Vorhabens standen die beiden Materialgruppen „Mineralische Bau- und Abbruchabfälle“ sowie „Basis- und Sondermetalle“.

Abstract: Mapping of the Anthropogenic Material Stock III (KartAL III)

The project "KartAL III - Mapping of the Anthropogenic Material Stock III - Establishment of Material Flow Management with the Integration of Recovery Chains for the Qualitative and Quantitative Increase of the Recycling of Metals and Mineral Building Materials" intensively investigates the material flows and recovery paths of seven non-ferrous metals and alloys and nine mineral building-materials.

The aim of the project is to make a systematic and participatory contribution to further developing the circular economy into a resource-saving material flow economy. The materials in focus were examined regarding recycling to determine which material qualities must be achieved for them to substitute primary materials. In addition, further potential uses of the recycled materials were identified. The findings were discussed with all involved stakeholders to identify sensitive value creation stages in which external influences might lead to a lack of high-quality recycling of secondary raw materials. Problems were identified and approaches to solving them were developed. In addition, this process was supported by a volume-flow forecast aiming to identify relevant waste flows whose improvement could have a major impact. This forecast includes modelling of future developments for the materials under consideration, considering important trends such as electromobility. The return flow of materials from the anthropogenic material stock back into the economic cycle and the effect of recycling on losses are illustrated. The project focused on the two material groups "mineral construction and demolition waste" and "base and special metals".

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis.....	14
Abkürzungsverzeichnis.....	17
Zusammenfassung.....	19
Summary	36
1 Einführung und Ziele des Vorhabens	53
2 Arbeitsschritte und Methodik	55
2.1 Dialogforen und Abschluss Symposium	55
2.2 Verwertungsprognostik	57
2.2.1 DyMAS.....	58
3 Baumineralik.....	62
3.1 Baustoffe im Überblick – Eine Zusammenfassung der Factsheets	63
3.2 Akteure der Kreislaufwirtschaft Bau – Aufgaben und Schnittstellen	67
3.3 Hemmnisse und Lösungsstrategien zur Förderung der Kreislaufwirtschaft Bau.....	70
3.3.1 Absatz von mineralischen Sekundärrohstoffen.....	70
3.3.2 Optimierung von Aufbereitungsstrategien.....	73
3.3.3 Struktur Logistik.....	78
3.3.4 Schaffung von Marktanreizen für ressourcenschonende Baustoffe	78
3.3.5 Konzeption von Rückbau, Abbruch und Entsorgung	83
3.3.6 Recyclinggerechtes Bauen	86
3.3.7 Zusammenfassung	88
3.4 Stoffstromanalyse für die Beispielregionen Kurpfalz und Berlin	91
3.4.1 Methodisches Vorgehen.....	91
3.4.1.1 Betrachtete Beispielregionen	91
3.4.1.2 Wohngebäudebestand in Fläche und Volumen	93
3.4.1.3 Nichtwohngebäudebestand in Fläche und Volumen	94
3.4.1.4 Prognose Gebäudebestand	96
3.4.1.5 Ersatzneubaubedarf und Sanierung	99
3.4.1.6 Gebäude: Von Fläche und Volumen zu Materialmassen.....	100
3.4.1.7 Bestand und Prognose Tiefbau.....	102
3.4.2 Ergebnisse	105
3.4.2.1 Gebäude Kurpfalz und Berlin.....	105
3.4.2.2 Infrastruktur Kurpfalz und Berlin.....	110

3.4.2.3	Gesamtbestand Kurpfalz und Berlin	114
3.4.2.4	Output RC-Baustoffe.....	118
3.4.2.5	Zusammenfassung der Beispielregionen.....	124
3.4.3	Unsicherheiten und Plausibilisierung	126
4	Metalle	129
4.1	Metalle im Überblick – Eine Zusammenfassung der Factsheets	129
4.2	Verwertungsprognostik (Verwertungswege, Datenquellen, Ergebnisse).....	133
4.2.1	Sektor 1: Technische Güter im Hochbau	136
4.2.2	Sektor 2: Mobile Güter in Gebäuden (ohne Elektrogeräte)	143
4.2.3	Sektor 3: Mobile Güter in Gebäuden (Elektrogeräte).....	148
4.2.4	Sektor 4: Stromerzeugungsanlagen	154
4.2.5	Sektor 5: Stromnetze	164
4.2.6	Sektor 6: Fahrzeuge	171
4.2.7	Sektor 7: Verkehrsinfrastruktur	179
4.2.8	Sektor 8: Industrieanlagen.....	187
4.2.9	Sektor 9: Maschinen	192
4.3	Gesamtübersicht über das Materiallager, die Outputströme und den Verbleib der einzelnen Metalle.....	198
4.4	Hemmnisse und Lösungsansätze	206
4.4.1	Technische Optimierung: Verbesserte Detektion von Schrotten.....	206
4.4.2	Technische Optimierung: MVA Schlackenaufbereitung	207
4.4.3	Technische Optimierung: Pooling Transportdienstleistungen	208
4.4.4	Regulatorische Ansätze: Wirkung Strompreise und Klimaschutz	208
4.4.5	Regulatorische Ansätze: Regelungen Altfahrzeuge	210
4.4.6	Regulatorische Ansätze: Vollzug WEEE Regulierung	211
4.4.7	Verbesserter Informationsfluss: Image Recyclingbranche	212
4.4.8	Verbesserter Informationsfluss: Anreize zur Steigerung der Erfassung aus privaten Haushalten	212
4.4.9	Information und Austausch: Runder Tisch / Kommunikationsplattform Chemikalienrecht - Kreislaufwirtschaft.....	212
4.4.10	Zusammenfassung	214
5	Übergreifende Schlussfolgerungen	216
6	Quellenverzeichnis	221
A	Anhang	227

B	Anhang Dialogforen zu mineralischen Baustoffen (02.11.2017 in Berlin, 20.11.2017 in Heidelberg).....	238
B.1	Auswertung und Diskussion.....	238
C	Anhang Dialogforen zu mineralischen Baustoffen (30.11.2018 in Ludwigshafen, 12.12.2018 in Berlin)	249
C.1	Auswertung der Diskussion.....	249
D	Anhang Dokumentation des ersten Dialogforums im Projekt KartAL III zu Basis- und Sondermetallen	257
D.1	Hintergrund der vorliegenden Dokumentation	257
D.1.1	Aluminium und Magnesium.....	258
D.1.2	Messing und Zink	261
D.1.3	Edelstahl.....	263
D.1.4	Zinn	266
E	Anhang Dokumentation 2. Dialogforum zu Basis- und Sondermetallen im Projekt KartAL III (04./05.12.2018 Hüttenmagazin Duisburg).....	270
E.1	Hintergrund der vorliegenden Dokumentation	270
E.2	Faktenchecks der behandelten Metallsysteme	270
E.2.1	Konzept Anthropogenes Lager erläutern	271
E.2.2	Zeitliche Veränderung aufgrund technischer Veränderung berücksichtigen.....	271
E.2.3	Hinweis zu Statistiken bzgl. Produzentenländer vs. Handelsländer	271
E.2.4	Unterschiedliche Schrottqualitäten	271
E.2.5	Grafische Darstellung Verwertungswege	272
E.3	Stoffstromprognostik.....	272
E.4	Lösungsräume für ein optimiertes Stoffstrommanagement	273
E.4.1	Schnittstelle Abfallrecht und Chemikalienrecht	273
E.4.2	Auswertung der vorgeschlagenen Lösungsraume und die Bewertung der Teilnehmenden	275
F	Anhang Dokumentation KartAL III Abschluss Symposium – 2. Juli 2019.....	284
F.1	Begrüßung und Einführung KartAL III Projekt	284
F.2	Ressourcenschutz durch Urban Mining: Projektreihe KartAL & Rechenmodell DyMAS	285
F.3	Zentrale Projektergebnisse nach Materialsystem	285
F.4	Baumineralik	285
F.4.1	Rückmeldungen auf die Vorstellung der Projektergebnisse.....	285
F.4.2	Workshop am Nachmittag	286
F.5	Basis- und Sondermetalle	289

F.5.1	Rückmeldungen auf die Vorstellung der Mengenstromprognostik und Szenarien Metalle	290
F.5.2	Diskussionsbeiträge zu den Lösungsansätzen	291
F.6	Zusammenführung der Ergebnisse und Abschlussstatements	293
F.6.1	Zusammenführung der Ergebnisse	293
F.6.2	Abschlussstatement des Vertreters des GDA - Gesamtverband der Aluminiumindustrie	293
F.6.3	Abschlussstatement Vertreter Senatsverwaltung Umwelt, Klima und Verkehr Berlin ..	293
F.7	Verabschiedung der Teilnehmenden	294

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Übersicht der DyMAS Systemkomponenten	58
Abbildung 2:	Grafisches Rechenmodell aus KartAL II	59
Abbildung 3:	Erweitertes grafisches Rechenmodell aus KartAL III	60
Abbildung 4:	Schematische Darstellung der derzeitigen und potentiellen Verwertungswege: Beispiel Mauerziegel	63
Abbildung 5:	Kreislaufwirtschaft Bau: relevante Akteure der Bau- und Entsorgungswirtschaft und deren Schnittstellen	68
Abbildung 6:	Denkrichtung einer rohstofforientierten Aufbereitungsstrategie	73
Abbildung 7:	Mittels optischer Farbsortierung separiertes Ziegelgranulat (vorne) und dessen Ausgangsmaterial (hinten)	74
Abbildung 8:	Vorgehen zur Ermittlung des Wohngebäudebestands	94
Abbildung 9:	Vorgehen zur Ermittlung des Nichtwohngebäudebestands	95
Abbildung 10:	Vorgehen zur Prognose des Gebäudebestands und der In- und Outputs aus dem Gebäudelager.....	99
Abbildung 11:	Entwicklung der Wohn- bzw. Nutzflächen im Bestand in der Kurpfalz und Berlin	105
Abbildung 12:	Entwicklung der im Wohn- (WG) und Nichtwohngebäudebestand (NWG) in der Kurpfalz und Berlin verbauten Materialmassen	107
Abbildung 13:	Prognostizierte Massenflüsse in (positiv) und aus (negativ) dem Gebäudelager untergliedert nach Bestandsvergrößerung (Zubau) bzw. Bestandsverkleinerung (Netto-Abriss), Ersatzneubau und Sanierungstätigkeiten von Wohn- (WG) und Nichtwohngebäuden (NWG) in der Kurpfalz und in Berlin	109
Abbildung 14:	Prognostizierte Materialflüsse in und aus dem Bestand für die Jahre 2018, 2025 und 2030 für Wohn- (WG) und Nichtwohngebäude (NWG) in der Kurpfalz und in Berlin	110
Abbildung 15:	Prognostizierter Materialbestand für den Infrastrukturbereich in der Kurpfalz und in Berlin	111
Abbildung 16:	Prognostizierte Massenflüsse in (positiv) und aus (negativ) dem Infrastrukturlager untergliedert nach Bestandsvergrößerung (Zubau) bzw. Bestandsverkleinerung (Netto-Abriss) und Bestandserhaltung in den Bereichen Verkehr und Netze in der Kurpfalz und in Berlin	113
Abbildung 17:	Prognostizierte Materialflüsse in und aus dem Bestand für die Jahre 2018, 2025 und 2030 für die Summe der Infrastruktur in der Kurpfalz und in Berlin	114
Abbildung 18:	Entwicklung der im Gesamtbestand verbauten Materialmassen (Gebäude und Infrastruktur) in der Kurpfalz und in Berlin	115
Abbildung 19:	Prognostizierte Massenflüsse in (positiv) und aus (negativ) dem Gesamtbestand untergliedert nach Bestandsvergrößerung	

	(Zubau) bzw. Bestandsverkleinerung (Netto-Abriss) und Bestandserhaltung von Gebäuden und Infrastruktur in der Kurpfalz und in Berlin	117
Abbildung 20:	Prognostizierte Materialflüsse in und aus dem Bestand für die Jahre 2018, 2025 und 2030 für die Summe aus Gebäuden und Infrastruktur in der Kurpfalz und in Berlin	118
Abbildung 21:	Output RC-Baustoffe aus dem Gesamtbestand der Kurpfalz (Gebäude und Infrastruktur (Inf)) mit konventioneller, mittlerer und perspektivischer Aufbereitung	121
Abbildung 22:	Output RC-Baustoffe aus dem Gesamtbestand Berlins (Gebäude und Infrastruktur (Inf)) mit konventioneller, mittlerer und perspektivischer Aufbereitung	122
Abbildung 23:	Output an RC-Gesteinskörnung für den Einsatz im R-Beton (Typ I, Typ II) jeweils aus dem Hoch- und Tiefbau der Kurpfalz und Berlins vs. Bedarf an solcher RC-Gesteinskörnung, um den zugebauten Beton als R-Beton ausführen zu können	124
Abbildung 24:	Verwertungswege des Aluminiums in verschiedenen Produkten	130
Abbildung 25:	Im- und Export von aluminiumhaltigen Stoffen in 2015	131
Abbildung 26:	Hauptverwendungsgebiete des Aluminiums	132
Abbildung 27:	Generalisierter Verwertungsweg der Güter und Metalle	136
Abbildung 28:	Güterbestand Sektor 1 Technische Güter im Hochbau 2015-2040	138
Abbildung 29:	Güterentnahme Sektor 1 Technische Güter im Hochbau 2015-2040	140
Abbildung 30:	Materialbestand Sektor 1 Technische Güter im Hochbau 2015-2040	141
Abbildung 31:	Materialentnahme Sektor 1 Technische Güter im Hochbau 2015-2040	142
Abbildung 32:	Materialverbleib Sektor 1 Technische Güter im Hochbau 2020 – 2030 - 2040	143
Abbildung 33:	Güterbestand Sektor 2 Mobile Güter in Gebäuden (ohne Elektrogeräte) 2015-2040	145
Abbildung 34:	Güterentnahme Sektor 2 Mobile Güter in Gebäuden (ohne Elektrogeräte) 2015-2040	146
Abbildung 35:	Materialbestand Sektor 2 Mobile Güter in Gebäuden (ohne Elektrogeräte) 2015-2040	147
Abbildung 36:	Materialentnahme Sektor 2 Mobile Güter in Gebäuden (ohne Elektrogeräte) 2015-2040	147
Abbildung 37:	Materialverbleib Sektor 2 Mobile Güter in Gebäuden (ohne Elektrogeräte) 2020 – 2030 - 2040	148
Abbildung 38:	Güterbestand Sektor 3 Mobile Güter in Gebäuden (Elektrogeräte) 2015-2040	150

Abbildung 39:	Güterentnahme Sektor 3 Mobile Güter in Gebäuden (Elektrogeräte) 2015-2040	151
Abbildung 40:	Materialbestand Sektor 3 Mobile Güter in Gebäuden (Elektrogeräte) 2015-2040	152
Abbildung 41:	Materialentnahme Sektor 3 Mobile Güter in Gebäuden (Elektrogeräte) 2015-2040	152
Abbildung 42:	Materialverbleib Sektor 3 Mobile Güter in Gebäuden (Elektrogeräte) 2020 – 2030 - 2040.....	153
Abbildung 43:	Marktanteile verschiedener Antriebstechnologien in neu installierten Windenergieanlagen nach Jahren in %	156
Abbildung 44:	Güterbestand Sektor 4 Stromerzeugungsanlagen: konventionelle Kraftwerke 2015-2040.....	158
Abbildung 45:	Güterentnahme Sektor 4 Stromerzeugungsanlagen: konventionelle Anlagen 2015-2040.....	159
Abbildung 46:	Güterbestand Sektor 4 Stromerzeugungsanlagen: EE- Anlagen 2015-2040.....	160
Abbildung 47:	Güterentnahme Sektor 4 Stromerzeugungsanlagen: EE-Anlagen 2015-2040.....	161
Abbildung 48:	Materialbestand Sektor 4 Stromerzeugungsanlagen: konventionelle und EE-Anlagen 2015-2040	162
Abbildung 49:	Materialentnahme Sektor 4 Stromerzeugungsanlagen: konventionelle und EE-Anlagen 2015-2040	162
Abbildung 50:	Materialverbleib Sektor 4 Stromerzeugungsanlagen: konventionelle und EE-Anlagen 2020 – 2030 - 2040.....	164
Abbildung 51:	Güterbestand Sektor 5 Stromnetze 2015-2040	167
Abbildung 52:	Güterentnahme Sektor 5 Stromnetze 2015-2040.....	168
Abbildung 53:	Materialbestand Sektor 5 Stromnetze 2015-2040	169
Abbildung 54:	Materialentnahme Sektor 5 Stromnetze 2015-2040	169
Abbildung 55:	Materialverbleib Sektor 5 Stromnetze 2020 – 2030 - 2040 ...	170
Abbildung 56:	Güterbestand Sektor 6 Fahrzeuge mit Wechsel Richtung Elektromobilität 2015-2040.....	173
Abbildung 57:	Güterbestand Sektor 6 übrige Fahrzeuge 2015-2040	174
Abbildung 58:	Güterentnahme Sektor 6 Fahrzeuge mit Wechsel Richtung Elektromobilität 2015-2040.....	175
Abbildung 59:	Güterentnahme Sektor 6 übrige Fahrzeuge 2015-2040.....	175
Abbildung 60:	Materialbestand Sektor 6 Fahrzeuge 2015-2040	177
Abbildung 61:	Materialentnahme Sektor 6 Fahrzeuge 2015-2040	177
Abbildung 62:	Materialverbleib Sektor 6 Fahrzeuge 2020 – 2030 - 2040	179
Abbildung 63:	Güterbestand Sektor 7: Verkehrsinfrastruktur 2015-2040	184
Abbildung 64:	Güterentnahme Sektor 7: Verkehrsinfrastruktur 2015-2040	185
Abbildung 65:	Materialbestand Sektor 7 Verkehrsinfrastruktur 2015-2040.	186
Abbildung 66:	Materialentnahme Sektor 7 Verkehrsinfrastruktur 2015-2040	186

Abbildung 67:	Materialverbleib Sektor 7 Verkehrsinfrastruktur 2020 – 2030 - 2040.....	187
Abbildung 68:	Güterbestand Sektor 8 Industrieanlagen 2015-2040	189
Abbildung 69:	Güterentnahme Sektor 8 Industrieanlagen 2015-2040	189
Abbildung 70:	Materialbestand Sektor 8 Industrieanlagen 2015-2040	190
Abbildung 71:	Materialentnahme Sektor 8 Industrieanlagen 2015-2040	191
Abbildung 72:	Materialverbleib Sektor 8 Industrieanlagen.....	192
Abbildung 73:	Güterbestand Sektor 9 Maschinen 2015-2040	194
Abbildung 74:	Güterentnahme Sektor 9 Maschinen 2015-2040.....	195
Abbildung 75:	Materialbestand Sektor 9 Maschinen 2015-2040	196
Abbildung 76:	Materialentnahme Sektor 9 Maschinen 2015-2040	196
Abbildung 77:	Materialverbleib Sektor 9 Maschinen 2020 – 2030 - 2040	197
Abbildung 78:	Bestandsentwicklung für Aluminium von 2015-2040 gegliedert nach Sektoren.....	199
Abbildung 79:	Bestandsentwicklung für Edelstahl von 2015-2040 gegliedert nach Sektoren.....	199
Abbildung 80:	Bestandsentwicklung für Zink von 2015-2040 gegliedert nach Sektoren	200
Abbildung 81:	Bestandsentwicklung für Zinn von 2015-2040 gegliedert nach Sektoren	201
Abbildung 82:	Bestandsentwicklung für Messing von 2015-2040 gegliedert nach Sektoren.....	201
Abbildung 83:	Bestandsentwicklung für Magnesium von 2015-2040 gegliedert nach Sektoren.....	202
Abbildung 84:	Bestandsentwicklung für Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial von 2015-2040 gegliedert nach Sektoren	203
Abbildung 85:	Überblick ausgewählter Lösungsansätze.....	206
Abbildung 86:	Betrachtete Verwertungswege für Beton, Kalksandstein, Mauerziegel, Dachziegel, Mineralwolle, Gips, Flachglas jeweils mit einer Aufbereitung wie im Status Quo und einer perspektivischen Aufbereitung mit jeweils massenmäßiger Aufteilung der Materialströme und der daraus gewonnenen RC-Baustoffe	231
Abbildung 87:	Hemmnisfelder und Lösungsansätze zur Verbesserung des Recyclings	276
Abbildung 88:	Ansatzpunkt 1: Verbesserte Detektion: Förderung neuer Sortiertechnologien wie XRT, XRF, LIBS.....	277
Abbildung 89:	Ansatzpunkt 2: Entwicklung neuer Verfahren zur Entfernung von Beschichtungen	277
Abbildung 90:	Ansatzpunkt 3: MVA Schlackenaufbereitung: Neue Verfahren für Input und Output & Vorgaben (Maximalgehalte, Verwertungsoptionen)	278

Abbildung 91:	Ansatzpunkt 4: Nutzung und Leistungsfähigkeit Abfalltransporte (für Produktionsabfälle) steigern278
Abbildung 92:	Ansatzpunkt 1: Wirkung bestehender Regelungen prüfen279
Abbildung 93:	Ansatzpunkt 2: Bestehende Regelungen besser durchsetzen280
Abbildung 94:	Ansatzpunkt 3: Pfandsystem Elektrogeräte281
Abbildung 95:	Ansatzpunkt 4: Level Playingfield281
Abbildung 96:	Ansatzpunkt 1: Öffentliche Wahrnehmung stärken.....282
Abbildung 97:	Ansatzpunkt 2: Erfassung aus privaten Haushalten steigern .282
Abbildung 98:	Ansatzpunkt 3: Wissen um Anwendungsbereiche ausbauen 283
Abbildung 99:	Ansatzpunkt 4: EU Design für Recycling Preis283

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Beispielhafte Berücksichtigung von umweltbezogenen Bewertungskriterien im Vergabeprozess80
Tabelle 2:	Zentrale Lösungsansätze entlang der Akteurskette zur Optimierung des Verwertungsprozesses von Bau- und Abbruchabfällen88
Tabelle 3:	Spezifika der Beispielregionen.....91
Tabelle 4:	Betrachtete Nichtwohngebäudetypen (fett), wie diese spezifiziert werden und die dafür für 2018 ermittelten Flächennachfragen für die Kurpfalz bzw. Berlin.....96
Tabelle 5:	Angesetzte zukünftige Wohnflächennachfrage für Wohngebäude in der Kurpfalz und in Berlin97
Tabelle 6:	Angesetzte Bevölkerungsentwicklung in der Kurpfalz und in Berlin.....98
Tabelle 7:	Ableitung der Nachfrageentwicklung für Nichtwohngebäudetypen in der Kurpfalz und in Berlin, die über SVB spezifiziert werden98
Tabelle 8:	Angesetzter jährlicher Ersatzneubaubedarf für die verschiedenen Nichtwohngebäudetypen bezogen auf den Bestand99
Tabelle 9:	Angesetzter Betonanteil an Summe der Wandbaustoffe (Beton, Mauerwerk + Leichtbaustoffe) für die Gebäudetypen im Bestand und im Neubau101
Tabelle 10:	Anteil von Mauerziegel, Kalksandstein und Porenbeton an den Mauerwerksbaustoffen (Summe Mauerwerk und Leichtbaustoffe) im Mittel von 2012 bis 2016101
Tabelle 11:	Angesetzte Gleis- und Wasserweglänge für die Kurpfalz und Berlin.....103
Tabelle 12:	Angesetzte Werte zu Längen bzw. Flächen bzw. Stück des Infrastrukturbestands sowie der Erneuerungs- und Neubautätigkeit in der Kurpfalz und Berlin103

Tabelle 13:	Input in den Wohngebäudebestand der Kurpfalz im Vergleich nach Modell und Bautätigkeitsstatistik im Jahr 2016	126
Tabelle 14:	Input in den Wohngebäudebestand Berlins im Vergleich nach Modell und Bautätigkeitsstatistik im Jahr 2016	127
Tabelle 15:	Sektorübersicht der Verwertungsprognostik	135
Tabelle 16:	Übersicht Sektor 1 Technische Güter im Hochbau (Güter und enthaltene Materialien)	138
Tabelle 17:	Verteilung zwischen Wohn- und Nichtwohngebäude (basierend auf begründeten Annahmen)	139
Tabelle 18:	Übersicht Sektor 1: Materialentnahme aus dem anthropogenen Lager (in t).....	142
Tabelle 19:	Übersicht Sektor 2 Mobile Güter in Gebäuden (ohne Elektrogeräte) (Güter und enthaltene Materialien).....	145
Tabelle 20:	Übersicht Sektor 2: Materialentnahme aus dem anthropogenen Lager (in t).....	148
Tabelle 21:	Übersicht Sektor 3 Mobile Güter in Gebäuden (Elektrogeräte) (Güter und enthaltene Materialien).....	149
Tabelle 22:	Übersicht Sektor 3: Materialentnahme aus dem anthropogenen Lager (in t).....	153
Tabelle 23:	Übersicht Sektor 4 Stromerzeugungsanlagen (Güter und enthaltene Materialien)	155
Tabelle 24:	Übersicht Sektor 4: Materialentnahme aus dem anthropogenen Lager (in t).....	163
Tabelle 25:	Sektor 5: Status Quo Netzlängen (in km) und Ausbaupläne für unterschiedliche Spannungsebenen	165
Tabelle 26:	Übersicht Sektor 5 Stromnetze (Güter und enthaltene Materialien)	165
Tabelle 27:	Übersicht Sektor 5: Materialentnahme aus dem anthropogenen Lager (in t).....	170
Tabelle 28:	Übersicht Sektor 6 Fahrzeuge (Güter und enthaltene Materialien)	171
Tabelle 29:	Übersicht Sektor 6: Materialentnahme aus dem anthropogenen Lager (in t).....	178
Tabelle 30:	Zuordnung von Straßenbegleitinfrastruktur auf die Straßenkategorien nach Baulastträgern.....	181
Tabelle 31:	Materialkoeffizienten nach Straßenkategorie	182
Tabelle 32:	Übersicht Sektor 7 Verkehrsinfrastruktur (Güter und enthaltene Materialien)	183
Tabelle 33:	Sektor 7: Status Quo Straßennetzlängen und jährliche Ausbaupläne 2015-2030 und 2030-2040 (in km)	183
Tabelle 34:	Übersicht Sektor 7: Materialentnahme aus dem anthropogenen Lager 2015-2040 (in t)	187

Tabelle 35:	Übersicht Sektor 8 Industrieanlagen (Güter und enthaltene Materialien)	188
Tabelle 36:	Übersicht Sektor 8: Materialentnahme aus dem anthropogenen Lager (in t).....	191
Tabelle 37:	Übersicht Sektor 9 Maschinen (Güter und enthaltene Materialien)	194
Tabelle 38:	Übersicht Sektor 9: Materialentnahme aus dem anthropogenen Lager (in t).....	197
Tabelle 39:	Gesamtmateriallager in Deutschland für die Jahre 2015/2020/2030/2040 in t sowie die prozentuale Änderung	198
Tabelle 40:	Gesamtmaterialoutputs aus dem deutschen Lager für die Jahre 2015/2020/2030/2040 sowie die Summen und die prozentualen Änderungen (in t)	204
Tabelle 41:	Verbleib der verschiedenen Metalle für die Jahre 2020/2030/2040 (in t)	205
Tabelle 42:	Investitionskosten und Kennwerte automatisierter Detektionsverfahren.....	207
Tabelle 43:	Zentrale Lösungsansätze entlang der Akteurskette zur Optimierung der Verwertungsprozesse von Metallen und - Legierungen	214
Tabelle 44:	Prognostizierte Materialien und Outputs aus dem Bestand in der Kurpfalz für die in der Aufbereitung betrachteten Materialien	227
Tabelle 45:	Prognostizierte RC-Baustoffoutputs für die Kurpfalz mit konventioneller, mittlerer und perspektivischer Aufbereitung	227
Tabelle 46:	Prognostizierte Materialin- und outputs aus dem Bestand in Berlin für die in der Aufbereitung betrachteten Materialien.	229
Tabelle 47:	Prognostizierte RC-Baustoffoutputs für Berlin mit konventioneller, mittlerer und perspektivischer Aufbereitung	229
Tabelle 48:	Aluminium und Magnesium: Hemmnis und Lösungsansatz ..	258
Tabelle 49:	Messing: Hemmnis und Lösungsansatz	261
Tabelle 50:	Zink: Hemmnis und Lösungsansatz.....	262
Tabelle 51:	Edelstahl: Hemmnis und Lösungsansatz	263
Tabelle 52:	Zinn: Hemmnis und Lösungsansatz	266

Abkürzungsverzeichnis

AVV	Abfallverzeichnisverordnung
BAB	Bundesautobahn
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BGBI	Bundesgesetzblatt
BIM	building information modeling
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BNB	Bewertungssystem Nachhaltige Bauen
BRI	Brutto-Rauminhalt
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DepV	Deponie-Verordnung
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V.
EFH	Einfamilienhaus
FSS	Frostschutzschicht
GewAbfV	Gewerbeabfallverordnung
ggü.	gegenüber
km	Kilometer
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
kt	Kilotonnen (1.000 Tonnen)
LAGA M20	Mitteilung 20 der Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LAGA M34	Mitteilung 34 der Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
MFH	Mehrfamilienhaus
Mio.	Millionen
MW	Megawatt
n.d.	nicht definiert
NWG	Nicht-Wohngebäude
R-Beton	ressourcenschonender Beton
RC	Recycling
RC-Baustoff	Recycling-Baustoff
STS	Schottertragschicht
SVB	sozialversicherungspflichtig Beschäftigte
t	Tonnen
TL Gestein-StB 04	Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Ausgabe 2004, Fassung 2007

TL SoB-StB 04	Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau, Ausgabe 2004, Fassung 2007
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
v. H.	von Hundert
WEA	Windenergieanlage
WG	Wohngebäude
ZFH	Zweifamilienhaus

Zusammenfassung

Die Projektreihe „Kartierung des Anthropogenen Lagers“ des Umweltbundesamtes schafft die wissenschaftlichen Grundlagen für ein tieferes Verständnis des anthropogenen Lagers in Deutschland. Übergeordnetes Ziel ist: Materialien, die in Gütern und Bauwerken gebunden sind, über Urban Mining möglichst umfassend zurückzugewinnen und hochwertig zu verwerten. Das Vorhaben „KartAL III - Kartierung des Anthropogenen Lagers III – Etablierung eines Stoffstrommanagements unter Integration von Verwertungsketten zur qualitativen und quantitativen Steigerung des Recyclings von Metallen und mineralischen Baustoffen“ untersuchte dafür intensiv die Stoffströme und Verwertungswege von sieben Metallen bzw. Legierungen und neun mineralischen Baustoffen.

Das Ziel des Vorhabens war es, einen systematischen und partizipativen Beitrag zur Fortentwicklung der Kreislaufwirtschaft zu einer ressourcenschonenden Stoffstromwirtschaft zu leisten. Die im Fokus stehenden Materialien wurden im Hinblick auf das Recycling dahingehend untersucht, welche Qualitäten erreicht werden müssen, um als Ersatz für Primärmaterialien dienen zu können. Zusätzlich wurden noch weitere Einsatzpotenziale von Rezyklaten identifiziert. Dies wurde mit allen beteiligten Akteuren diskutiert, um sensitive Wertschöpfungsstufen zu identifizieren, in denen äußere Einflüsse dazu führen, dass es zu keinem hochwertigen Recycling der Sekundärrohstoffe kommt. Es wurden Probleme identifiziert und Lösungsansätze dazu entwickelt. Zudem wurde dieser Prozess durch eine Mengenstromprognostik unterstützt, um relevante Abfallströme zu identifizieren, deren Verbesserung eine große Wirkung entfalten kann. Diese Prognose beinhaltet für die betrachteten Materialien eine Modellierung der zukünftigen Entwicklungen, welche wichtige Trends wie z. B. die Elektromobilität berücksichtigt. Der Rückfluss an Materialien aus dem anthropogenen Lager zurück in den Wirtschaftskreislauf und die Wirkung des Recyclings auf Verluste wurde hiermit dargestellt. Im Fokus des Vorhabens standen die beiden Materialgruppen „Mineralische Bau- und Abbruchabfälle“ sowie „Basis- und Sondermetalle“. Jede der Hauptgruppen setzt sich zusammen aus einem vom Umweltbundesamt vorgegeben Set an Materialien bzw. Rohstoffen.

- ▶ Mineralische Bau- und Abbruchabfälle: Beton, Kalksandstein, Poren und Leichtbeton, Ziegel, Flachglas, Dämmstoffe, Gipsbaustoffe, Putze und Mörtel, Fliesen und Keramik.
- ▶ Basis- und Sondermetalle: Edelstähle und ihre Legierungselemente, Messing, Zink, Zinn, Aluminium, Magnesium und Seltene Erden in Magneten.

Die beiden Hauptgruppen wurden in paralleler Weise von den Projektpartnern bearbeitet, flankiert durch einen kontinuierlichen Fachaustausch zwischen den beiden Teams. Das Öko-Institut verantwortete die Bearbeitung der Basis- und Sondermetalle, das ifeu Institut bearbeitete die Gruppe der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle. Aufgrund der klaren Zuordnung der Zuständigkeiten nach Partnern, findet sich auch in der Darstellung der Projektergebnisse eine Aufteilung in Mineralische Bau- und Abbruchabfälle sowie Basis- und Sondermetalle wieder.

Akteursdialoge im Vorhaben

Die Bearbeitung der Projekthinhalte erfolgte im engen Austausch mit allen relevanten Akteursgruppen der involvierten Branchen, der Entsorgungs- und Verwertungswirtschaft, Fachleuten aus dem wissenschaftlichen Spektrum sowie Verantwortlichen aus Landesbehörden unterschiedlicher Ressorts. Neben zahlreichen Einzelgesprächen wurden in 2 Dialogrunden insgesamt 6 Dialogveranstaltungen durchgeführt. Mit der Einbindung zu den ein- bzw. zweitägigen Dialogveranstaltungen wurden folgende Ziele erreicht:

- ▶ Identifikation von Verwertungshemmnissen
- ▶ Diskussion von Lösungsansätzen
- ▶ Validierung von Projektergebnissen
- ▶ Austausch und Vernetzung von Praxisakteuren
- ▶ Wissensvermittlung

Zur Vorstellung der Projektergebnisse wurde zusätzlich ein Abschluss-symposium durchgeführt. Der Ablauf, die Erkenntnisse und die Diskussionsstränge der einzelnen Veranstaltungen sind dokumentiert und im Anschluss an die Teilnehmenden versandt worden. Die Dokumentationen hierzu finden sich in den Anhängen des Gesamtberichts.

Dialogforen Mineralische Bau- und Abbruchabfälle

Die erste Dialogrunde wurde im November 2017 veranstaltet. Um die regionalen Rahmenbedingungen der zwei ausgewählten Untersuchungsgebiete (Berlin und Kurpfalz) ausreichend zu berücksichtigen, wurden die Dialogforen in Heidelberg und in Berlin durchgeführt. Die zwei eintägigen Veranstaltungen waren inhaltlich analog konzipiert: sechs Themenschwerpunkte wurden hintereinander durch eine wechselnde Kerngruppe von max. acht Teilnehmenden unter Leitung eines Moderators diskutiert. In Anlehnung an das Fishbowl-Prinzip war es den zuhörenden Teilnehmenden möglich, sich an dem Gespräch zu beteiligen. Zusätzlich war nach jeder Themenrunde Zeit für Fragen und Ergänzungen aus dem Auditorium vorgesehen. Die folgenden sechs Schwerpunkte wurden diskutiert:

- ▶ Kreislaufführung mineralischer Baustoffe aus dem Hochbau
- ▶ Praxisbeispiel: R-Beton
- ▶ Herstellung von RC-Baustoffen für den Hochbau – Entwicklung neuer Produkte auf Basis sekundärer Rohstoffe
- ▶ Bauschuttrecycling vor neuen Herausforderungen
- ▶ Optimierung von Sammlung und Logistik für Bauabfälle
- ▶ Ausgestaltung von Entkernung und Abbruch

Alle Teilnehmenden wurden im Vorfeld mit Hintergrundpapieren über die Themensetzung und den Ablauf informiert. Mit 21 bzw. 24 Teilnehmenden waren die Dialogforen mit Fachleuten gut besetzt. Die Dokumentation der ersten Dialogforen zu mineralischen Baustoffen findet sich in Anhang B zum Gesamtbericht.

Auch die zweite Dialogrunde im Dezember 2018 wurde analog in Berlin (21 Teilnehmende) und Ludwigshafen (14 Teilnehmende) durchgeführt. Zur Vorbereitung erhielten die Teilnehmenden drei Thesenpapiere. Am Vormittag wurden die Zwischenergebnisse präsentiert, der Nachmittag war einem moderierten Gesprächsteil vorbehalten, der sich durch kurze Impulsvorträge in drei Themenschwerpunkte gliederte:

- ▶ Optimierung der Getrennthaltung ab der Baustelle

- ▶ Ausschreibung, Vergabe, Label und Akzeptanz
- ▶ Ausbildung zur Ressourcenschonung

Die Dokumentation der zweiten Dialogforen zu mineralischen Baustoffen findet sich in Anhang C zum Gesamtbericht.

Dialogforen Basis- und Sondermetalle

Die beiden jeweils zweitägigen Dialogforen zu den Basis- und Sondermetallen fanden am 05./06. Dezember 2017 sowie 04./05. Dezember 2018 im Hüttenmagazin im Landschaftspark Duisburg-Nord statt.

Im Vorfeld der ersten Veranstaltung wurden Hintergrundpapiere an die Teilnehmenden versandt und es wurden Stoffstromplakate erstellt, anhand welcher die Diskussion zu den Hemmnissen strukturiert durchgeführt werden konnte. An den Stoffstromplakaten wurde das jeweilige Hemmnis mittels selbstklebender Karten an die jeweilige Stelle des Metallkreislaufs angebracht und mittels Fotos sowie Protokoll dokumentiert. Ziel des ersten Dialogforums war die Identifizierung von Hemmnissen im Recycling der betrachteten Metalle und die Sammlung von ersten Lösungsvorschlägen zum Abbau dieser Hemmnisse. Am ersten Tag lag der Fokus in der einen Gruppe auf Magnesium und Aluminium und in der anderen Gruppe auf Messing und Zink. Am zweiten Tag lag der Fokus auf Zinn und Edelstahl. Die Ergebnisse zu den Defiziten und Hemmnisse für eine bessere Erschließung des anthropogenen Lagers bei den Basis- und Sondermetallen wurden gemeinsam diskutiert und dokumentiert. Die Dokumentation des ersten Dialogforums zu den Basis- und Sondermetallen findet sich in Anhang D.

Die Ergebnisse des Dialogforums wurden im weiteren Projektverlauf verarbeitet und ausgebaut. Auf dem zweiten Dialogforum lag der Fokus auf:

- ▶ Inhalte der Factsheets zu den im Projekt untersuchten Metallsystemen
- ▶ Stoffstrommodellierung der Metallsysteme im anthropogenen Lager
- ▶ Hemmnisse und Lösungsansätze für ein verbessertes Stoffstrommanagement

Die Metalle wurden wie im ersten Dialogforum auf die beiden Veranstaltungstage verteilt diskutiert. Die Diskussion aus dem ersten Dialogforum wurde im zweiten Dialogforum intensiviert und vertieft. Es ist zu berücksichtigen, dass der Status-Quo bei der Kreislaufwirtschaft bei den meisten Basis- und Sondermetallen im Vergleich zu den mineralischen Bau- und Abbruchabfällen ein ausgereifteres Niveau darstellt. Ungeachtet dessen gilt es noch bestehende Optimierungsmöglichkeiten mit geeigneten Maßnahmen und Instrumenten in den nächsten Jahren zu erschließen. Die Dokumentation des zweiten Dialogforums zu den Basis- und Sondermetallen findet sich in Anhang E.

Abschlusssymposium

Die Vorstellung der Projektergebnisse erfolgte am 2. Juli 2019 in Berlin. Der Teilnehmerkreis umfasste erstmals Akteure und Interessierte der beiden Materialkategorien gemeinsam. Vorgestellt wurden die Berechnungen und das methodische Vorgehen zur Entwicklung der Stoffströme des anthropogenen Lagers und die erarbeiteten Optimierungsansätze der Wertsungsketten der untersuchten Metalle und Baumaterialien. Darauf aufbauend wurden in mehreren Workshops am Nachmittag die vorgeschlagenen Maßnahmen und Instrumente nochmals kritisch diskutiert.

Als Inhalte für die Workshops Baumineralik wurden folgende Themenschwerpunkte gewählt: Anforderungen und Umsetzung der Gewerbeabfallverordnung, Vorgehensweisen bei öffentlichen Vergabeverfahren zur Stärkung des Einsatzes von RC-Baustoffen. Parallel wurden in den Workshops der Basis- und Sondermetalle die Ergebnisse der Stoffstromprognostik sowie der Hemmnisse und Lösungsansätze vertieft. Die Dokumentation des Abschluss Symposiums findet sich in Anhang F.

Verwertungsprognostik

Neben den bereits dargestellten Arbeitsschritten zur Identifizierung relevanter Akteure, der Zusammenstellung von Informationen zu den untersuchten Stoffströmen sowie den Gesprächen und Dialogveranstaltungen zur Identifizierung von Hemmnissen und der Entwicklung von Lösungsansätzen, war eine weitere Aufgabe im Vorhaben eine Verwertungsprognostik zu entwickeln. Diese ermöglichte es, weitere Optimierungsbedarfe in den Verwertungswegen zu identifizieren und auch zukünftige Veränderungen in den Stoffströmen sowie daraus resultierende Probleme vorherzusagen. Hierbei wurden aktuelle und vorhersehbare Trends (z. B. Entwicklung der Elektromobilität, verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien) in den Stoffströmen gesammelt und in Stoffstrommodellen quantifiziert. Diese Stoffstrommodelle wurden im System DyMAS, welches im folgenden Kapitel erläutert wird, aufgebaut. Die einzelnen Annahmen der Modellierung und weitere Details sowie die Ergebnisse werden im Gesamtbericht in den Kapiteln 3.4 für Baumineralik und 4.2 für Metalle und Legierungen dargestellt und erläutert.

Das Stoffstrommodell DyMAS

Das System DyMAS (Dynamic Modelling of Anthropogenic Stocks) umfasst im Kern einen Wissensspeicher, eine Datenbank für Güterflüsse und –bestände sowie deren Zusammensetzung. Das Wissensmanagement sämtlicher Daten im Wissensspeicher wird über eine Web-Oberfläche bereitgestellt. Für den Import von Stamm- und Bewegungsdaten wird ein Excel-Austauschformat genutzt und die Web-Oberfläche des Wissensspeichers erlaubt den Im- und Export in und aus den entsprechenden Excel-Dokumenten.

Die Trennung von Stamm- und Bewegungsdaten erlaubt die Nutzung der Stammdaten in den Bewegungsdaten aller Datenprojekte und ermöglicht so die Vergleichbarkeit von Ergebnissen. Auf der Ebene der Datenbank erlaubt sie die Sicherstellung der Datenkonsistenz durch referentielle Integrität zwischen Stamm- und Bewegungsdaten. Die Stammdaten umfassen Materialien und Güter und deren Hierarchien, Einheiten und Eigenschaften. Die im Rahmen des Vorgängerprojektes KartAL II entwickelten Stammdaten wurden in diesem Projekt genutzt und um spezielle Güter und Materialien erweitert.

Die Bewegungsdaten bestehen aus Güterflüssen und –beständen und deren Zusammensetzung aus Materialien. Im Gegensatz zu den Stammdaten haben Bewegungsdaten auch stets einen Zeitbezug. Dies gilt auch für die Definition der quantitativen Zusammensetzung der Güter aus Materialien, d. h. auch die Güter-Material-Dualität ist variabel in der Zeit. Durch Eigenschaften ist es möglich die Stamm- und Bewegungsdaten variabel zu erweitern, ohne die Struktur der Datenbank anpassen zu müssen.

Das dynamische Rechenmodell erlaubt die Analyse des anthropogenen Lagers der Bundesrepublik und Ausschnitten davon basierend auf den entsprechenden Daten im Wissensspeicher. Bestandteil fast jeder Analyse ist die Betrachtung der künftigen Entwicklung des Sekundärrohstoffaufkommens aus dem Bestand langlebiger, ortsfester und beweglicher Güter. Hierbei erleichtert besonders das grafische Rechenmodell die Verständlichkeit und die Nutzbarkeit des Systems und schafft Transparenz anstatt Algorithmen in einer „Black Box“ zu verstecken.

Umgesetzt wurde dies mit Hilfe eines universellen Konzeptes für Modelle von Energie- und Stoffströmen, den Stoffstromnetzen. Diese erlauben eine konsistente Betrachtung von Beständen und Flüssen mit Zeitbezug und sind mit wenigen Modellelementen und Verknüpfungsregeln gut durchschaubar und gleichzeitig flexibel und mächtig. Stoffstromnetze setzen sich zusammen aus Prozessen, die Stofftransformationen beschreiben, und Stellen, die Prozesse verknüpfen und Bestände lagern. Die grafische Modellierung erlaubt die Verknüpfung von Grafik und Logik.

Das grafische Rechenmodell wurde als Stoffstrommodell in der Standard-Software Umberto realisiert. Das anthropogene Lager ist im Rechenmodell über das zentrale Güter-Lager, die Analyse- und Synthese-Prozesse und die Lebensdauer-basierte Entnahme von Gütern umgesetzt. Das Güter-Lager nimmt die langlebigen Güter-Bestände auf und kann mit Hilfe der Materialzusammensetzungen auch Information zu den Material-Beständen im anthropogenen Lager liefern. Die Analyse- und Synthese Prozesse berechnen aus den Zu- und Abflüssen des Güter-Lagers die Materialflüsse, die die Verwertungs- und Herstellungsteilnetze durchlaufen.

Der Prozess zur Entnahme von Güter-Flüssen anhand der Güter-Lebensdauer prüft die Eigenschaften der Bestände im Güter-Lager und erzeugt Abflüsse aus dem Güter-Lager entsprechend der Werte der Bestandeseigenschaften. Die hier beschriebenen Elemente des Rechenmodells werden durch die Daten im Wissensspeicher, wie z. B. die Güterzusammensetzung und die Eigenschaften von Güter-Flüssen und -Beständen, gesteuert. Die Prozesse im Stoffstrommodell sind generisch implementiert und benötigen nur minimale Anpassungen, um Daten aus anderen Kontexten verarbeiten zu können.

Die von den Analyse- und Synthese-Prozessen erzeugten Materialflüsse durchlaufen während der Berechnung die Teilnetze zur Verwertung und Herstellung. Die Materialflüsse werden hier anhand ihrer Eigenschaften z. B. in Bezug auf Kontamination, Materialverbund, Verwertungsszenarien und generisches Recycling weiterverarbeitet. Die beiden Teilnetze sind auf Erweiterbarkeit ausgelegt und können z. B. um spezielle Verwertungsszenarien für einzelne Materialien oder Materialgruppen erweitert werden.

Im Rahmen des KartAL III Projektes wurden sektorübergreifende Verwertungswege im Rechenmodell umgesetzt. Diese basieren auf Datenerfassungen von Öko-Institut und ifeu und können über zeitabhängige Parametersätze konfiguriert werden. Mit Hilfe dieser konnten Szenariovergleiche (Heute/Zukunft, konventionell/mittel/ambitioniert) berechnet werden.

Die Daten im Wissensspeicher stehen für direkte Auswertungen und für den Import in das Rechenmodell zur Verfügung. Die Schnittstelle zwischen Wissensspeicher und Rechenmodell wird von der Web-Oberfläche des DyMAS-Systems bereitgestellt. Es können mehrere Projekte des Wissensspeichers in einem Export für das Stoffstrommodell zusammengefasst werden. Zur Fokussierung auf einen Teildatenbestand ist es möglich, die zu exportierenden Güter und Materialien zu filtern. In Umberto wird ein solcher Export in die Vorlage des Rechenmodells importiert und kann dann berechnet werden. Die Konfiguration, an welcher Stelle im Rechenmodell die Daten gespeichert werden sollen, geschieht über Bezeichner der Elemente im Stoffstromnetz. Je nach Datenverfügbarkeit und Fragestellung können Stoffhaushalte sehr detailliert, aber auch nur anhand von wenigen verfügbaren Daten dargestellt und berechnet werden.

Zur Berechnung des mit Daten aus dem Wissensspeicher gefüllten Stoffstrommodells werden, ausgehend von den bekannten Flüssen und Beständen und deren Eigenschaften, die Güter- und Material-Flüsse und -Bestände für die untersuchten Zeitperioden errechnet. Flüsse und Bestände von Materialien verfügen an jeder Stelle im Rechenmodell über alle Informationen ihrer Ursprungsgüter. Unterstützt wird die Erstellung und Berechnung von Prognosen durch die, über Verteilungsfunktionen gesteuerte, Entnahme von Beständen nach Ablauf ihrer

Lebensdauer, da diese einen Ausblick in die Zukunft, basierend auf Güter-Zuflüssen für ein Bezugsjahr, ermöglicht.

Die Auswertung der Ergebnisse kann über Sankey-Diagramme direkt im Rechenmodell oder für weiterführende Analysen und Reporting im Export aller Rohdaten nach Excel geschehen. Für den Export nach Excel wurden in KartAL III die Templates um Pivot-Tabellen und -Charts erweitert, sodass direkt Auswertungen in UBA-Formatierung zur Verfügung stehen. Im Rahmen dieses Projektes wurde weiterhin eine Erweiterung des DyMAS Systems zur Unterstützung des Anwenders bei der Durchführung von Szenario-Analysen ergänzt.

Stoffstrom Mineralik

Die Bilanzierung der Stoffströme der mineralischen Baustoffe gliedert sich in die Bereiche Hochbau (Wohn- und Nichtwohngebäude) und Tief- und Ingenieurbau (Straßen, Tunnel, Brücken etc.). Beispielhaft wurden die beiden Regionen Berlin und Kurpfalz ausgewählt, um Stoffstromanalysen durchzuführen und die Veränderungen im anthropogenen Lager bis 2030 zu beschreiben. Auf Ebene der einzelnen Baustoffe ist der Bestand an Gebäuden und Infrastruktur erhoben worden. Darauf aufbauend wurden die Zuflüsse (Bedarf an Baustoffen) und Abflüsse (Aufkommen von Bau- und Abbruchabfällen) in das Lager quantifiziert.

Bei Gebäuden wurden dazu statistische Daten ausgewertet, Kennzahlen gebildet, Gebäudematerialsteckbriefe sowie Prognosen zu Nachfrage und Kennzahlen neben Faktoren zur Bestandserhaltung herangezogen. Für den Tiefbau wurden Daten aus der Literatur genutzt, die regionenscharf vorlagen bzw. über Kennzahlen aus den bundesdeutschen Daten auf die Regionen umgelegt wurden. Die Verwertung des prognostizierten Bauschuttanfalls mit den daraus entstehenden RC-Baustoffen wurde anhand von acht betrachteten Baustoffen und verschiedenen Ambitionierungsgraden (konventionell bis perspektivisch) in der Aufbereitung näher beleuchtet.

Das in Gebäuden enthaltene Materiallager liegt vor allem in Wohngebäuden. In der Kurpfalz lassen sich hier 76 % der Massen finden, in Berlin 80 %. Davon sind in der Kurpfalz 45 % in Ein- und Zweifamilienhäusern verbaut, in Berlin mit 15 % deutlich weniger. Die in der Infrastruktur enthaltenen Materiallager sind deutlich unterschiedlich. So befinden sich in der Kurpfalz davon 51 % in den Verkehrswegen, in Berlin sind es nur 31 %.

In den Gebäuden sind v.a. Beton und die Mauerwerksbaustoffe Kalksandstein, Mauerwerksziegel (und mineralische Leichtbaustoffe) sowie Dachziegel und Gips verbaut. In der Kurpfalz werden im Mauerwerk in letzter Zeit mehr Ziegel eingesetzt, in Berlin mehr Kalksandstein, so dass auch in den Bestandsmengen dieser Baustoffe Unterschiede zwischen den Regionen zu erwarten sein dürften. Der Materialoutput aus dem Gebäudebereich beschränkt sich bislang auf die Maßnahmen zur Bestandserhaltung, bestehend aus Ersatzneubau und Sanierung,

In beiden Regionen findet noch ein Wachstum des Gebäudebestands statt, der sich bis 2030 aber abschwächt, so dass die Maßnahmen zur Bestandserhaltung durch Ersatzneubau und Sanierung mit ihren Materialströmen immer wichtiger werden. In noch weiterer Zukunft wird der Gebäudebestand nicht mehr weiterwachsen, sondern vielleicht sogar abnehmen. Dies wird in der Kurpfalz nach derzeitigem Trend früher der Fall sein.

Der Infrastrukturbestand in der Kurpfalz besteht gegenüber Berlin zu einem größeren Anteil aus dem Bereich Verkehr mit Asphalt und Schotter, in Berlin ist der Bereich der Ver- und Entsorgungsnetze mit den v.a. dort verbauten Sanden und Kiesen etwas stärker vertreten. In beiden Regionen überwiegen die Stoffflüsse aus den Maßnahmen zur Bestandserhaltung. Der Betonanteil ist geringer als im Gebäudebereich. In- und Output bleiben über die Zeit relativ konstant.

In Bezug auf den gesamten Materialbestand überwiegen auf Inputseite zu Beginn in beiden Regionen die mit dem Gebäudebereich verbundenen Materialströme Beton und Mauerwerk. Die Infrastruktur mit Schotter, Asphalt, Kiesen und Sanden wird aber aufgrund ihres großen Bedarfs zur Bestandserhaltung und der abnehmenden Gebäudebestandsvergrößerung wichtiger. Auf Outputseite sind die Materialströme aus der Infrastruktur am größten.

In beiden Regionen können durch ambitionierte Aufbereitung mehr RC-Baustoffe bereitgestellt werden. Die hochwertige Verwertung führt nicht zu einer bloßen Verlagerung der mineralischen Abfälle in andere Bereiche, sondern schafft zusätzliche Aufnahmekapazitäten.

Hemmnisse und Lösungen: Mineralik

Das Ziel der Kreislaufwirtschaft im Bau ist die möglichst hochwertige Rückführung von Bau- und Abbruchabfällen in den Wirtschaftskreislauf und die Substitution von primären mineralischen Rohstoffen. Die aufbereiteten Materialien müssen dazu definierte bau- und umwelttechnische Eigenschaften einhalten. Gelingen kann dies nur, wenn alle Akteure, die am Bau und der Entsorgung beteiligt sind, die Ihnen zugeschriebene Teilaufgabe so wahrnehmen, dass wertgebende Eigenschaften von Materialien erkannt, erhalten und an nachfolgende Akteure weitergegeben werden. Sie alle haben signifikanten Einfluss auf die Qualität und Zusammensetzung von Bauabfällen sowie den Einsatz und den Verbrauch von Ressourcen. Je nach Phase des Bauvorhabens bzw. der Stufe des Lebenszyklus eines Gebäudes, haben die Akteure unterschiedliche Aufgaben zu erfüllen. Die Aufgaben reichen von Beratung- und Planungsleistungen über die Ausführung von Bau- und Abbruch bis hin zur Behandlung von Abfällen und der Vermarktung als sekundärer Rohstoff.

Bauabfälle aus Gebäuden und Bauwerken werden noch kaum in den Hochbau zurückgeführt. Die Verwertung erfolgt überwiegend im Straßen- und Erdbau, obwohl relevante Anteile - bei einer störstofffreien Erfassung - für eine Kreislaufführung geeignet sind. Die bautechnischen Anforderungen im Erdbau sind gering: die im Gemisch erfassten Baustoffe können mit einfachen und kostengünstigen Verfahren aufbereitet werden - eine nachhaltige Nutzung der wertgebenden Eigenschaften findet jedoch nicht statt. Eine getrennte Erfassung erfolgt bislang nur dann, wenn die Materialien die Verwertbarkeit im Tiefbau verhindern (insbesondere Gipsbaustoffe) oder aufgrund ihrer gefährlichen Eigenschaften separat entsorgt werden müssen. Billige Ablagerungskapazitäten verhindern die Zuführung in Aufbereitungsanlagen und damit die Herstellung von hochwertigen RC-Baustoffen.

Die Praxis zeigt deshalb, dass insbesondere die getrennte Bereitstellung der abgebrochenen Baumaterialien nur unzureichend umgesetzt wird. Die Pflichten der Gewerbeabfallverordnung werden regelmäßig nicht ausreichend erfüllt. Gleichzeitig sind auch die behördliche Überwachung und der Vollzug von abfallrechtlichen Vorgaben auf der Baustelle unzureichend. Dieser Missstand ist bei Abbruchunternehmen bekannt und führt dazu, dass Abbruch- und Entsorgungsdienstleistungen vorwiegend unter dem Aspekt „Arbeitsaufwand“ kalkuliert, optimiert und angeboten werden. Eventuell entstehende höhere Entsorgungskosten für nicht sortenrein erfasste Bauabfälle werden durch den geringeren Arbeitsaufwand in der Gesamtkalkulation kompensiert. Dieses Vorgehen wird besonders in Regionen verfolgt, in denen kostengünstige Entsorgungsoptionen für Bauabfallgemische im nahen oder mittleren Umkreis zur Verfügung stehen.

Die Verknappung von Rohstoffen für die Baustoffindustrie ist zunehmend präsent. Für die Natursteinindustrie ist insbesondere die Erweiterung oder Neuerschließung von Abbaustätten ein immer schwierigerer und zeitaufwendigerer Prozess. Trotzdem bemühen sich die Baustoffproduzenten bislang nur zögerlich alternative sekundäre Rohstoffe in relevanten Größen-

ordnungen in die Produktionsprozesse zu integrieren und Zulieferstrukturen aktiv aufzubauen. Befürchtet werden Absatzprobleme, aufgrund des schlechten Images von aufbereiteten Abfällen. Das noch immer schlechte Image der Recyclingbaustoffe wird der Qualität der aufbereiteten Materialien und der Systeme zur Gütesicherung jedoch nicht gerecht.

Nicht alle Baustoffe eignen sich in gleichem Maße, um in den ursprünglichen Produktionsprozess rückgeführt werden zu können. Entscheidend sind die Produktionsverfahren, diese lassen unterschiedliche Anteile von Altmaterial zu. Unterschieden werden muss zwischen

- ▶ Baustoffen, deren Herstellungsverfahren die Rückführung eines relevanten Anteils von aufbereitetem Altmaterial zulassen und
- ▶ Baustoffen, für die alternative Verwertungsstrategien entwickelt werden müssen.

Ausgehend von sortenreinen und störstofffreien Fraktionen, wäre die Herstellung von Gipsprodukten, Flachglas und Mineralwolle beinahe vollständig aus Altmaterial möglich. Bei Beton begrenzt das Regelwerk den Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung am Zuschlag derzeit noch auf max. 45 %.

Die direkte Rückführung von gebranntem Ziegelmaterial in den Herstellungsprozess ist aufgrund des thermischen Umwandlungsprozesses nur in geringen Anteilen (5 – 20 %) möglich. Die Ziegeleien nutzen diese Option zur Rückführung von Schleifstäuben und Produktionsausschüssen. Kapazitäten für die Rückführung von Ziegelabfällen aus dem Rückbau von Bauwerken stehen nicht zur Verfügung. Alternativ eignet sich gebrannter Ton aufgrund der hohen Wasserspeicherkapazität und dem stabilen pH-Wert als Mischungskomponente für Vegetationssubstrate sowie als Schüttbaustoff für Dränschichten im Garten- und Landschaftsbau. So werden primäre Naturstoffe wie Lava, Bims und Ton eingespart. Weich gebrannte Ziegel eignen sich deutlich besser als Substratkomponente zur Einstellung der vegetationsrelevanten Eigenschaften und Kennwerte. Die hart gebrannten Ziegelanteile werden vorwiegend als Stützkorn und in Dränschichten verwendet. Als Bestandteil der Gesteinskörnung Typ 2 können Mauerziegel auch in der ressourcenschonenden Betonherstellung hochwertig verwertet werden. Das Regelwerk erlaubt einen max. Anteil von 30 % Ziegel an der rezyklierten Gesteinskörnung. Im Straßen- und Wegebau sind Ziegel in unterschiedlichen Anteilen in Füll- oder Schüttmaterialien erlaubt. Ungebundene Schichten des Straßenoberbaus können entsprechend den Technischen Lieferbedingungen für Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (TL SoB-StB) als Schottertrag- und Frostschutzschichten bis zu 30 % Ziegel enthalten.

Umfangreiche Forschungsvorhaben der Kalksandstein- und Porenbetonindustrie zeigen, dass sich selbst sortenreine Produktionsabfällen nur in geringen Anteilen in die Produktion rückführen lassen. Die Produktnormen der Baustoffe lassen sich nur durch den Einsatz von primären Rohstoffen einhalten. Die Hersteller der Mauersteine nutzen diese Option, ebenso wie die Ziegelindustrie, zur Rückführung von fehlerhaften Produktionschargen. Als Bestandteil eines Gemisches für die Produktion eines klassischen RC-Baustoffs für den Straßen-, Wege- und Erdbau eignet sich Kalksandstein aufgrund der Porosität nur bedingt. Nach TL Gestein-StB 04 ist der Anteil auf max. 5 % begrenzt, Porenbeton ist hierfür ungeeignet. Die Verwertung von Kalksandsteinabfällen ist als Bestandteil der Gesteinskörnung Typ 1 und 2 in der Betonproduktion möglich. Das Regelwerk begrenzt den maximalen Anteil dieser Mauersteine auf 30 % der rezyklierten Gesteinskörnung.

Vor diesem Hintergrund ist sowohl die Kalksandstein- als auch die Porenbetonindustrie um neue Verwertungsoptionen bemüht. Benannt werden der Einsatz in Vegetationssubstraten oder als Trägermaterial von Methanoxidationsschichten im Deponiebau. Demonstrationsprojekte mit

aufbereiteten Porenbetonabfällen zeigen, dass sich das Material in Abhängigkeit von der Korngröße als sekundärer Rohstoff für Leichtmörtel und Wandbausteine eignet

In der nachfolgenden Tabelle sind die Lösungsansätze zur Optimierung von Verwertungsprozessen für die Bau- und Abbruchabfälle zusammengefasst:

Zentrale Lösungsansätze entlang der Akteurskette zur Optimierung des Verwertungsprozesses von Bau- und Abbruchabfällen

Akteure	Lösungsansätze
Bau- und Abbruchunternehmen	
Einhaltung der Pflichten der Gewerbeabfallverordnung	<ul style="list-style-type: none"> - getrennte Erfassung der Bauabfälle in sortenreinen Fraktionen und vorrangige Zuführung zur Wiederverwendung oder einem Recyclingverfahren - Erfassung von Bauabfällen im Gemisch nur in begründeten Ausnahmefällen - Vernetzung mit Bauschuttrecyclern, um ein gemeinsames Verständnis für recyclingfähige Bauabfälle zu entwickeln
Erweiterung der Ausbildung: Kreislaufwirtschaft Bau	<ul style="list-style-type: none"> - Baustoffkunde, Baustoffrecycling und abfallrechtliche Grundlagen umfassend in die Ausbildung integrieren
Bauschuttzubereiter	
Produktion güteüberwachter RC-Baustoffe für den Tiefbau	<ul style="list-style-type: none"> - Herstellung von gütegesicherten RC-Baustoffen nach den Regelwerken des Straßen- und Erdbaus mit entsprechender Vermarktung
Produktion von RC-Baustoffen für den Hochbau	<ul style="list-style-type: none"> - Vernetzung mit Baustoffproduzenten, um ein gemeinsames Verständnis der erforderlichen Qualitäten für RC-Rohstoffe zu entwickeln
Optimierung der Aufbereitungstechnik	<ul style="list-style-type: none"> - Investition in Aufbereitungstechnik, angepasst an ambitioniertes Aufbereitungsziel
Stoffstrommanagement	<ul style="list-style-type: none"> - getrennte Annahme, Lagerung und Behandlung von Stoffströmen unterschiedlicher Qualität
Baustoffproduzenten	
Entwicklung ressourcenschonender Rezepturen	<ul style="list-style-type: none"> - Forschung und Entwicklung zum Einsatz von RC-Rohstoffen, auch in Zusammenarbeit mit Bauschuttzubereitern
Kennzeichnung ressourcenschonender Baustoffe	<ul style="list-style-type: none"> - Labeling als ressourcenschonender Baustoff, um Kunden zu informieren und einen Produktvergleich zu ermöglichen
Steigerung der Rohstoffeffizienz	<ul style="list-style-type: none"> - Optimierung der Produktionstechnik zur Vermeidung von Verschnittresten, insbesondere beim Endkunden

Architekten und Planer	
Recyclinggerechte Bauweisen fördern	<ul style="list-style-type: none"> - modulare Bauweisen und recyclinggerechte Konstruktionen konsequent umsetzen - Sensibilisierung der Auftraggeber zum Thema „Jedes Bauwerk wird einmal zum Abfall“
Fort- und Weiterbildungen: Kreislaufwirtschaft Bau	<ul style="list-style-type: none"> - Ergänzung der bereits verpflichtend zu absolvierenden Fort- und Weiterbildungen um Angebote zu ressourcenschonenden Baustoffen und Bauweisen, initiiert von Architekten- und Ingenieurkammern in Zusammenarbeit mit Baustoffproduzenten und Berufsverbänden
Erweiterung der Ausbildung: Kreislaufwirtschaft Bau	<ul style="list-style-type: none"> - Recyclinggerechte Konstruktionen, Baustoffkunde, Kreislaufwirtschaft auf dem Bau und abfallrechtliche Grundlagen in die Curricula aufnehmen
Bauherren/Auftraggeber von Bauleistungen	
Rückbau- und Entsorgungskonzept	<ul style="list-style-type: none"> - Erstellung eines Schadstoffgutachtens und eines Rückbaukonzeptes, das als Bestandteil der Ausschreibung zwingend umzusetzen ist
öffentliche Ausschreibungs- und Vergabeverfahren um Umweltaspekte ergänzen	<ul style="list-style-type: none"> - Vorgabe von Umwelanforderungen, die bei der Ausschreibung zwingend gefordert werden müssen - Gewichtung von ökologischen und ökonomischen Aspekten eines Angebots – Vergabe nicht ausschließlich über den Preis - Einsatz von Baustoffen aus ausschließlich primären Rohstoffquellen muss begründungspflichtig werden - Beauftragung erfolgt ausschließlich an nachweislich fachkundige (zertifizierte) Unternehmen - Wahrnehmung der Vorbildfunktion der öffentlichen Hand
Einhaltung der Pflichten der Gewerbeabfallverordnung	<ul style="list-style-type: none"> - Erstellung der Dokumentation zum Aufkommen und Verbleib der Bau- und Abbruchabfälle
Politik und Vollzugsbehörden	
Produktstatus für RC-Baustoffe	<ul style="list-style-type: none"> - praxisnahe Regelungen, um aufbereitete und qualitätsgesicherte RC- Rohstoffe aus dem Abfallrecht zu entlassen - Vereinheitlichung der Bewertung der Umweltverträglichkeit von klassischen und RC- Rohstoffen
Vollzug der Gewerbeabfallverordnung	<ul style="list-style-type: none"> - einheitlicher Vollzug der GewAbfV sowohl während der Bauphase vor Ort als auch bei der Prüfung der Einhaltung der Getrennthaltungs- und Dokumentationspflichten nach Abschluss des Bauvorhabens

	<ul style="list-style-type: none"> - Entwicklung von Handlungshilfen und Leitfäden zur Schulung des Vollzugspersonals - Praxisgerechte und vollzugstaugliche Definition von „technisch nicht möglich“ und „wirtschaftlich nicht zumutbar“ - Aufstockung des Verwaltungspersonals und ggf. Zusammenlegung von Zuständigkeiten im Vollzug, um Personalkapazitäten zu bündeln
Verpflichtung zum „Selektiven Rückbau“	<ul style="list-style-type: none"> - Definition des Begriffes „Selektiver Rückbau“ und verpflichtende Einführung über die Landesbauordnungen
Erweiterung der Kriterien für die Baustoffzulassung	<ul style="list-style-type: none"> - Zulassung von Baustoffen nur bei nachgewiesener Recyclingfähigkeit sowie Stärkung der Produktverantwortung des Herstellers
Vorbildfunktion wahrnehmen und Öffentlichkeitsarbeit ausbauen	<ul style="list-style-type: none"> - Förderprogramme und Leuchtturmprojekte zur Einführung von Baustoffen mit RC-Anteil sowie Öffentlichkeitsarbeit zur Steigerung der Akzeptanz - Einführung der Pflicht zur Zertifizierung von öffentlichen Gebäuden auch auf Landesebene (Vorbild BNB)

Stoffstrom Metalle

Für die intensive Untersuchung des anthropogenen Lagers der im Vorhaben adressierten Basis- und Sondermetalle Edelstahl, Messing, Zink, Zinn, Aluminium, Magnesium und Seltene Erden in Magneten (Neodym-Eisen-Bor-Magnete) war es im ersten Schritt zunächst notwendig neun Sektoren innerhalb des anthropogenen Lagers zu identifizieren und definieren, die eine große Relevanz für die untersuchten Metalle und Legierungen aufweisen. Weiterhin wurden für die Berechnung der Metallmengen im anthropogenen Lager, dessen Entwicklung bis zum Jahr 2040 und die jährliche Abgabe der Metalle (die in Gütern gespeichert sind) in die Kreislaufwirtschaft wichtige Güter als Repräsentanten der Sektoren bestimmt. Alle Daten wurden mit Hilfe von Experteninterviews zusammengestellt bzw. abgesichert. In der folgenden Übersicht sind die Kernelemente zu den Sektoren zusammengestellt. Detaillierte Informationen zu den einzelnen Sektoren und entsprechende Quantifizierungen finden sich ausführlich Im Gesamtbericht in Abschnitt 4.

Sektorübersicht der Verwertungsprognostik

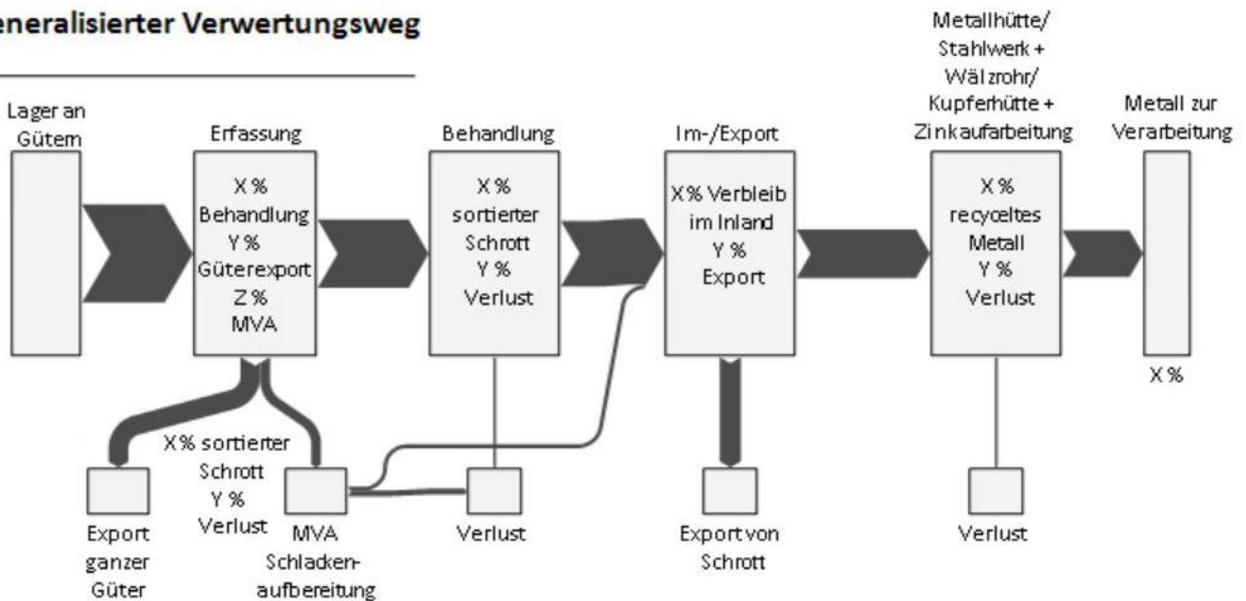
Sektor	Sektorbezeichnung	enthaltene Güter (Beispiele)	Aluminium Guss/Knet	Edelstahl	Zink	Zinn	Messing	Magnesium	Neodym- Eisen- Bor- Magnet- material
1	technische Güter im Hochbau (Wohnen und Nicht-Wohnen)	Fensterbänke, Dachrinnen, Fassaden, Lüftungsrohre, Armaturen Sanitärbereich, Fahrstühle, Handläufe etc.	✓	✓	✓		✓		
2	Mobile Güter in Gebäuden (ohne Elektrogeräte)	installierte Güter (insb. Küchen) und bewegliche Güter (Pfannen, Töpfe, Messer, Musikinstrumente, Koffer etc.)	✓	✓	✓		✓		
3	Mobile Güter in Gebäuden (Elektrogeräte)	Elektro- und Elektronikgeräte, wie Kühlschränke, Waschmaschinen, Computer etc.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	Stromerzeugungsanlagen	fossile Kraftwerke (Stein- & Braunkohle, Nuklear, Gas), Kraftwerke erneuerbarer Energien (Windkraft, Photovoltaik, Kraftwärmekopplung, Biomasse, etc.)	✓	✓	✓	✓	✓		✓
5	Stromnetze	Leitungen und Masten der Übertragungs- und Verteilnetze	✓		✓				
6	Fahrzeuge	Zwei und vierrädrige Straßenfahrzeuge (PKW, LKW, LNF, Busse, Fahrräder, Pedelecs etc.), Schiffe, Schienenfahrzeuge	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7	Verkehrsinfrastruktur	Schutzstreifen, Verkehrszeichen, Schilderbrücken, Ampeln	✓		✓				
8	Industrieanlagen	Reaktoren, Versorgungsleitungen, Rektifikationskolonnen etc.	✓	✓					
9	Maschinen	Baumaschinen, Werkzeugmaschinen, Fördermaschinen etc.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Quelle: eigene Darstellung

Die Verwertungswege für die verschiedenen Güter und der darin enthaltenen Metalle ist sehr unterschiedlich. Die einzelnen Zahlen zu den Transitionen können im Modell nachgeschlagen werden, hier wird nur qualitativ auf die betrachteten Phasen und die Wertebereiche eingegangen. In der folgenden Abbildung sind alle betrachteten Transitionen dargestellt.

Generalisierter Verwertungsweg der Güter und Metalle

Generalisierter Verwertungsweg



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e. V.

Wie dargestellt beginnt der Verwertungsweg mit dem Abfluss aus dem Güterlager. Der erste Schritt ist die Erfassung des Metallstroms bei der eine Aufteilung Richtung Behandlung, Export und MVA stattfindet. In diesem Schritt finden diffuse Verluste zwischen 5 % (Gebäude, Infrastruktur) bis 20 % (Elektrogeräte) statt. Der Export ganzer Güter ist vor allem relevant für die Güter der Sektoren 6 und 9 (Fahrzeuge und Maschinen). Er liegt zwischen 0 % (Gebäude, Infrastruktur) und 60 % (Fahrzeuge). Die Abfallverbrennung (MVA) ist relevant für Sektoren 2 und 3 (mobile Güter und Elektrogeräte). Die Effizienz der Schlackenaufbereitung liegt je nach Metall zwischen 0 % (Zinn) und 56 % (Aluminium, Edelstahl, Messing). Bei der Behandlung findet eine Auftrennung der Güter in einzelne Metalle oder Metallgemische statt. Hier sind Zerkleinerungstechnologien relevant, die vor allem für Fahrzeuge und mobile Güter große Auswirkungen haben. Es kann zu Verlusten zwischen 1 % (Zinn in WKA) und 75 % (Zinn in Fahrzeugen) kommen. Der Export aufbereiteter Schrotte schwankt stark und liegt zwischen 0 % (Messing) und 95 % (Edelstahl). Metallspezifische Prozesse bzgl. Rückgewinnung wie die Kupferhütte für Messing, bei welcher Kupfer sowie Zinkverbindungen ausgebracht werden, dem Stahlwerk und Wälzrohr für verzinkte Güter oder der Rückgewinnung von Magnesium im Rahmen des Recyclings von Aluminiumlegierung, bei der die Legierung rückgewonnen wird und nicht das Metall separat, weisen eine Effizienz zwischen 65 % (Zinn) und 95 % (übrige Metalle) auf. Aus diesen Transitionen werden die Mengen an den drei Orten des Verbleibs der Metalle (Export, Recycling in Deutschland und Verluste) berechnet. Export von Metallströmen (in welcher Form auch immer) aus dem anthropogenen Lager bedeutet letztlich in den meisten Fällen, dass das Recycling der Metalle im (europäischen) Ausland stattfindet.

Der Bestand der einzelnen Metalle hat eine unterschiedliche Größenordnung, die von den Anwendungsfeldern abhängt. Während Edelstahl im Startjahr 2015 mit gut 94 Mio. Tonnen innerhalb der untersuchten Metalle/Legierungen die Spitzenposition einnimmt, da es viele

Anwendungsfelder hat, sind die Lager von Zinn (gut 67.000 Tonnen 2015) und Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial (knapp 34.000 Tonnen 2015) die beiden kleinsten, da beide sehr spezifische Anwendungsfelder haben. Zinn z. B. wird hauptsächlich in Elektronik und als Lagermetall eingesetzt, während Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial in Permanentmagneten für Elektromotoren und Generatoren seine Hauptanwendungen hat. Die geringe Lagergröße dieser beiden Metallströme kombiniert mit einer starken Ausweitung der Anwendungsfelder (elektronische Geräte, Elektromobilität sowie Windkraftanlagen) führt zu einem starken Zuwachs des Lagers bis 2040. Bei Zinn verdoppelt sich das Lager, während Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterialien sogar einer Verdreifachung des Bestandes entgegensehen. Das Lager der übrigen Materialien hat sich weitgehend stabilisiert und wächst mit der mittleren Wachstumsrate der Wirtschaft von ca. 2 % pro Jahr bzw. rund 50 % über 25 Jahre.

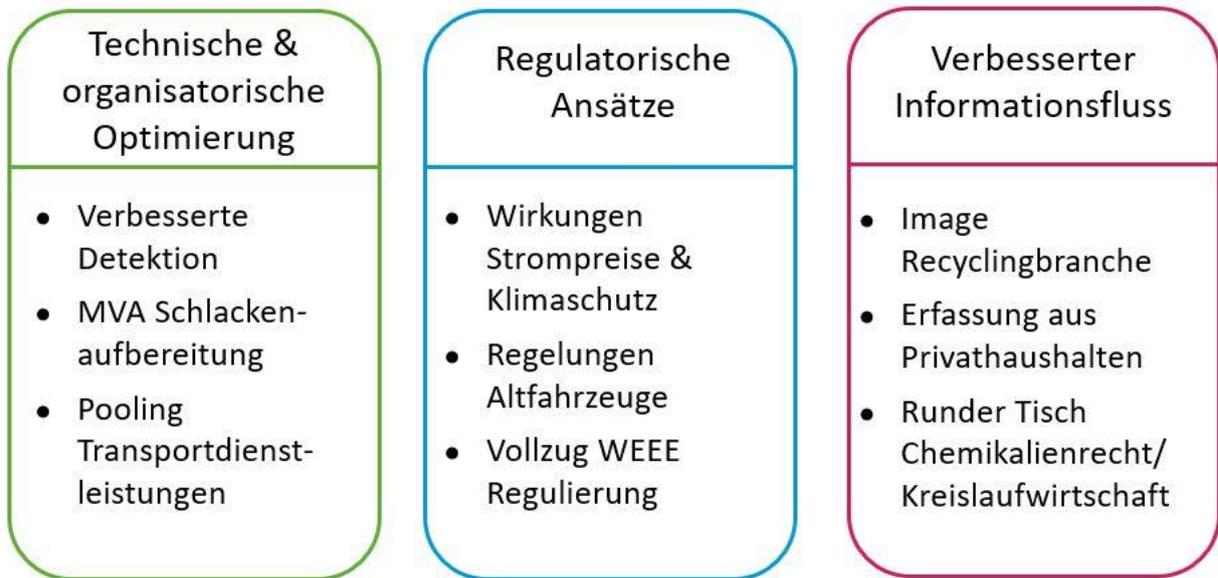
Es wächst jedoch nicht nur das anthropogene Lager aller betrachteten Metalle/Legierungen in Deutschland zwischen 2015 und 2040. Die Mengenströme des Outputs in die Kreislaufwirtschaft wachsen ebenso mit, d. h. das Potenzial des Urban Mining wird in der Zukunft noch deutlich größer werden gegenüber heute. Es wird jedoch deutlich, dass jedes Metall einen anderen Verwertungsweg aufweist und sich entsprechend unterschiedlich auf die Verbleibsorte verteilt. Aluminium wird etwas stärker exportiert als in Deutschland recycelt (was einerseits am Export des Schrottes und andererseits vor allem am Export von gebrauchten Autos und Maschinen liegt). Für Edelstahl (hier wird vor allem der Metallschrott direkt exportiert) und auch Messing (hier sind es nur die Güterexporte, die eine Rolle spielen) ist der Export der überragende Weg. Bei Zink und Magnesium zeigt sich gleichmäßig Export und Recycling in Deutschland. Zink auf Stahl und Zinn werden vor allem in Deutschland recycelt.

Allerdings muss betont werden, dass in absoluten Mengen von den untersuchten Metallen/Legierungen vor allem das Recycling von Aluminium in Deutschland heraussticht. Für Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial finden sich zur Zeit keine Verwertungswege oder eine dezidierte Rückgewinnungsstruktur. Für die Zukunft kann dieses Potenzial durchaus realisiert werden.

Hemmnisse und Lösungen: Metalle

Im Unterschied zum baumineralischen Materialsystem existieren für die meisten der untersuchten Nicht-Eisenmetalle gut entwickelte Recyclingstrukturen. Dennoch wurden durch den Austausch mit den beteiligten Praxisakteuren im Projektverlauf unterschiedliche Hemmnisse für eine weiter zu optimierende Kreislaufwirtschaft vorgebracht und diskutiert. Darauf aufbauend wurden Lösungsansätze entwickelt, die sich in die Bereiche „Technische und organisatorische Optimierung“, „Regulatorische Ansätze“ und „Verbesserter Informationsfluss“ gliedern lassen.

Überblick ausgewählter Lösungsansätze



Quelle: eigene Darstellung Öko-Institut e. V.

Die diversen Lösungsansätze adressieren unterschiedliche Akteursgruppen wie Sammler- und Zerlegebetriebe, Schrottaufbereiter, Endverwerter, Transportgewerbe, Fördergeber/Banken und nicht zuletzt die Politik sowie die Vollzugsbehörden. In Abschnitt 4 des Gesamtberichts wird im Detail auf die einzelnen Lösungsansätze eingegangen. Die nachfolgende Aufstellung bietet einen kurzen Überblick dazu.

Zusammenfassung: Zentrale Lösungsansätze entlang der Akteurskette zur Optimierung der Verwertungsprozesse von Metallen und -Legierungen

Akteure	Lösungsansätze
Sammler und Zerlegebetriebe Anreize zur Steigerung der Erfassung aus privaten Haushalten	<ul style="list-style-type: none"> - Gemeinsame Informationsoffensive des BMU und öffentlicher Entsorgungsträger in Richtung private Abfallerzeuger bzgl. richtiger Verwertungswege - Realisierung eines dichteren Netzes von E-Schrott-Containern und Sammelpunkten durch öffentliche Entsorgungsträger
Schrottaufbereiter Einsatz moderne Detektionsverfahren wie XRT, XRF, LIBS	<ul style="list-style-type: none"> - Verbesserte Auftrennung komplexer Schrotte (siehe auch Fördergeber/Banken)
Endverwerter Technische Optimierung MVA-Schlackenaufbereitung	<ul style="list-style-type: none"> - Beteiligung an der Entwicklung innovativer Verfahren zur verbesserten Metallrückgewinnung aus MVA-Schlacken und sonstigen Schlacken (siehe auch Politik und Vollzugsbehörden)
Transportgewerbe	

Technische Optimierung: Pooling Transportdienstleistungen	- Wirtschaftsverbände: Digital unterstützte Pooling-Lösungen bzgl. Transport gefährlicher Abfälle unterstützen
Fördergeber/Banken	
Einsatz moderner Detektionsverfahren wie XRT, XRF, LIBS in der Aufbereitung für bessere Schrottqualitäten	- Vergabe von Krediten zu Vorzugskonditionen sowie Zuschüsse zur Überwindung von Investitionshürden
Politik und Vollzugsbehörden	
Förderung der technischen Optimierung MVA-Schlackenaufbereitung	- BMBF: Neues spezifisches Forschungsprogramm ausloben, welches Metallgewinnung aus MVA-Schlacken adressiert.
Regulatorische Ansätze: Wirkung Strompreise und Klimaschutz	- BMU + betroffene Wirtschaft (NE-Metallindustrie und Recyclingbranche): detaillierte Untersuchung der objektiven Belastungen der Unternehmen durch das EEG. Die Ergebnisse sollen in zukünftige Fortschreibungen des EEG einfließen, um bei Bedarf Entlastungen stromintensiver Recyclingunternehmen zu erreichen.
Regulatorische Ansätze: Regelungen Altfahrzeuge	- BMU: Lösungsansätze in die anstehende Novellierung der Europäischen Altfahrzeug-Richtlinie einbringen, u. a. die Anwendung der Anlaufstellenrichtlinie Nr. 9 im Rahmen der ELV Revision verbindlich festschreiben.
Regulatorische Ansätze: Vollzug WEEE Regulierung	- BMU/UBA: Vergabe einer umfassenden Evaluationsstudie zur Untersuchung der Wirkungen der Änderungen des ElektroG im Jahr 2015 im Hinblick auf den Export in Entwicklungsländer unter Einbeziehung der jeweiligen Umweltministerien der Bundesländer, die über Hochseehäfen verfügen.
Verbesserter Informationsfluss: Image Recyclingbranche	- BMU/UBA: Broschürenserie zu ausgewählten Themen des Metallrecyclings initiieren und realisieren. - Die Themensetzung und Ausarbeitung der Broschüren sollte von einem Fachbeirat mit Vertretern der NE-Metallindustrie, Behördenvertretern und Umweltverbänden begleitet werden.
Information und Austausch: Runder Tisch / Kommunikationsplattform Chemikalienrecht - Kreislaufwirtschaft	- BMU/UBA in Kooperation mit der BAuA: Einrichtung und kontinuierlichen Moderation eines runden Tisches zur Kompromissfindung zwischen Chemikalienrecht -und Kreislaufwirtschaft

Übergreifende Schlussfolgerungen

Im Vorhaben „KartAL III - Kartierung des Anthropogenen Lagers III – Etablierung eines Stoffstrommanagements unter Integration von Verwertungsketten zur qualitativen und quantitativen Steigerung des Recyclings von Metallen und mineralischen Baustoffen“ konnte die wachsende Relevanz des anthropogenen Lagers für die Sekundärrohstoffwirtschaft in Deutschland nachgewiesen werden. Die Potenziale für die Sekundärrohstoffwirtschaft speisen sich perspektivisch aus dem wachsenden Bestand und den wachsenden Outputströmen aus dem Lager. Die Verhältnisse für die untersuchten Metalle und Legierungen im Hinblick auf die Kreislaufführung stellen sich jedoch gänzlich unterschiedlich dar im Vergleich zu der untersuchten Baumineralik. Das Recycling von Metallen bzw. Legierungen ist in vielen Fällen langjährige Praxis mit entsprechend etablierten Infrastrukturen. Allerdings bestehen auch hier durchaus noch Optimierungspotenziale und vor allem die Herausforderung die wachsenden Recyclingpotenziale verstärkt für die inländische Recyclingwirtschaft zu sichern. Im Falle der Baumineralik gibt es vielversprechende Ansätze für ein hochwertiges Recycling (z. B. RC-Beton, Gipsrecycling). Allerdings müssen für ein verstärktes Recycling in der „Fläche“ noch erhebliche Anstrengungen auf allen Akteursebenen (von Bauherren, Bauträgern bis zur Abbruchwirtschaft und den Vollzugsbehörden) unternommen werden, um die Potenziale aus dem anthropogenen Lager auch hier verstärkt zu heben und damit letztlich Primärrohstoffe in adäquatem Ausmaß einzusparen.

Summary

The project series "Mapping of the Anthropogenic Material Stock" from the German Environment Agency sets the scientific basis for a deeper understanding of the anthropogenic stock of minerals and materials in Germany. The overarching goal of the study is to recover materials bound in goods and buildings as comprehensively as possible through urban mining and to recycle them in a high-quality manner. The project "KartAL III - Mapping the Anthropogenic Material Stock III - Establishment of Material Flow Management with the Integration of Recovery Chains for the Qualitative and Quantitative Increase of the Recycling of Metals and Mineral Building Materials" intensively investigates the material flows and recovery paths of seven non-ferrous metals and alloys and nine mineral building-materials.

The aim of the project is to make a systematic and participatory contribution to further developing the circular economy into a resource-saving material flow economy. The materials in focus were examined regarding recycling to determine which material qualities must be achieved for them to substitute primary materials. In addition, further potential uses of the recycled materials were identified. The findings were discussed with all involved stakeholders to identify sensitive value creation stages in which external influences might lead to a lack of high-quality recycling of secondary raw materials. Problems were identified and approaches to solving them were developed. In addition, this process was supported by a volume-flow forecast aiming to identify relevant waste flows whose improvement could have a major impact. This forecast includes modelling of future developments for the materials under consideration, taking into account important trends such as electromobility. The return flow of materials from the anthropogenic stock back into the economic cycle and the effect of recycling on losses are illustrated. The project focused on the two material groups "mineral construction and demolition waste" and "base and special metals". Each of the main groups consists of a set of materials or raw materials specified by the Federal Environment Agency:

- ▶ Mineral construction and demolition waste: Concrete, sand-lime bricks, porous and lightweight concrete, bricks, flat glass, insulation materials, plaster building materials, plasters and mortars, tiles and ceramics.
- ▶ Base and special metals: stainless steels and their alloying elements, brass, zinc, tin, aluminium, magnesium and rare earths in magnets.

Project partners researched the two main groups in parallel, during which time the two research teams maintained a continuous exchange of expertise. Öko-Institut was responsible for working on the basic and special metals, while the ifeu Institute worked on the group of mineral construction and demolition wastes. Following the clear split of responsibilities between partners, the presentation of the project results is also divided into these two groups: a) mineral construction and demolition waste and b) base and special metals.

Stakeholder dialogues in the project

Research for the project occurred in close exchange with all relevant actors from the involved sectors: the waste management and recycling industry, experts from the scientific spectrum as well as responsible persons from state authorities of different departments. In addition to numerous individual discussions, a total of six dialogue events were held in two dialogue rounds.

The following goals were reached in the one-day and two-day dialogue events:

- ▶ Identification of barriers to exploitation

- ▶ Discussion of possible solutions
- ▶ Validation of project results
- ▶ Exchange and networking of practitioners
- ▶ Knowledge transfer

A final symposium was also held to present the project results. The agendas, findings and discussion threads of the individual events were documented and subsequently sent to the participants. The documentation can be found in the appendices of the final report.

Dialogue forums on mineral construction and demolition waste

The first dialogue round was held in November 2017. In order to sufficiently take into account the regional framework conditions of the two selected study areas (Berlin and Kurpfalz), the dialogue forums were held in Heidelberg and in Berlin. The two one-day events were designed analogously in terms of content: six main topics were discussed, one after the other, by a changing core group of at most eight participants, under the guidance of a moderator. Following the 'fishbowl principle', the listening participants were able to participate in the discussion. In addition, after each round of topics, there was time for questions and comments from the audience. The following six focal points were discussed:

- ▶ Recycling of mineral building materials from building construction
- ▶ Practical example: R concrete
- ▶ Production of Recovery Chain (RC) building materials for building construction – development of new products based on secondary raw materials
- ▶ Recycling of construction waste faces new challenges
- ▶ Optimisation of collection and logistics for construction waste
- ▶ Design of gutting and demolition

All participants were given background papers to inform them in advance of which topics would be addressed and of the procedures. With 21 and 24 participants respectively, the dialogue forums were well attended by experts. The documentation of the first dialogue forum on mineral building materials can be found in Annex B to the General Report.

The second round of dialogues, in December 2018, was also conducted in Berlin (21 participants) and Ludwigshafen (14 participants). In preparation, the participants received three background papers. In the morning, the interim results were presented, and the afternoon was reserved for a moderated discussion divided into three main topics through short impulse lectures:

- ▶ Optimisation of separation from the construction site
- ▶ Tender, award, label and acceptance
- ▶ Training for resource conservation

The documentation from the second dialogue forum on mineral building materials can be found in Annex C to the General Report.

Dialogue forums on base and special metals

The two two-day dialogue forums on base metals and special metals took place on 5 and 6 December 2017 and 4 and 5 December 2018 in the Hüttenmagazin in the Duisburg-Nord landscape park.

In preparation for the first event, background papers were sent to the participants and material flow posters were created, on the basis of which the discussion on the obstacles could be conducted in a structured manner. At the event, participants could attach a short description of an obstacle to the material flow posters at the appropriate point of the metal cycle; the results of the exercise were documented by in photographs and meeting minutes.

The aim of the first dialogue forum was to identify obstacles in recycling the metals under consideration and to collect initial proposals for solutions to reduce these obstacles. On the first day, one group focused on magnesium and aluminium and the other on brass and zinc. On the second day, the focus was on tin and stainless steel. The results on the deficits and obstacles for a better development of the anthropogenic stock of base and special metals were jointly discussed and documented. The documentation from the first dialogue forum on base and special metals can be found in Annex D. The results of the dialogue forum were processed and expanded in the course of the project.

The second dialogue forum focussed on:

- ▶ Contents of the factsheets on the metal systems investigated in the project
- ▶ Material flow modelling of the metal systems in the anthropogenic repository
- ▶ Obstacles and solutions for improved material flow management

As in the first dialogue forum, the metals were discussed over both days of the event; the discussion from the first dialogue forum was intensified and deepened. It must be taken into account that the status quo in the circular economy for most base and special metals represents is more mature compared to mineral construction and demolition waste. Regardless of this, it is still necessary to develop existing optimisation possibilities with suitable measures and instruments in the coming years. The documentation from the second dialogue forum on base and special metals can be found in Annex E.

Final symposium

The presentation of the project results took place on 2 July 2019 in Berlin. For the first time, the participants included stakeholders and interested parties from both material categories. The calculations and methodological procedure for developing the material flows of the anthropogenic stock and the optimisation approaches developed for the recycling chains of the metals and building materials examined were presented. Building on these presentations, the proposed measures and instruments were again critically discussed in several workshops.

The following main two topics were chosen for discussion in the construction mineral workshops:

- ▶ Requirements and implementation of the Commercial Waste Ordinance
- ▶ Procedures for awarding public funding to strengthen the use of RC building materials

In parallel in the workshops for base and special metals, the results of the material flow prognosis as well as the obstacles and solution approaches were deepened. The documentation from the final symposium can be found in Appendix F.

Exploitation forecasts

In addition to the steps already described for identifying relevant actors, compiling information on the material flows studied, and the discussions and dialogue events to identify obstacles and develop solutions, a further task in the project was to develop a recycling prognosis. This prognosis made it possible to identify further optimisation needs in the recycling paths and to predict future changes in the material flows and the resulting problems. Current and foreseeable trends (e.g. development of electric mobility, increased use of renewable energies) in material flows were collected and quantified in material flow models. These material flow models were built in the DyMAS system, which is explained in the following chapter. The individual assumptions of the model and further details as well as the results are presented and explained in the final report in chapters 3.4 for construction minerals and 4.2 for metals and alloys.

The DyMAS material flow model

The DyMAS (Dynamic Modelling of Anthropogenic Stocks) system is a knowledge store, which serves as a database for goods flows and stocks and their composition. The knowledge management of all data in the knowledge store is provided through a web interface. An Excel exchange format is used for importing master and transaction data, and the web interface of the knowledge store allows importing and exporting to and from the corresponding Excel documents.

The separation of master and transaction data allows the use of master data in the transaction data of all data projects and thus enables the comparability of results. At the database level, it allows data consistency to be ensured through referential integrity between master and transaction data. The master data includes materials and goods and their hierarchies, units and properties. The master data developed in the previous project KartAL II was used in this project and extended to include specific goods and materials.

The movement data consists of goods flows and stocks and their composition of materials. In contrast to master data, movement data also always have a time reference. This also applies to the definition of the quantitative composition of goods from materials, i.e. the goods-material duality is also variable in time. Properties make it possible to variably expand the master and transaction data without having to adapt the structure of the database.

The dynamic computational model allows analysis of the anthropogenic stock and sections of it in Germany based on the corresponding data in the knowledge repository. A component of almost every analysis is the consideration of the future development of the secondary raw material supply from the stock of durable, stationary and movable goods. In this way, the graphical computation model facilitates system comprehension and usability and creates transparency instead of hiding algorithms in a "black box".

The computational model was implemented with the help of a universal concept for models of energy and material flows: the material flow networks. These networks allow a consistent view of stocks and flows with a time reference and are easy to understand with just a few model elements and linkage rules, while at the same time being flexible and powerful. Material flow networks are composed of processes that describe material transformations and points that link processes and store stocks. Graphical modelling allows the linking of graphics and logic.

The graphical computational model was developed as a material flow model in the standard software Umberto. The anthropogenic stock is implemented in the computational model via the central goods stock, the analysis and synthesis processes and the lifetime-based withdrawal of goods.

The 'goods warehouse' contains information about the long-lived goods stocks and can also provide information on material stocks documented in the anthropogenic warehouse by searching by material composition. The analysis and synthesis processes use the inflows and outflows of the goods warehouse to calculate the material flows that pass through the recovery and manufacturing sub-networks.

The goods flow extraction process, which is based on goods life, checks the properties of the stocks in the goods store and generates outflows from the goods store according to the values of the stock properties. The elements of the computational model described here are driven by the data available in the knowledge store, such as the composition and properties of goods flows and stocks.

The processes in the material flow model are implemented generically and require only minimal adjustments to be able to process data from other contexts. The material flows generated by the analysis and synthesis processes pass through sub-networks for recovery and production during the calculation. The material flows are further processed based on their properties, e.g. with regard to contamination, material compound, recovery scenarios and generic recycling. The two sub-networks can be expanded, for example, to include special recovery scenarios for individual materials or material groups.

Within the framework of the KartAL III project, cross-sectoral recycling paths were implemented in the computational model. These are based on data collected by Öko-Institut and ifeu and can be configured with time-dependent parameter sets. These recycling paths were used to calculate scenario comparisons (today/future, conventional/medium/ambitious).

The data in the knowledge store is available for direct evaluation and for import into the computational model. The interface between the knowledge repository and the computational model is provided by the web interface of the DyMAS system. Several projects as part of the knowledge repository can be combined as one export for the material flow model. To focus on a partial dataset, it is possible to filter the goods and materials to be exported. In Umberto, such an export is imported into the template of the computational model and can then be calculated. Where in the computational model the data should be saved is configured using identifiers for the elements in the material flow network. Depending on data availability and the problem, material budgets can be represented and calculated in detail, but also using only little available data.

For the material flow model, which uses data from the knowledge repository, the flows and stocks of goods and materials are calculated for the required time periods based on known flows and stocks and their properties. The computational model contains all the information from the original goods of material flows and stocks. Forecast calculation is supported by the extraction of stocks at the end of their service life, which is controlled by distribution functions, as this enables an outlook based on inflows of goods for a specified reference year.

The results can be evaluated with Sankey diagrams directly in the computational model or for further analyses and reporting by exporting all raw data to Excel. For exporting to Excel, the templates in KartAL III were extended to include pivot tables and charts so that evaluations are directly available in UBA formatting. Within the framework of this project, an extension of the DyMAS system was added to support the user in carrying out scenario analyses.

Material flow minerals

The balancing the material flows of mineral building materials is divided into the areas of building construction (residential and non-residential buildings) and civil engineering (roads, tunnels, bridges, etc.). As examples, the two regions of Berlin and Kurpfalz were selected to

conduct material flow analyses and to describe the expected changes in the anthropogenic stock by 2030. At the level of the individual building materials, the stock of buildings and infrastructure was surveyed. Based on this, the inflows into (demand for building materials) and outflows from (volume of construction and demolition waste) the stock were quantified.

For buildings, statistical data was evaluated; key figures were formed; and building material profiles, on-demand forecasts and key figures were used along with factors for stock maintenance. For civil engineering, data from literature was used, which was available for each region or which was allocated to the regions via key figures from German data. Recycling of expected building rubble with the resulting recovery chain (RC) building materials was examined in more detail on the basis of eight building materials considered and different degrees of ambition (conventional to prospective) in the processing.

Residential buildings have the most material storage of all building types. In the Kurpfalz, 76 % of material storage mass can be found in residential buildings; in Berlin 80 %. Of this, 45 % in the Kurpfalz are contained in single-family detached and duplex houses, and only 15 % in Berlin. The material stores in the infrastructure from the different regions differ significantly. In the Kurpfalz, for example, 51 % of material stores are in transport routes, while in Berlin it is only 31 %.

Concrete and masonry building materials, including sand-lime bricks and masonry bricks (and mineral lightweight building materials), as well as roof tiles and gypsum are mainly used in buildings. In the Kurpfalz, bricks have recently been used more frequently in masonry; in Berlin, more sand-lime bricks. This means that differences between the regions can also be expected in the stock quantities of the building materials. The material output from the building sector has so far been limited to measures for preserving existing buildings, consisting of new replacement construction and renovation,

In both sample regions, there is still growth in the building stock, but this is expected to slow down by 2030, such that measures to maintain the stock through replacement construction and renovation with their material flows will become increasingly important. In the more distant future, building stocks are expected to no longer continue to grow and may even decline. According to current trends, this decline will reach the Kurpfalz earlier than Berlin.

Compared to Berlin, the infrastructure stock in the Kurpfalz consists to a greater extent of the transport sector with asphalt and gravel; in Berlin, the supply and disposal networks sector is somewhat more strongly represented with sands and gravels used there. In both regions, the material flows from conservation measures predominate. The share of concrete for transport infrastructure is lower than in the building sector. Input and output remain relatively constant over time.

In terms of the total material stock, the input material flows associated with the building sector, concrete and masonry predominate in both regions. However, infrastructure with crushed stone, asphalt, gravel and sand becomes more important due to its large demand for stock maintenance and the decreasing building stock increase. On the output side, the material flows from infrastructure are the largest.

In both regions, more RC building materials can be made available through ambitious processing. High-quality recycling does not lead to a mere shift of mineral waste to other areas but instead creates additional absorption capacities.

Obstacles and solutions: Mineralism

The goal of the circular economy in construction is to return construction and demolition waste to the economic cycle in the highest possible quality and to substitute primary mineral raw materials. To achieve this, the processed materials must comply with defined construction and environmental properties. This can only be achieved if all actors involved in construction and waste disposal fulfil their part in such a way that the value-giving properties of materials are recognised, preserved and passed on to subsequent actors. All actors can significantly influence the quality and composition of construction waste and the use and consumption of resources. Depending on the phase of the construction project or the stage of the life cycle of a building, the actors have different tasks to fulfil. These tasks range from consulting and planning services to the execution of construction and demolition and to the treatment of waste and its marketing as a secondary raw material.

Construction waste from buildings and structures is still hardly recycled into building construction. Recycling is mainly carried out in road construction and earthworks, although relevant proportions – if collected free of impurities – are suitable for recycling. The construction engineering requirements in earthworks are low: the building materials collected in the mixture can be processed using simple and inexpensive methods – but there is no sustainable use of the value-giving properties.

Separate collection of construction waste has so far only taken place if the type of waste materials prevents them from being recycled in civil engineering (especially gypsum building materials) or if they have to be disposed of separately due to their hazardous properties. Cheap landfill capacities prevent feeding the materials into processing plants and thus limit the production of high-quality RC building materials.

Practice therefore shows that, in particular, separating materials from demolished building is only performed insufficiently. The obligations of Germany's Commercial Waste Ordinance are regularly not sufficiently fulfilled. At the same time, official monitoring and enforcement of waste legislation at the construction site are inadequate. Demolition companies are aware of this problem and tend to calculate, optimise and offer demolition and waste disposal services primarily in terms of "labour costs". Possible higher disposal costs for construction waste that is not sorted according to type are compensated for by the lower labour costs in the overall calculation. This approach is particularly pursued in regions where low-cost disposal options for construction waste mixtures are available in the vicinity.

The building materials industry increasingly faces a shortage of raw materials. For the natural stone industry, the expansion or new development of quarrying sites in particular is an increasingly difficult and time-consuming process. Nevertheless, building material producers have been hesitant to integrate alternative secondary raw materials in relevant orders of magnitude into their production processes and to actively build up supplier structures. Sales problems are feared due to the poor image of processed waste. However, the still poor image of recycled building materials does not do justice to the quality of the processed materials and the quality assurance systems.

Not all building materials are equally suitable for being returned to the original production process. The decisive factor is the production process, which allows for different proportions of waste material. A distinction must be made between:

- ▶ Building materials whose manufacturing processes allow the recycling of a relevant proportion of processed waste material and

- Building materials for which alternative recycling strategies need to be developed.

Based on pure fractions free of impurities, gypsum products, flat glass and mineral wool could be produced almost entirely from waste material. For concrete, regulations currently limit the proportion of recycled aggregate to a maximum of 45 %.

The direct recycling of fired brick material into the production process is only possible in small proportions (5 % - 20 %) due to the thermal conversion process. Brickworks use this option to recycle grinding dusts and production rejects. Capacities for the recycling of brick waste from the deconstruction of buildings are not available. Alternatively, fired clay is suitable as a mixing component for vegetation substrates and as a bulk material for drainage layers in gardening and landscaping due to its high water storage capacity and stable pH value. This saves primary natural materials such as volcanic rock, pumice and clay. Soft-fired bricks are much more suitable as substrate components for adjusting the vegetation-relevant properties and characteristic values. Hard-fired brick components are mainly used as support grain and in drainage layers. As a component of type 2 aggregate, masonry bricks can also be used in the resource-saving production of concrete. The regulations allow a maximum share of 30 % of bricks in the recycled aggregate. In road and path construction, bricks are permitted in different proportions in fill or loose materials.

Unbound layers of the road superstructure can contain up to 30 % bricks as ballast and frost protection layers in accordance with Germany's Technical Terms of Delivery for Layers without Binders in Road Construction (TL SoB-StB).

Extensive research projects addressing sand-lime brick and aerated concrete industry show that even unmixed production waste can only be fed back into production in small proportions. The product standards for building materials in Germany can only be met by using primary raw materials. Brick and block manufacturers use this option to recycle defective production batches. As a component of a mixture for producing a classic RC building material for road, path and earth construction, sand-lime bricks are only suitable to a limited extent due to their porosity. According to German regulation TL Gestein-StB 04, the proportion of recycled content is limited to a maximum of 5 %; aerated concrete is unsuitable for this purpose. The use of lime sandstone waste is possible as a component of type 1 and 2 aggregates in concrete production. The regulations limit the maximum proportion of these bricks to 30 % of the recycled aggregate.

Against this background, both the sand-lime brick and the aerated concrete industries are striving to find new recycling options. Use in vegetation substrates or as a carrier material for methane oxidation layers in landfill construction are mentioned. Pilot projects with processed aerated concrete waste show that, depending on the grain size, the material is suitable as a secondary raw material for lightweight mortar and wall blocks.

The following table summarises the approaches to optimising recycling processes for construction and demolition waste:

Summary: Central approaches along the stakeholder chain for optimising the recycling process of construction and demolition waste

Stakeholders	Solutions
Construction and demolition companies	
Compliance with the obligations of the Commercial Waste Ordinance	- Separate collection of construction waste in unmixed fractions and prioritisation for reuse or recycling.

	<ul style="list-style-type: none"> - Collection of mixed construction waste only in justified exceptional cases. - Networking with construction waste recyclers in order to develop a common understanding of recyclable construction waste.
Extension of the training: Circular economy construction	<ul style="list-style-type: none"> - Integrating building materials science, building materials recycling and waste law basics comprehensively into training
Construction waste processor	
Production of goods-monitored RC building materials for civil engineering	<ul style="list-style-type: none"> - Production of quality-assured RC building materials in accordance with the regulations for road construction and earthworks with corresponding marketing
Production of RC building materials for building construction	<ul style="list-style-type: none"> - Networking with building material producers to develop a common understanding of the qualities required for RC raw materials
Optimisation of the processing technology	<ul style="list-style-type: none"> - Investment in processing technology, adapted to ambitious processing target
Material flow management	<ul style="list-style-type: none"> - Separate reception, storage and treatment of material flows of different qualities
Building material producers	
Development of resource-saving recipes	<ul style="list-style-type: none"> - Research and development on the use of RC raw materials, also in cooperation with construction waste processors
Labelling of resource-conserving building materials	<ul style="list-style-type: none"> - Labelling as a resource-saving building material to inform customers and enable product comparison
Increasing raw material efficiency	<ul style="list-style-type: none"> - Optimisation of production technology to avoid waste, especially for the end customer
Architects and planners	
Support recycling-friendly construction methods	<ul style="list-style-type: none"> - Consistently implementing modular construction methods and recycling-friendly designs - Raising awareness among clients on the subject of "every building becomes waste at some point"
Advanced training: Circular Economy Construction	<ul style="list-style-type: none"> - Supplementing the already compulsory further and advanced training courses with courses on resource-conserving building materials and construction methods, initiated by Chambers of architects and engineers and in cooperation with building material producers and professional associations

<p>Extension of the training: circular economy construction</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Including recyclable construction, building materials science, circular economy in construction and waste law basics in curricula
<p>Building owners/contractors of construction services</p>	
<p>Deconstruction and disposal concept</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Preparation of a pollutant report and a deconstruction concept, which must be implemented as part of the invitation to tender
<p>Add environmental aspects to public tendering and award procedures</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Specification of environmental requirements that must be mandatory in the invitation to tender - Weighting of ecological and economic aspects of a tender – award not exclusively on the basis of price - Use of building materials from exclusively primary sources of raw materials must be subject to justification - Contracts may only be awarded to demonstrably competent (certified) companies - The public sector must act as a role model
<p>Compliance with the obligations of the Commercial Waste Ordinance</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Preparation of documentation on the generation and whereabouts of construction and demolition waste
<p>Politics and enforcement authorities</p>	
<p>Product status for RC building materials</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Practical regulations to release processed and quality-assured RC raw materials from waste legislation. - Standardisation of the assessment of the environmental compatibility of classic and RC raw materials
<p>Enforcement of the Commercial Waste Ordinance</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Uniform enforcement of German regulation GewAbfV both during the construction phase on site and when checking compliance with the separation and documentation obligations after completion of the construction project - Development of aids and guidelines for training enforcement personnel - Practical and enforceable definition of "technically impossible" and "economically unreasonable" - Increasing the number of administrative staff and, if necessary, merging responsibilities in enforcement in order to bundle personnel capacities

Commitment to “selective dismantling”	<ul style="list-style-type: none"> - Definition of the term “selective deconstruction” and mandatory introduction with state building codes
Extension of the criteria for building material approval	<ul style="list-style-type: none"> - Approval of building materials only with proven recyclability and strengthening of the manufacturer's product responsibility
Act as a role model and expand public relations work	<ul style="list-style-type: none"> - Promotion programmes and lighthouse projects for the introduction of building materials with RC content as well as public relations work to increase acceptance - Introduction of compulsory certification of public buildings also at the state level (model BNB)

Metals material flow

In researching the anthropogenic stock of the base and special metals stainless steel, brass, zinc, tin, aluminium, magnesium and rare earths in magnets (neodymium-iron-boron magnets), it was first necessary to identify and define nine sectors within the anthropogenic stock that have great relevance for the identified metals and alloys. Furthermore, to calculate the metal quantities in the anthropogenic material stock, the stock’s development until the year 2040 and the annual release of metals (stored in goods) into the circular economy, important goods were determined as representatives of the sectors. All data were compiled or corroborated with the help of expert interviews. In the following overview, core elements on the sectors are compiled. Detailed information on the individual sectors and corresponding quantifications can be found in detail in the final report in section 4.

Sector overview of exploitation forecasts containing the specified metals

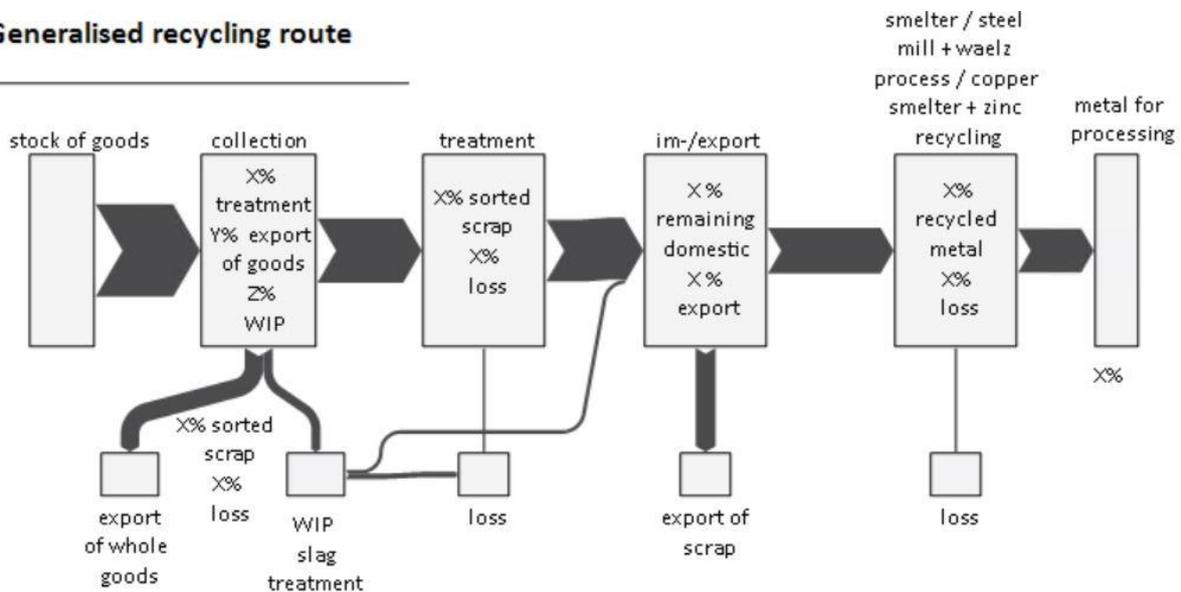
Sector	Sector description	Included goods (examples)	Aluminium Cast/Wrought	Stainless steel	Zinc	Tin	Brass	Magnesium	Neodymium-iron- boron magnet material
1	Technical goods in building construction (residential and non-residential)	Windowsills, gutters, facades, ventilation pipes, sanitary fittings, lifts, handrails, etc.	✓	✓	✓		✓		
2	Mobile goods in buildings (non-electrical appliances)	Installed goods (esp. kitchens) and movable goods (pans, pots, knives, musical instruments, suitcases etc.)	✓	✓	✓		✓		
3	Mobile goods in buildings (electrical appliances)	Electrical and electronic appliances such as refrigerators, washing machines, computers, etc.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	Power generation plants	Fossil power plants (hard coal & lignite, nuclear, gas), renewable energy power plants (wind power, photovoltaics, combined heat and power, biomass, etc.)	✓	✓	✓	✓	✓		✓
5	Power grids	Transmission and distribution lines and pylons	✓		✓				
6	Vehicles	Two- and four-wheeled road vehicles (cars, trucks, LNF, buses, bicycles, pedelecs, etc.), ships, rail vehicles	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7	Transport infrastructure	Protective lanes, traffic signs, gantries, traffic lights	✓		✓				
8	Industrial plants	Reactors, supply lines, fractionating columns, etc.	✓	✓					
9	Machinery	Construction machinery, machine tools, hoisting machines, etc.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Source: own illustration

The recycling paths for the various goods and the metals they contain vary greatly. The individual figures for the transitions can be looked up in the model; here, only qualitative details of the phases considered and the value ranges are given. The following figure shows all the transitions considered.

Generalised recycling route of the goods and metals

Generalised recycling route



Source: own illustration Öko-Institut e.V.

As shown, the recycling path begins with the outflow from the goods warehouse. The first step is to collect the metal flow, which is divided into treatment, export and waste incineration. In this step, diffuse losses of between 5 % (buildings, infrastructures) and 20 % (electrical appliances) occur. The export of whole goods is mainly relevant for goods in sectors 6 and 9 (vehicles and machinery, respectively). It ranges from 0 % (buildings, infrastructure) to 60 % (vehicles). Waste incineration (MVA) is relevant for sectors 2 and 3 (mobile goods and electrical appliances, respectively). The efficiency of slag treatment ranges from 0 % (tin) to 56 % (aluminium, stainless steel, brass) depending on the metal. During treatment, the goods are separated into individual metals or metal mixtures.

Comminution technologies are relevant, which have a major impact on vehicles and mobile goods in particular. Losses of between 1 % (tin in wind turbines) and 75 % (tin in vehicles) can occur. The export of processed scrap varies greatly and ranges from 0 % (brass) to 95 % (stainless steel). Metal-specific recovery processes – such as the copper smelter for brass, where copper and zinc compounds are recovered; the steel mill and rolling mill for galvanised goods; or the recovery of magnesium as part of the recycling of aluminium alloy, where the alloy is recovered and not the metal separately – have an efficiency between 65 % (tin) and 95 % (other metals). From these transitions, the quantities found in exports, recycling in Germany and losses are calculated. Export of metal flows (in whatever form) from the anthropogenic stock ultimately means that, in most cases, the recycling of the metals takes place outside Germany in other EU countries.

The stocks of the individual metals have different orders of magnitude, which depend on their fields of application. While stainless steel, with a around 94 million tonnes in 2015, takes the top position within the metals/alloys examined since it has many fields of application, the stocks of

tin (about 67,000 tonnes in 2015) and neodymium-iron-boron magnetic material (just under 34,000 tonnes in 2015) hold the lowest positions since both have very specific fields of application. Tin, for example, is mainly used in electronics and as a bearing metal, while neodymium-iron-boron magnetic material is primarily used in permanent magnets for electric motors and generators. The small stock size of these two metal streams combined with a strong expansion of the application fields (electronic devices, electromobility as well as wind turbines) is expected to lead to strong growth of the stock by 2040. For tin, the stock is foreseen to double, while stocks of neodymium-iron-boron magnetic materials are expected to triple. The stock of other materials is seen to have largely stabilised and is growing at the German economy's average growth rate of about 2 % per year or about 50 % over 25 years.

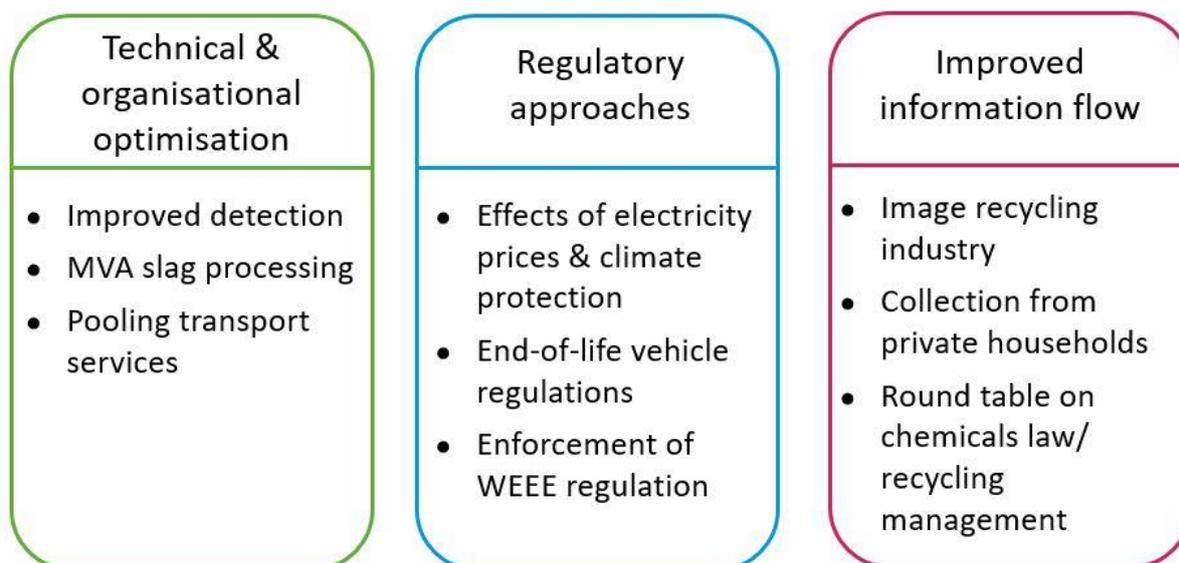
However, it is not only the anthropogenic stock of all the metals/alloys considered that are expected to grow in Germany between 2015 and 2040. The quantity flows of the output into the circular economy are also foreseen to grow; therefore, the potential of urban mining will be significantly greater in the future than it is today. However, each metal has a different recycling path and is distributed differently to the destinations. Aluminium is exported to a somewhat greater extent than is recycled in Germany (which is due on the one hand to the export of scrap and on the other hand mainly to the export of used cars and machines). For stainless steel (mainly the scrap metal is exported directly) and also brass (only the exports of goods that play a role), export is the predominant route. Zinc and magnesium are exported and recycled equally in Germany. Zinc on steel and tin are mainly recycled in Germany.

However, it must be emphasised that, in absolute quantities of the metals/alloys studied, it is above all the recycling of aluminium in Germany that stands out. For neodymium-iron-boron-magnetic material, there are currently no recycling routes or a predetermined recovery structure. This potential can certainly be realised in the future.

Obstacles and solutions: metals

In contrast to construction mineral material systems, well-developed recycling structures exist for most of the non-ferrous metals studied. Nevertheless, in the course of the project, various obstacles to further optimising the circular economy were raised and discussed in exchanges with the practical actors involved. Based on these discussions, solution approaches were developed that can be divided into the areas of "technical and organisational optimisation", "regulatory approaches" and "improved information flow".

Overview of selected solutions



Source: own illustration, Öko-Institut e. V.

The various approaches address different groups of actors such as collectors and dismantlers, scrap processors, end-users, the transport industry, funding bodies/banks and politicians and enforcement authorities. Section 4 of the final report details the individual approaches. The following list provides a brief overview.

Summary: Central approaches along the actor chain for optimising the recycling processes of non-ferrous metals and alloys

Stakeholders	Solutions
Collectors and cutting plants Incentives to increase collection from private households	<ul style="list-style-type: none"> - Joint information campaign by the BMU and public waste management authorities to inform private waste producers about correct recycling routes - Realisation of a denser network of e-scrap containers and collection points by public waste management authorities
Scrap recyclers Use of modern detection methods such as XRT, XRF, LIBS	<ul style="list-style-type: none"> - Improved separation of complex scrap (see also 'funding agencies/banks')
Final recycler Technical optimisation of MVA slag processing	<ul style="list-style-type: none"> - Participation in the development of innovative processes for improved metal recovery from waste incineration slags and other slags (see also 'policy and enforcement authorities')
Transport industry	

Technical optimisation: pooling of transport services	- Trade associations: Support digitally-supported pooling solutions for transporting hazardous waste
Funding bodies/banks	
Use of modern detection methods such as XRT, XRF, LIBS in processing for better scrap qualities	- Granting loans at preferential conditions and subsidies to overcome investment hurdles
Politics and enforcement authorities	
Promotion of technical optimisation of waste incineration slag processing	- BMBF: Launch a new specific research programme that addresses metal recovery from waste incineration slags
Regulatory approaches: Effect of electricity prices and climate protection	- BMU + affected industry (non-ferrous metal industry and recycling sector): Detailed investigation of the objective burdens on companies due to the EEG. Incorporate results into future updates of the EEG in order to achieve relief for electricity-intensive recycling companies if necessary
Regulatory approaches: End-of-life vehicle regulations	- BMU: Introduce possible solutions in the upcoming amendment of the European End-of-Life Vehicles Directive, including making the application of the German regulation Contact Point Directive No. 9 binding in the context of the ELV revision
Regulatory approaches: Enforcement of WEEE regulation	- BMU/UBA: Commission a comprehensive evaluation study to examine the effects of the amendments to the ElektroG in 2015 with regard to exports to developing countries, with the involvement of the respective environment ministries of the German states that have deep-sea ports
Improved information flow: Image of the recycling sector	- BMU/UBA: Initiate and implement a series of brochures on selected topics of metal recycling - Identifying and researching topics for brochures should be accompanied by an expert advisory board with representatives from the non-ferrous metals industry, public authority representatives and environmental associations
Information and exchange: Round table / communication platform on chemicals legislation - circular economy	- BMU/UBA in cooperation with the BAuA: Establishment and continuous moderation of a round table to find a compromise between chemicals legislation and the circular economy

Overall conclusions

In the project "KartAL III - Mapping of the Anthropogenic Material Stock III – Establishment of a Material Flow Management with Integration of Recovery Chains for the Qualitative and Quantitative Increase of the Recycling of Metals and Mineral Building Materials", the growing

relevance of the anthropogenic stock for the secondary raw materials economy in Germany was demonstrated. The potentials for the secondary raw materials economy are prospectively fed by the growing stocks and the growing output flows from the stock. However, the conditions for the non-ferrous metals and alloys examined with regard to recycling are completely different from those for the construction minerals examined. Recycling non-ferrous metals and alloys is in many cases a long-standing practice with correspondingly established infrastructures. However, there is still potential for optimisation and, above all, the challenge of securing the growing recycling potential for the domestic recycling industry. For construction minerals, there are promising approaches for high-quality recycling (e.g. RC concrete, gypsum recycling). However, considerable efforts must still be made at all stakeholder levels (from builders and developers to the demolition industry and the enforcement authorities) to increase construction recycling in order to increase the potential from the anthropogenic material stock and thus ultimately save primary raw materials sufficiently.

1 Einführung und Ziele des Vorhabens

Die Bundesregierung verfolgt das Ziel eines schonenden Umgangs mit natürlichen Ressourcen. Ein wichtiger Bestandteil dessen ist die Wieder- und Weiternutzung der Materialien im so genannten anthropogenen Lager. Dieses umfasst die Materialien in den langlebigen Güterbeständen in Gebäuden, Infrastrukturen, Konsum- und Anlagegütern. Das anthropogene Lager wächst durch Konsum- und Bauaktivitäten der Gesellschaft noch an. Gleichzeitig werden durch Abriss, Erneuerung und Abfälle beständig Materialien freigesetzt und erreichen die Systeme der Abfallbehandlung.

Insbesondere das Recycling geht in der Regel mit deutlich geringerer Ressourceninanspruchnahme einher als über Primärproduktionsprozesse verbraucht werden. Doch es stellt sich nicht nur die Frage, wie sich der Umfang des Recyclings steigern lässt, sondern ebenfalls, wie angesichts der Herausforderungen im anthropogenen Lager – mit immerfort neuen Materialien, Stoffverbänden, Rezepturen, Schad- und Störstoffen – gute und hochwertige Qualitäten zukünftig gesichert werden können. Ein Denken im Systemzusammenhang über vielfältige Akteure der Verwertungs- und Wertschöpfungsketten wird erforderlich. Um diesen herzustellen, wurde das dialogorientierte Forschungsprojekt „Kartierung des Anthropogenen Lagers III (KartAL III) – „Etablierung eines Stoffstrommanagements unter Integration von Verwertungsketten zur qualitativen und quantitativen Steigerung des Recyclings von Metallen und mineralischen Baustoffen“ im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführt.

Das Ziel des Vorhabens war es, einen systematischen und partizipativen Beitrag zur Fortentwicklung der Kreislaufwirtschaft zu einer ressourcenschonenden Stoffstromwirtschaft zu leisten. Die im Fokus stehenden Materialien wurden im Hinblick auf das Recycling dahingehend untersucht, welche Qualitäten erreicht werden müssen, um als Ersatz für Primärmaterialien dienen zu können. Zusätzlich wurden noch weitere Einsatzpotenziale von Rezyklaten identifiziert. Dies wurde mit allen beteiligten Akteuren diskutiert, um sensitive Wertschöpfungsstufen zu identifizieren, in denen äußere Einflüsse dazu führen, dass es zu keinem hochwertigen Recycling der Sekundärrohstoffe kommt. Es wurden Probleme identifiziert und Lösungsansätze dazu identifiziert. Zudem wurde dieser Prozess durch eine Mengenstromprognostik unterstützt, um relevante Abfallströme zu identifizieren, deren Verbesserung eine große Wirkung entfalten kann. Diese Prognose wurde für die betrachteten Materialien über eine Modellierung der zukünftigen Entwicklungen erhalten, welche wichtige Trends wie z. B. die Elektromobilität berücksichtigt. Der Rückfluss an Materialien aus dem anthropogenen Lager zurück in den Wirtschaftskreislauf und die Wirkung des Recyclings auf Verluste wurde hiermit dargestellt. Im Fokus des Vorhabens standen die beiden Materialgruppen „Mineralische Bau- und Abbruchabfälle“ sowie „Basis- und Sondermetalle“. Jede der Hauptgruppen setzt sich zusammen aus einem vom Umweltbundesamt vorgegeben Set an Materialien bzw. Rohstoffen.

- ▶ Mineralische Bau- und Abbruchabfälle: Beton, Kalksandstein, Poren und Leichtbeton, Ziegel, Flachglas, Dämmstoffe, Gipsbaustoffe, Putze, Mörtel, Fliesen und Keramik.
- ▶ Basis- und Sondermetalle: Edelstähle und ihre Legierungselemente, Messing, Zink, Zinn, Aluminium, Magnesium und Seltene Erden in Magneten.

Die beiden Hauptgruppen wurden in paralleler Weise von den Projektpartnern bearbeitet, wobei für einen kontinuierlichen Fachaustausch gesorgt wurde. Das Öko-Institut verantwortete die Bearbeitung der Basis- und Sondermetalle, das ifeu Institut bearbeitete die Gruppe der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle. Aufgrund der klaren Zuordnung der Zuständigkeiten nach

Partnern, findet sich auch in der Darstellung der Projektergebnisse eine Aufteilung in Mineralische Bau- und Abbruchabfälle sowie Basis- und Sondermetalle wieder.

2 Arbeitsschritte und Methodik

In diesem Kapitel werden die Arbeitsschritte, die Methodik und die Ergebnisse des Vorhabens erläutert. Wie im vorherigen Kapitel dargestellt, war das Ziel des Vorhabens „einen systematischen und partizipativen Beitrag zur Fortentwicklung der Kreislaufwirtschaft zu einer ressourcenschonenden Stoffstromwirtschaft zu leisten“. Konkret wurden die Entsorgungswege der analysierten Materialien dargestellt, die notwendigen Sekundärrohstoffqualitäten definiert sowie Einsatzpotenziale identifiziert. Zudem wurden Hemmnisse identifiziert und Lösungsansätze entwickelt, welche dem Recycling zugutekommen. Unterstützt wurde dieser Prozess durch die Entwicklung einer Mengenstromprognostik, welche in Kapitel 2.2 näher erläutert wird und deren Ergebnisse in den Kapiteln 3.4 und 4.2 dargestellt werden.

Um die genannten Ziele zu erreichen und die bereits beschriebenen Schritte umzusetzen, fanden zu Beginn des Projekts zahlreiche Gespräche mit Akteuren entlang der Wertschöpfungskette statt. In diesen wurden die Entsorgungswege analysiert, die relevanten Akteure identifiziert und Erkenntnisse aus der Praxis gesammelt. Die Erkenntnisse dieser Gespräche und weiterer Recherchen wurden in Factsheets zusammengefasst, die in Kapitel 3.1 und 4.1 vorgestellt werden. Diese Factsheets dienten als Vorbereitungspapiere für die ersten Dialogforen. Im Unterkapitel „Dialogforen“ und „Abschluss-symposium“ wird dargestellt, wie mittels zentraler Veranstaltungen mit den relevanten Stakeholdern Hemmnisse im Recycling diskutiert und Lösungsansätze entwickelt und bewertet wurden. Die Ergebnisse der Dialogforen und des Abschluss-symposiums hinsichtlich der Hemmnisse und ihrer Lösungsoptionen im Recycling sind in den Kapiteln 3.3 und 4.4 dargestellt.

2.1 Dialogforen und Abschluss-symposium

Die Bearbeitung der Projekthinhalte erfolgte im engen Austausch mit allen relevanten Akteursgruppen der Entsorgungs- und Verwertungswirtschaft sowie Verantwortlichen aus Landesbehörden unterschiedlicher Ressorts. Neben zahlreichen Einzelgesprächen wurden in 2 Dialogrunden insgesamt 6 Dialogveranstaltungen durchgeführt. Mit der Einladung zu den ein- bzw. zweitägigen Dialogveranstaltungen wurden folgende Ziele erreicht:

- ▶ Identifikation von Verwertungshemmnissen
- ▶ Diskussion von Lösungsansätzen
- ▶ Validierung von Projektergebnissen
- ▶ Austausch und Vernetzung von Praxisakteuren
- ▶ Wissensvermittlung

Zur Vorstellung der Projektergebnisse wurde zusätzlich ein Abschluss-symposium durchgeführt. Der Ablauf, die Erkenntnisse und die Diskussionsstränge der einzelnen Veranstaltungen sind dokumentiert und im Anschluss an die Teilnehmenden versandt worden. Sie findet sich zudem in Anhang F.

Dialogforen Mineralische Bau- und Abbruchabfälle

Die erste Dialogrunde wurde im November 2017 veranstaltet. Um die regionalen Rahmenbedingungen der zwei Untersuchungsgebiete ausreichend zu berücksichtigen, wurden die Dialogforen in Heidelberg und in Berlin durchgeführt. Die zwei eintägigen Veranstaltungen waren inhaltlich analog konzipiert: 6 Themenschwerpunkte wurden hintereinander durch eine wechs-

elnde Kerngruppe von max. 8 Teilnehmenden unter Leitung eines Moderators diskutiert. In Anlehnung an das Fishbowl-Prinzip war es den zuhörenden Teilnehmenden möglich, sich an dem Gespräch zu beteiligen. Zusätzlich war nach jeder Themenrunde Zeit für Fragen und Ergänzungen aus dem Auditorium vorgesehen. Die folgenden 6 Schwerpunkte wurden diskutiert:

- ▶ Kreislaufführung mineralischer Baustoffe aus dem Hochbau,
- ▶ Praxisbeispiel: R-Beton,
- ▶ Herstellung von RC-Baustoffen für den Hochbau – Entwicklung neuer Produkte auf Basis sekundärer Rohstoffe,
- ▶ Bauschuttrecycling vor neuen Herausforderungen,
- ▶ Optimierung von Sammlung und Logistik für Bauabfälle,
- ▶ Ausgestaltung von Entkernung und Abbruch.

Alle Teilnehmenden wurden im Vorfeld mit Hintergrundpapieren über die Themensetzung und den Ablauf informiert. Mit 21 bzw. 24 Teilnehmenden waren die Dialogforen mit Fachleuten gut besetzt. Die Dokumentation der ersten Dialogforen zu mineralischen Baustoffen findet sich in Anhang B.

Auch die zweite Dialogrunde im Dezember 2018 wurde analog in Berlin (21 Teilnehmende) und Ludwigshafen (14 Teilnehmende) durchgeführt. Zur Vorbereitung erhielten die Teilnehmenden 3 Thesenpapiere. Am Vormittag wurden die Zwischenergebnisse präsentiert, der Nachmittag war einem moderierten Gesprächsteil vorbehalten, der sich durch kurze Impulsvorträge in 3 Themenschwerpunkte gliederte:

- ▶ Optimierung der Getrennthaltung ab der Baustelle
- ▶ Ausschreibung, Vergabe, Label und Akzeptanz
- ▶ Ausbildung zur Ressourcenschonung

Die Dokumentation der zweiten Dialogforen zu mineralischen Baustoffen findet sich in Anhang C.

Basis- und Sondermetalle

Die beiden jeweils zweitägigen Dialogforen zu den Basis- und Sondermetallen fanden am 05./06. Dezember 2017 sowie 04./05. Dezember 2018 im Hüttenmagazin im Landschaftspark Duisburg-Nord statt.

Im Vorfeld der ersten Veranstaltung wurden Hintergrundpapiere an die Teilnehmenden versandt und es wurden Stoffstromplakate erstellt, anhand welcher die Diskussion zu den Hemmnissen strukturiert durchgeführt werden konnte. An den Stoffstromplakaten wurde das jeweilige Hemmnis mittels selbstklebender Karten an die jeweilige Stelle des Metallkreislaufs angebracht und mittels Fotos sowie Protokoll dokumentiert. Ziel des ersten Dialogforums war die Identifizierung von Hemmnissen im Recycling der betrachteten Metalle und die Sammlung von ersten Lösungsvorschlägen zum Abbau dieser Hemmnisse. Am ersten Tag lag der Fokus in der einen Gruppe auf Magnesium und Aluminium und in der anderen Gruppe auf Messing und Zink. Am zweiten Tag lag der Fokus auf Zinn und Edelstahl. Die Ergebnisse zu den Defiziten und

Hemmnisse für eine bessere Erschließung des anthropogenen Lagers bei den Basis- und Sondermetallen wurden gemeinsam diskutiert und dokumentiert. Die Dokumentation des ersten Dialogforums zu den Basis- und Sondermetallen findet sich in Anhang D.

Die Ergebnisse des Dialogforums wurden im weiteren Projektverlauf verarbeitet und ausgebaut. Auf dem zweiten Dialogforum lag der Fokus auf:

- ▶ Inhalte der Factsheets zu den im Projekt untersuchten Metallsystemen
- ▶ Stoffstrommodellierung der Metallsysteme im Anthropogenen Lager
- ▶ Hemmnisse und Lösungsansätze für ein verbessertes Stoffstrommanagement

Die Metalle wurden wie im ersten Dialogforum auf die beiden Veranstaltungstage verteilt diskutiert. Die Diskussion aus dem ersten Dialogforum wurde im zweiten Dialogforum intensiviert und vertieft. Es ist zu berücksichtigen, dass der Status-Quo bei der Kreislaufwirtschaft bei den meisten Basis- und Sondermetallen im Vergleich zu den mineralischen Bau- und Abbruchabfällen ein ausgereifteres Niveau darstellt. Ungeachtet dessen gilt es noch bestehende Optimierungsmöglichkeiten mit geeigneten Maßnahmen und Instrumenten in den nächsten Jahren zu erschließen. Die Dokumentation des zweiten Dialogforums zu den Basis- und Sondermetallen findet sich in Anhang E.

Abschluss Symposium

Die Vorstellung der Projektergebnisse erfolgte am 2. Juli 2019 in Berlin. Der Teilnehmerkreis umfasste erstmals Akteure und Interessierte der beiden Materialkategorien. Vorgestellt wurden die Berechnungen und das methodische Vorgehen zur Entwicklung der Stoffströme des anthropogenen Lagers und die erarbeiteten Optimierungsansätze der Verwertungsketten der untersuchten Metalle und Baumaterialien. Darauf aufbauend wurden in mehreren Workshops am Nachmittag die vorgeschlagenen Maßnahmen und Instrumente nochmals kritisch diskutiert.

Als Inhalte für die Workshops Baumineralik wurden folgende Themenschwerpunkte gewählt: Anforderungen und Umsetzung der Gewerbeabfallverordnung, Vorgehensweisen bei öffentlichen Vergabeverfahren zur Stärkung des Einsatzes von RC-Baustoffen. Parallel wurden in den Workshops der Basis- und Sondermetalle die Ergebnisse der Stoffstromprognostik sowie der Hemmnisse und Lösungsansätze vertieft. Die Dokumentation des Abschluss Symposiums findet sich in Anhang F.

2.2 Verwertungsprognostik

Neben den bereits dargestellten Arbeitsschritten zur Identifizierung relevanter Akteure, der Zusammenstellung von Informationen zu den untersuchten Stoffströmen sowie den Gesprächen und Dialogveranstaltungen zur Identifizierung von Hemmnissen und der Entwicklung von Lösungsansätzen, war eine weitere Aufgabe im Vorhaben eine Verwertungsprognostik zu entwickeln. Diese ermöglicht es, weitere Optimierungsbedarfe in den Verwertungswegen zu identifizieren und auch zukünftige Veränderungen in den Stoffströmen sowie daraus resultierende Probleme vorherzusagen. Hierbei werden aktuelle und vorhersehbare Trends (z. B. Entwicklung der Elektromobilität, verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien) in den Stoffströmen gesammelt und in Stoffstrommodellen quantifiziert. Diese Stoffstrommodelle werden im System DyMAS, welches im folgenden Kapitel erläutert wird, aufgebaut. Die einzelnen Annahmen der Modellierung und weitere Details sowie die Ergebnisse werden in den Kapiteln 3.4 für Baumineralik und 4.2 für Metalle und Legierungen dargestellt und erläutert.

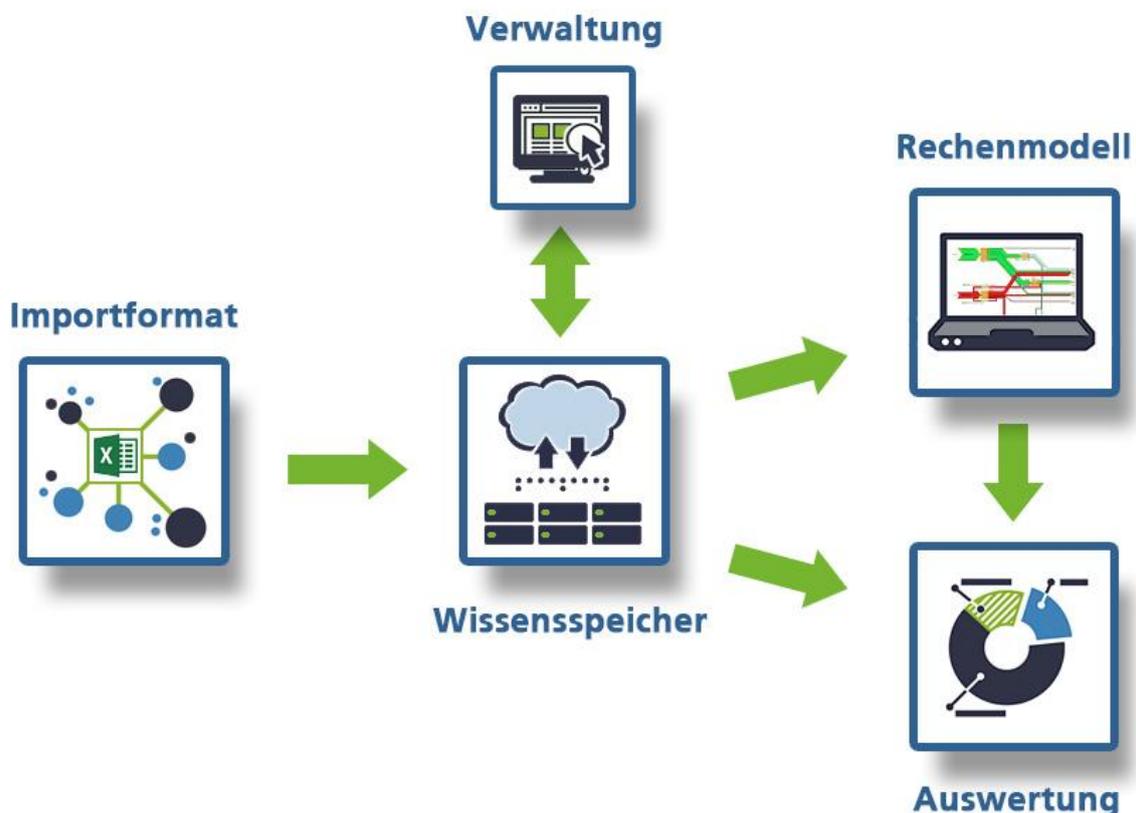
2.2.1 DyMAS

Das System DyMAS (Dynamic Modelling of Anthropogenic Stocks) umfasst im Kern einen Wissensspeicher, eine Datenbank für Güterflüsse und –bestände sowie deren Zusammensetzung (vgl. Abbildung 1). Das Wissensmanagement sämtlicher Daten im Wissensspeicher wird über eine Web-Oberfläche bereitgestellt. Für den Import von Stamm- und Bewegungsdaten wird ein Excel-Austauschformat genutzt und die Web-Oberfläche des Wissensspeichers erlaubt den Im- und Export in und aus den entsprechenden Excel-Dokumenten.

Die Trennung von Stamm- und Bewegungsdaten erlaubt die Nutzung der Stammdaten in den Bewegungsdaten aller Datenprojekte und ermöglicht so die Vergleichbarkeit von Ergebnissen. Auf der Ebene der Datenbank erlaubt sie die Sicherstellung der Datenkonsistenz durch referentielle Integrität zwischen Stamm- und Bewegungsdaten. Die Stammdaten umfassen Materialien und Güter und deren Hierarchien, Einheiten und Eigenschaften. Die im Rahmen des Vorgängerprojektes KartAL II entwickelten Stammdaten wurden in diesem Projekt genutzt und um spezielle Güter und Materialien erweitert.

Die Bewegungsdaten bestehen aus Güterflüssen und –beständen und deren Zusammensetzung aus Materialien. Im Gegensatz zu den Stammdaten haben Bewegungsdaten auch stets einen Zeitbezug. Dies gilt auch für die Definition der quantitativen Zusammensetzung der Güter aus Materialien, d. h. auch die Güter-Material-Dualität ist variabel in der Zeit. Durch Eigenschaften ist es möglich die Stamm- und Bewegungsdaten variabel zu erweitern, ohne die Struktur der Datenbank anpassen zu müssen. [Hedemann, J.; Meinshausen, I. 2017]

Abbildung 1: Übersicht der DyMAS Systemkomponenten



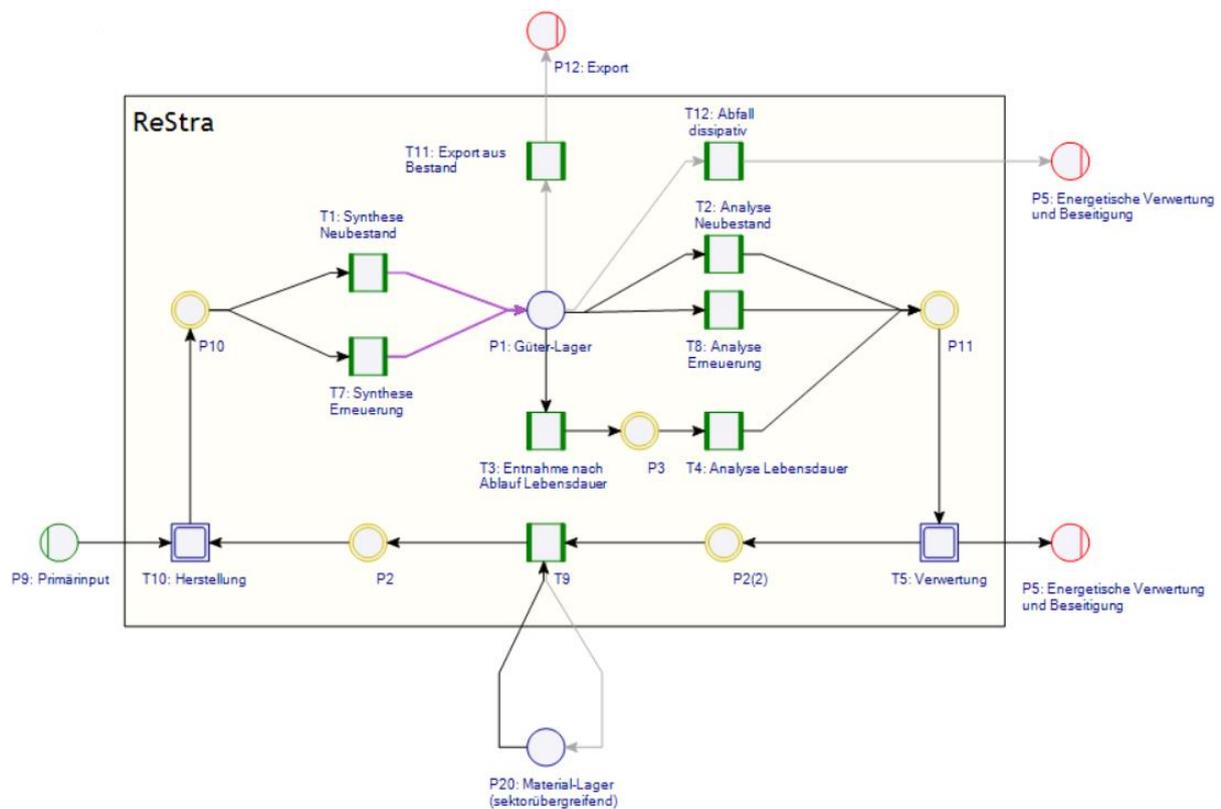
Quelle: eigene Abbildung, Ifu Hamburg GmbH

Das dynamische Rechenmodell erlaubt die Analyse des anthropogenen Lagers der Bundesrepublik und Ausschnitten davon basierend auf den entsprechenden Daten im Wissenspeicher. Bestandteil fast jeder Analyse ist die Betrachtung der künftigen Entwicklung des Sekundärrohstoffaufkommens aus dem Bestand langlebiger, ortsfester und beweglicher Güter. Hierbei erleichtert besonders das grafische Rechenmodell die Verständlichkeit und die Nutzbarkeit des Systems und schafft Transparenz anstatt Algorithmen in einer „Black Box“ zu verstecken.

Umgesetzt wurde dies mit Hilfe eines universellen Konzeptes für Modelle von Energie- und Stoffströmen, den Stoffstromnetzen. Diese erlauben eine konsistente Betrachtung von Beständen und Flüssen mit Zeitbezug und sind mit wenigen Modellelementen und Verknüpfungsregeln gut durchschaubar und gleichzeitig flexibel und mächtig. Stoffstromnetze setzen sich zusammen aus Prozessen, die Stofftransformationen beschreiben, und Stellen, die Prozesse verknüpfen und Bestände lagern. Die grafische Modellierung erlaubt die Verknüpfung von Grafik und Logik.

Das grafische Rechenmodell wurde als Stoffstrommodell in der Standard-Software Umberto realisiert (vgl. Abbildung 2). Das anthropogene Lager ist im Rechenmodell über das zentrale Güter-Lager, die Analyse- und Synthese-Prozesse und die Lebensdauer-basierte Entnahme von Gütern umgesetzt. Das Güter-Lager nimmt die langlebigen Güter-Bestände auf und kann mit Hilfe der Materialzusammensetzungen auch Information zu den Material-Beständen im anthropogenen Lager liefern. Die Analyse- und Synthese Prozesse berechnen aus den Zu- und Abflüssen des Güter-Lagers die Materialflüsse, die die Verwertungs- und Herstellungsteilnetze durchlaufen. [Hedemann, J.; Meinshausen, I. 2017]

Abbildung 2: Grafisches Rechenmodell aus KartAL II

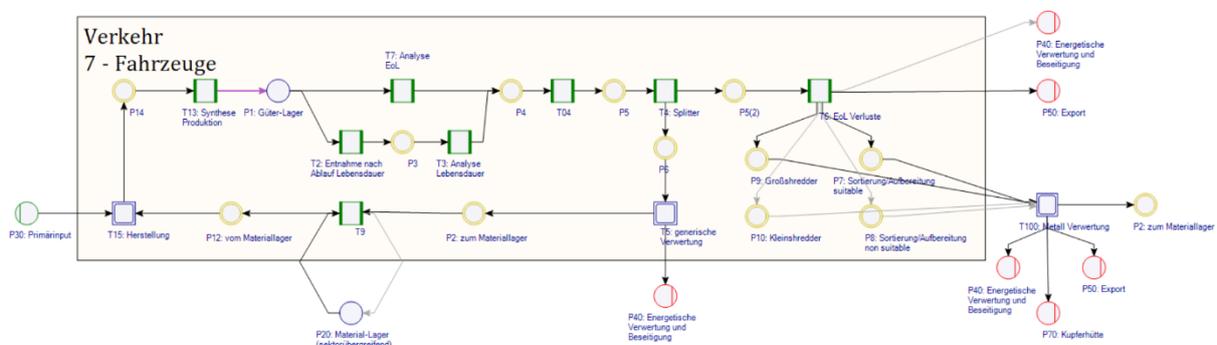


Quelle: eigene Abbildung, Ifu Hamburg GmbH

Der Prozess zur Entnahme von Güter-Flüssen anhand der Güter-Lebensdauer prüft die Eigenschaften der Bestände im Güter-Lager und erzeugt Abflüsse aus dem Güter-Lager entsprechend der Werte der Bestandseigenschaften. Die hier beschriebenen Elemente des Rechenmodells werden durch die Daten im Wissensspeicher, wie z. B. die Güterzusammensetzung und die Eigenschaften von Güter-Flüssen und -Beständen, gesteuert. Die Prozesse im Stoffstrommodell sind generisch implementiert und benötigen nur minimale Anpassungen, um Daten aus anderen Kontexten verarbeiten zu können.

Die von den Analyse- und Synthese-Prozessen erzeugten Materialflüsse durchlaufen während der Berechnung die Teilnetze zur Verwertung und Herstellung. Die Materialflüsse werden hier anhand ihrer Eigenschaften z. B. in Bezug auf Kontamination, Materialverbund, Verwertungsszenarien und generisches Recycling weiterverarbeitet. Die beiden Teilnetze sind auf Erweiterbarkeit ausgelegt und können z. B. um spezielle Verwertungsszenarien für einzelne Materialien oder Materialgruppen erweitert werden. [Hedemann, J.; Meinshausen, I. 2017]

Abbildung 3: Erweitertes grafisches Rechenmodell aus KartAL III



Quelle: eigene Abbildung, Ifu Hamburg GmbH

Im Rahmen des KartAL III Projektes wurden sektorübergreifende Verwertungswege im Rechenmodell umgesetzt (vgl. Abbildung 3). Diese basieren auf Datenerfassungen von Öko-Institut und ifeu und können über zeitabhängige Parametersätze konfiguriert werden. Mit Hilfe dieser konnten Szenariovergleiche (Heute/Zukunft, konventionell/mittel/ambitioniert) berechnet werden.

Die Daten im Wissensspeicher stehen für direkte Auswertungen und für den Import in das Rechenmodell zur Verfügung. Die Schnittstelle zwischen Wissensspeicher und Rechenmodell wird von der Web-Oberfläche des DyMAS-Systems bereitgestellt. Es können mehrere Projekte des Wissensspeichers in einem Export für das Stoffstrommodell zusammengefasst werden. Zur Fokussierung auf einen Teildatenbestand ist es möglich, die zu exportierenden Güter und Materialien zu filtern. In Umberto wird ein solcher Export in die Vorlage des Rechenmodells importiert und kann dann berechnet werden. Die Konfiguration, an welche Stelle im Rechenmodell die Daten gespeichert werden sollen, geschieht über Bezeichner der Elemente im Stoffstromnetz. Je nach Datenverfügbarkeit und Fragestellung können Stoffhaushalte sehr detailliert, aber auch nur anhand von wenigen verfügbaren Daten dargestellt und berechnet werden.

Zur Berechnung des mit Daten aus dem Wissensspeicher gefüllten Stoffstrommodells werden, ausgehend von den bekannten Flüssen und Beständen und deren Eigenschaften, die Güter- und Material-Flüsse und -Bestände für die untersuchten Zeitperioden errechnet. Flüsse und Bestände von Materialien verfügen an jeder Stelle im Rechenmodell über alle Informationen ihrer Ursprungsgüter. Unterstützt wird die Erstellung und Berechnung von Prognosen durch die,

über Verteilungsfunktionen gesteuerte, Entnahme von Beständen nach Ablauf ihrer Lebensdauer, da diese einen Ausblick in die Zukunft, basierend auf Güter-Zuflüssen für ein Bezugsjahr, ermöglicht.

Die Auswertung der Ergebnisse kann über Sankey-Diagramme direkt im Rechenmodell oder für weiterführende Analysen und Reporting im Export aller Rohdaten nach Excel geschehen. [Hedemann, J.; Meinshausen, I. 2017]

Für den Export nach Excel wurden in KartAL III die Templates um Pivot-Tabellen und -Charts erweitert, sodass direkt Auswertungen in UBA-Formatierung zur Verfügung stehen. Im Rahmen dieses Projektes wurde weiterhin eine Erweiterung des DyMAS Systems zur Unterstützung des Anwenders bei der Durchführung von Szenario-Analysen ergänzt.

3 Baumineralik

Wie steht es um die Kreislaufführung von Bau- und Dämmstoffen? Die Initiative Kreislaufwirtschaft Bau dokumentiert in seinem Monitoringbericht im Zweijahresrhythmus das Aufkommen mineralischer Bauabfallfraktionen und weist Recycling- und Verwertungsquoten aus. Grundlage bilden vom Statistischen Bundesamt erhobene Daten, die das Aufkommen und den Verbleib an Behandlungs- und Verwertungsanlagen sowie an Stoffsenken quantifizieren. Der aktuelle Monitoringbericht beziffert das Aufkommen im Jahr 2016 auf 215 Mio. Mg mit einer Verwertungsquote von insgesamt 89,8 % [Bundesverband Baustoffe -Steine und Erden e.V., 2018]. Die Quote hält das konstant hohe Niveau der vergangenen Jahre und schreibt den leichten Wachstumstrend fort. Auf den ersten Blick sind dies beeindruckende Erfolge. Bei näherer Betrachtung zeigt sich jedoch: Die Erfolge werden dominiert von der Verwertung von Böden und Steinen und deren Einsatz zur Rekultivierung von Gruben und Steinbrüchen.

Rechtlich gelten auch Entsorgungswege als Verwertung, die keine Kreislaufführung von mineralischen Bauabfällen enthalten. Abfallmassen gelangen auch zur Verwertung auf Deponien. Die Recyclingquoten liegen deutlich niedriger. Die im Forschungsprojekt betrachteten Baustoffarten werden im Monitoringbericht fast vollständig über die Kategorie Bauschutt (58,5 Mio. Mg) erfasst. Davon gelangen nur knapp 78 % – d. h. Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik sowie die mineralischen Gemische aus dem Hochbau – in Aufbereitungsanlagen, in denen sich qualifizierte Baustoffe oder Rohstoffe für die Baustoffindustrie herstellen lassen. In der Praxis meint dies insbesondere die Aufbereitung von Altbeton zu einem qualifizierten Straßenbaustoff.

Für die weiteren im Forschungsprojekt betrachteten Baustoffarten Gips, Dämmstoffe, Flachglas ebenso wie Ziegel, Fliesen und Keramik hat sich eine Kreislaufwirtschaft kaum ausbilden können. Eine Rückführung in die ursprüngliche Baustoffproduktion findet nicht statt. Bauabfälle, die durch den Rückbau von Gebäuden entstehenden, werden bislang nicht genutzt, um primäre Rohstoffe in Hochbaumaßnahmen zu substituieren. Einzelne vorbildhafte Leuchtturmprojekte sind eine Ausnahme.

Um die Hemmnisse zu verstehen, die einer geschlossenen Kreislaufführung entgegenstehen, ist eine differenzierte Betrachtung auf Ebene der einzelnen Baustoffe notwendig. Die unterschiedlichen Materialeigenschaften erfordern spezifische Aufbereitungs- und Verwertungsstrategien, um die angefallenen Abfälle hochwertig nutzbar zu machen. Kapitel 4.1 fasst die Ergebnisse der Einzeluntersuchungen zusammen und vergleicht die Voraussetzungen zur Kreislaufführung. Das Kapitel versteht sich als Auswertung und Zusammenfassung der Inhalte der Factsheets, die im Projektverlauf zu jedem Baustoff erarbeitet wurden. Diese sind als separate Veröffentlichung¹ verfügbar.

Eine umfassende Hemmnisanalyse erfordert zusätzlich die Berücksichtigung von übergreifenden – materialunabhängigen – Hemmnissen. Wichtige Einflussparameter sind u. a. bestehende rechtliche Vorgaben, Vor- und Nachteile von etablierten Erfassungsstrukturen, die Art der Ausschreibung von Abbruch- und Neubaudienstleitungen sowie die Vernetzung der Akteure der Verwertungskette. Kapitel 4.2 beschreibt die an der Entsorgung beteiligten Akteursgruppen und beleuchtet deren Schnittstellen. Die Rahmenbedingungen und Hemmnisse, die aktuell dazu führen, dass die wertgebenden Eigenschaften der Bau- und Abbruchabfälle unzureichend genutzt und sekundäre Rohstoffe nur in geringen Anteilen in Baustoffen verwendet werden, sind in Kapitel 3.3 beschrieben. Darauf aufbauend werden

¹<https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining/das-anthropogene-lager>

Lösungsstrategien benannt, die zur Optimierung des Verwertungsprozesses beitragen und die Kreislaufwirtschaft fördern. Tabelle 2 fasst die Lösungsansätze zusammen.

Für die Beispielregionen Kurpfalz und Berlin wird in Kapitel 3.4 eine Stoffstromanalyse durchgeführt. Dabei wird ausgehend vom Bestand der Baustoffe im anthropogenen Lager, der zukünftige Bedarf von Baustoffen bestimmt. Darüber hinaus werden die durch Rückbau- und Neubaumaßnahmen anfallenden Bauabfallmassen quantifiziert. Aus den Ergebnissen wird u. a. bestimmt inwieweit 2030 der Bedarf an Baustoffen durch rezyklierte Materialien gedeckt werden kann.

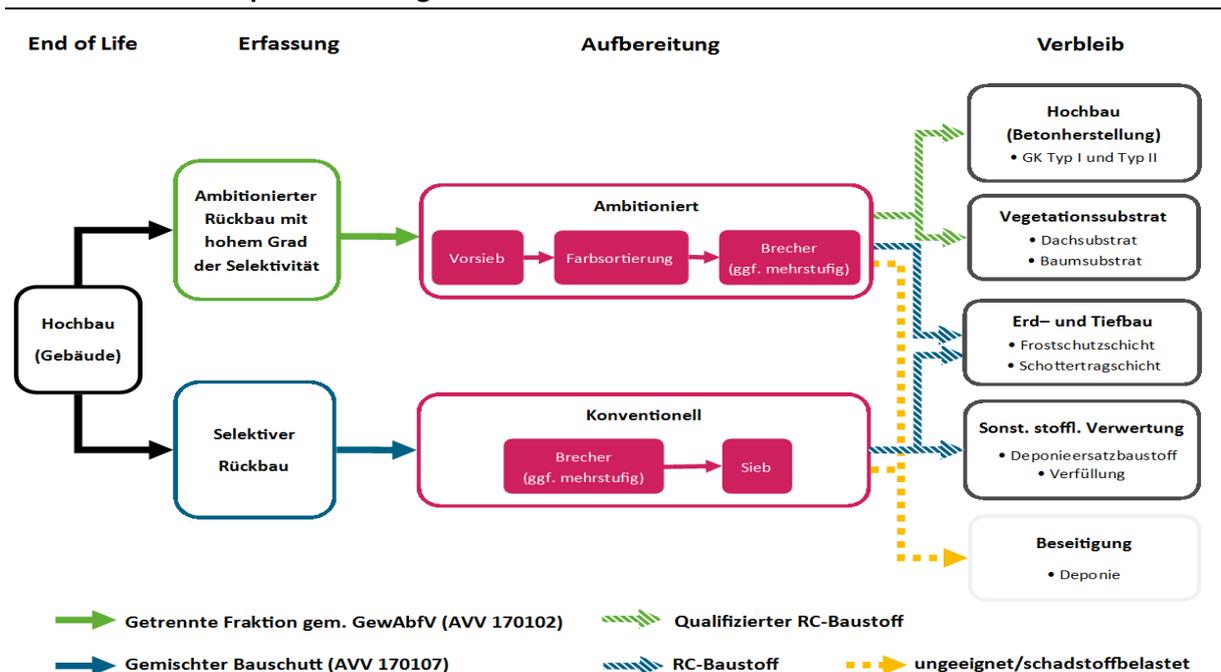
3.1 Baustoffe im Überblick – Eine Zusammenfassung der Factsheets

Die Kenntnis der Zusammensetzung, des Produktionsprozesses und der spezifischen Recyclingeigenschaften eines Baustoffes ist Voraussetzung, um Stoffströme auf Baustoffebene modellieren und Recyclingperspektiven entwickeln zu können. Daher wurden 9 baustoffspezifische Factsheets erstellt, mit folgender einheitlicher Struktur:

- ▶ allgemeine Übersicht
- ▶ Mengenströme und Anwendungen
- ▶ relevante rechtliche Regelungen
- ▶ Recyclingsituation
- ▶ Recyclingperspektiven

Die Factsheets sind mit einem Verwertungsschema illustriert, in dem die aktuelle und perspektivische Recyclingsituation des Baustoffes dargestellt ist. Abbildung 4 zeigt das für Mauerziegel entwickelte Schema.

Abbildung 4: Schematische Darstellung der derzeitigen und potentiellen Verwertungswege: Beispiel Mauerziegel



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Das Schema zeigt, wo die Abfälle in relevanten Mengen anfallen und in welcher Art – getrennt oder gemischt – die Abfälle erfasst werden, differenziert nach Abfallschlüsseln. Die Aufbereitungsstrategien werden unterschieden in *konventionell* (Stand heute) und *ambitioniert* (Perspektive). Die Qualität der Outputströme bestimmt die Eignung für unterschiedliche Verwertungspfade. Deutlich wird, dass immer für ein Recycling ungeeignete bzw. schadstoffbelastete kleine Teilfraktionen anfallen, die aus dem Kreislauf ausgeschleust und einer Beseitigung zugeführt werden müssen. In der Regel sind dies die feinen Kornklassen, in denen sich Schadstoffe anreichern und bauphysikalische Eigenschaften nicht eingehalten werden.

Die in den Schemata hinterlegten Annahmen bezüglich Erfassung, Aufbereitung und Verwertungsweg werden auch der baustoffspezifischen Stoffstromberechnung in DyMAS zugrunde gelegt. Die für die Berechnung angenommene Aufteilung auf die Verwertungspfade bei jeweils konventioneller und ambitionierter Verwertungsstrategie ist in Anhang A Abbildung 86 dargestellt.

Die Factsheets wurden Mitte 2019 veröffentlicht und sind auf der Internetseite des Umweltbundesamtes abrufbar². Eine Aktualisierung ist in unregelmäßigen Abständen vorgesehen. Die Inhalte werden nachfolgend für die Bereiche Erfassung, Verwertungsstrategien und Recyclingsituation zusammengefasst.

Erfassung von Bauabfällen

Nur wenige Baustoffe werden bislang ausreichend getrennt erfasst. Etablierte Praxis ist die getrennte Erfassung von Beton (AVV 170101), gipshaltigen Baustoffen (AVV 170802) und Mineralwollen (AVV 170603*/170604). Es liegen verschiedene Gründe dafür vor: während Altbeton zu einem definierten Baustoff im Straßenbau aufgearbeitet werden kann, sind Mineralwollen, die vor dem 01.06.2000 auf den Markt gebracht wurden, gefährlicher Abfall. Sofern nicht garantiert werden kann, dass die zurückgebaute Mineralwolle nach diesem Stichtag verbaut wurde oder ein Freizeichnungsnachweis vorgelegt werden kann, wird rückgebaute Mineralwolle als gefährlicher Abfall eingestuft und zwingend getrennt erfasst und entsorgt. Die Entsorgung ist entsprechend der Nachweisverordnung zu dokumentieren. Da derzeit kein baustellentaugliches Verfahren zur Unterscheidung von „alter“ und „neuer“ Mineralwolle existiert, wird Mineralwolle separat von anderen Bauabfällen erfasst. Eine Erfassung von Glas- und Steinwolle in separaten Abfallfraktionen erfolgt jedoch nicht – dies wäre für ein Recycling, d. h. die Rückführung in die Produktion, eine zwingende Voraussetzung.

Gipshaltige Abfälle sind von anderen Abfallfraktionen strikt getrennt zu halten, um einen Sulfateintrag in ansonsten recyclingfähige Bauabfälle zu verhindern. Die Sulfatbelastung ist der Parameter, der in der Praxis meist zum Ausschluss der Eignung als Baustoff im Erd- oder Tiefbau führt. Die Entsorgung von einer mit Gipsbaustoffen verunreinigten Abfallfraktion führt zu deutlich höheren Entsorgungskosten. Diese getrennt erfassten gipshaltigen Abfälle sind üblicherweise Gemische aus Baustoffen mit unterschiedlichen Gipsgehalten. Gemeinsam erfasst werden Gas- und Porenbetonsteine, Stuck- und Formgipse, Putzgipse, Estriche und Gips(karton)platten. Zur Aufbereitung in einer Gipsrecyclinganlage und zur Rückgewinnung von Gips geeignet sind jedoch nur die Gips(karton)platten. Der Gipsgehalt der anderen Baustoffe ist für ein Recycling nicht relevant, sie stellen einen Störstoff im Aufbereitungsprozess dar und können nur bis max. 10 % im Input einer Recyclinganlage toleriert werden.

Die Erfassung von Bauabfällen als nicht sortenreines heterogenes Gemisch ist gängige Praxis. 26 Mio. Mg Bauabfall wurden 2016 bundesweit unter der AVV 170107 als gemischter Bauschutt erfasst. Bestandteile sind insbesondere rückgebaute Wandbaustoffe wie Mauerziegel und

² <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining/das-anthropogene-lager>

Kalksandsteine ebenso wie Fliesen- und Keramikelemente. Auch Beton ist in relevanten Anteilen in diesem Gemisch enthalten. Gründe sind insbesondere die Anhaftungen von Störstoffen wie (gipshaltiger) Mörtel und Putz sowie der zeitliche und finanzielle Aufwand, der eine sortenreine Erfassung erfordern würde.

Die Erfassung von Flachglasabfällen ist abhängig von der Baumaßnahme. Bei Sanierungsmaßnahmen werden die Glasscheiben häufig zusammen mit den Fenster- und Türrahmen erfasst und von den Fensterbauunternehmen abtransportiert. Die Trennung von Glasscheibe und Fensterrahmen erfolgt nicht auf der Baustelle. Bei Abbruchmaßnahmen werden die Glaselemente in der Regel durch die Abrisstätigkeiten zerstört und als Bestandteil des gemischten Bauschuttes (AVV 170107) entsorgt.

Verwertungsstrategien im Vergleich

Nicht alle Baustoffe eignen sich in gleichem Maße, um in den ursprünglichen Produktionsprozess rückgeführt werden zu können. Entscheidend sind die Produktionsverfahren, diese lassen unterschiedliche Anteile von Altmaterial zu. Unterschieden werden muss zwischen

- ▶ Baustoffen, deren Herstellungsverfahren die Rückführung eines relevanten Anteils von aufbereitetem Altmaterial zulassen und
- ▶ Baustoffen, für die alternative Verwertungsstrategien entwickelt werden müssen.

Ausgehend von sortenreinen und störstofffreien Fraktionen, wäre die Herstellung von Gipsprodukten, Flachglas und Mineralwolle beinahe vollständig aus Altmaterial möglich. Bei Beton begrenzt das Regelwerk den Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung am Zuschlag derzeit noch auf max. 45 %.

Die direkte Rückführung von gebranntem Ziegelmaterial in den Herstellungsprozess ist aufgrund des thermischen Umwandlungsprozesses nur in geringen Anteilen (5 – 20 %) möglich. Die Ziegeleien nutzen diese Option zur Rückführung von Schleifstäuben und Produktionsausschüssen. Kapazitäten für die Rückführung von Ziegelabfällen aus dem Rückbau von Bauwerken stehen nicht zur Verfügung. Alternativ eignet sich gebrannter Ton aufgrund der hohen Wasserspeicherkapazität und dem stabilen pH-Wert als Mischungskomponente für Vegetationssubstrate sowie als Schüttbaustoff für Dränschichten im Garten- und Landschaftsbau. So werden primäre Naturstoffe wie Lava, Bims und Ton eingespart. Weich gebrannte Ziegel eignen sich deutlich besser als Substratkomponente zur Einstellung der vegetationsrelevanten Eigenschaften und Kennwerte. Die hart gebrannten Ziegelanteile werden vorwiegend als Stützkorn und in Dränschichten verwendet. Als Bestandteil der Gesteinskörnung Typ 2 können Mauerziegel auch in der ressourcenschonenden Betonherstellung hochwertig verwertet werden. Das Regelwerk erlaubt einen max. Anteil von 30 % Ziegel an der rezyklierten Gesteinskörnung. Im Straßen- und Wegebau sind Ziegel in unterschiedlichen Anteilen in Füll- oder Schüttmaterialien erlaubt. Ungebundene Schichten des Straßenoberbaus können entsprechend den Technischen Lieferbedingungen für Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (TL SoB-StB 04) als Schottertrag- und Frostschutzschichten bis zu 30 % Ziegel enthalten. [Hedemann, J.; Meinshausen, I. 2017]

Umfangreiche Forschungsvorhaben der Kalksandstein- und Porenbetonindustrie zeigen, dass sich selbst sortenreine Produktionsabfällen nur in geringen Anteilen in die Produktion rückführen lassen. Die Produktnormen der Baustoffe lassen sich nur durch den Einsatz von primären Rohstoffen einhalten. Die Hersteller der Mauersteine nutzen diese Option, ebenso wie die Ziegelindustrie, zur Rückführung von fehlerhaften Produktionschargen. Als Bestandteil eines Gemisches für die Produktion eines klassischen RC-Baustoffs für den Straßen-, Wege- und

Erdbau eignet sich Kalksandstein aufgrund der Porosität nur bedingt. Nach TL Gestein-StB 04 ist der Anteil auf max. 5 % begrenzt, Porenbeton ist hierfür ungeeignet. Die Verwertung von Kalksandsteinabfällen ist als Bestandteil der Gesteinskörnung Typ 1 und 2 in der Betonproduktion möglich. Das Regelwerk begrenzt den maximalen Anteil dieser Mauersteine auf 30 % der rezyklierten Gesteinskörnung.

Vor diesem Hintergrund ist sowohl die Kalksandstein- als auch die Porenbetonindustrie um neue Verwertungsoptionen bemüht. Benannt werden der Einsatz in Vegetationssubstraten oder als Trägermaterial von Methanoxidationsschichten im Deponiebau. Demonstrationsprojekte mit aufbereiteten Porenbetonabfällen zeigen, dass sich das Material in Abhängigkeit von der Korngröße als sekundärer Rohstoff für Leichtmörtel und Wandbausteine eignet. Für diesen Recyclingstein werden grobe Porenbetongranulate (> 8 mm) in eine künstlich geschäumte mineralische Matrix gefüllt. Durch den Erhalt des charakteristischen Porenbetongefüges in den groben Granulaten, erreicht dieser Recyclingmauerstein ähnliche Eigenschaften wie der klassische Porenbeton. Der Stein wird, analog zum R-Beton, als ressourcenschonender Porenbeton bezeichnet. Eine großtechnische Erprobung steht noch aus.

Recyclingsituation und aktueller Verbleib

Geschlossene Stoffkreisläufe sind – zumindest in Ansätzen – bislang nur bei den getrennt erfassten Altbetonen, den recyclingfähigen Gipsabfällen und Flachglasscherben zu verzeichnen.

Zwar ist der Straßen- und Tiefbau der größte Absatzmarkt für Recyclingbaustoffe aus Beton, die Nachfrage nach rezyklierten Gesteinskörnungen für Transportbetone nimmt jedoch zu. Vor allem im Raum Stuttgart haben einige Transportbetonwerke auf eine Rohstoffversorgung umgestellt, die standardmäßig rezyklierte Gesteinskörnungen beinhaltet. In einigen anderen Regionen wird dieser Impuls aufgegriffen und R-Beton auf Wunsch der Bauherren produziert. Bundesweite Pilotprojekte setzen stetig Impulse, die breite Markteinführung des ressourcenschonenden Betons und die Akzeptanz bei Bauherren und Planern zu fördern. Der Einsatz von sekundären Rohstoffen in der Betonproduktion ist durch die technischen Regelwerke gedeckt. Die nach Regelwerk zulässigen Anteile und Korngrößen könnten auf Basis aktueller Forschungserkenntnisse mittelfristig erweitert werden. Eine Anpassung der Tragwerksplanung im Vergleich zu konventionellem Beton ist und wird nicht erforderlich.

2014 öffnete die erste Gipsrecyclinganlage in Deutschland. 2019 waren bundesweit 5 Anlagen in Betrieb, die aus Gipskartonplatten Recycling-Gips herstellen. Dieser wird an Produzenten von Gipsprodukten vermarktet und substituiert Naturgips. Die Auslastung dieser spezialisierten Recyclinganlagen ist jedoch meist unzureichend. Zentrales Hemmnis ist die Verbringung von großen Massenströmen nach Tschechien zur Verwertung. Obwohl technisch fragwürdig, werden die Abfälle dort zur Sanierung von alten Schlammteichen aus der Uranproduktion genutzt. Die Entsorgungspreise liegen, trotz der weiten Transportwege, deutlich unter den Aufbereitungskosten in den Gipsrecyclinganlagen. Eine rechtliche Handhabe gegen diesen Export gibt es derzeit nicht. Erschwerend kommen niedrige Entsorgungskosten auf deutschen Deponien hinzu, die ebenfalls in Konkurrenz zu den Aufbereitungsanlagen stehen. Der überwiegende Anteil der Gipsabfälle wird auch heute noch auf Deponien entsorgt.

Flachglasscherben können theoretisch beliebig oft eingeschmolzen und zu neuen Flachglasprodukten gefertigt werden. Die Qualitätsanforderungen an das Rezyklat sind jedoch außerordentlich hoch. Entsprechend sind der Automatisierungsgrad und der Einsatz von hochspezialisierter Erkenn- und Trenntechnik in der Glasbranche bereits Stand der Technik. Da nur Flachglasscherben in den Floatwannen der Flachglasindustrie eingesetzt werden können, ist die getrennte Sammlung und Behandlung unterschiedlicher Glasarten wichtige Voraussetzung. Zu welchen Anteilen Flachglasscherben aus dem Baubereich in die Flachglasindustrie

zurückgelangen, ist unklar. Die Flachglasproduzenten stehen bei der Beschaffung von Rezyklat in Konkurrenz zu Produzenten von Hohl- und Behältergläsern. Die hohe Nachfrage wird durch das Angebot nicht gedeckt. In diversen Glasprodukten könnte der Anteil von Sekundärmaterial signifikant gesteigert werden, stünde das Material zur Verfügung. Flachglasscherben, die als Bestandteil des gemischten Bauschutts erfasst werden, sind für den Wirtschaftskreislauf verloren, obwohl es sich um einen gefragten sekundären Rohstoff handelt.

Ein umfassendes Recyclingsystem für Mineralwolle existiert nicht, obwohl diese Dämmstoffe bei Rückbaumaßnahmen von anderen Bauabfällen getrennt erfasst werden. Die Entsorgung findet fast ausschließlich auf Deponien statt. Zentrale Gründe sind: für die Rückführung in den Produktionsprozess müssen Glas- und Steinwolle getrennt vorliegen, dies ist in der Sammelpraxis nicht etabliert. Zusätzlich sind die Störstoffanteile durch Kaschierungen und anhaftende Mauer- und Mörtelreste sehr hoch. Einen ersten wichtigen Schritt geht ein großer deutscher Steinwolleproduzent: ein Rücknahmeservice für die eigenen Dämmstoffprodukte ist entwickelt worden. Verschnittreste der Neuware und rückgebaute Dämmung aus Flachdächern (Dämmplatten) können an den Hersteller zurückgegeben werden. Die Kosten trägt der Bauherr. Umgesetzt wird die Rücknahme bislang nur bei Großbauprojekten.

Für aufbereitete Dachziegel ist der Absatz in die Substratindustrie üblich. Mauerziegel aus dem Rückbau dürfen diesem Verwertungsweg aufgrund der Anhaftungen von Putz und Mörtel nicht zugeführt werden. Herkömmlich sind gebrauchte Mauerziegel Teil des gemischten Bauschutts und werden zu einfachem Erdbaustoff verarbeitet oder auf Deponien entsorgt.

Sämtliche Bestandteile des gemischten Bauschutts sind für den Einsatz im ursprünglichen Produkt verloren. Die Aufbereitung erfolgt bestenfalls zum Bestandteil einer Gesteinskörnung für den Tiefbau. Dies sind klassisch Erdbaustoffe für Dämme, Wälle, für die Anlage von befestigten Flächen oder auch zur Auffüllung von bspw. Arbeitsräumen. Noch immer werden die Gemische ohne Aufbereitung über Deponien entsorgt. Die Materialvielfalt, die anhaftenden Störstoffe (v.a. Putze) sowie der häufig erhebliche Anteil an Feinkorn machen eine Auftrennung der Materialien oder Verarbeitung zu hochwertigen Produkten – mit den aktuell standartmäßig bei den Bauschuttrecyclern zur Verfügung stehenden Aufbereitungsaggregaten – unmöglich.

3.2 Akteure der Kreislaufwirtschaft Bau – Aufgaben und Schnittstellen

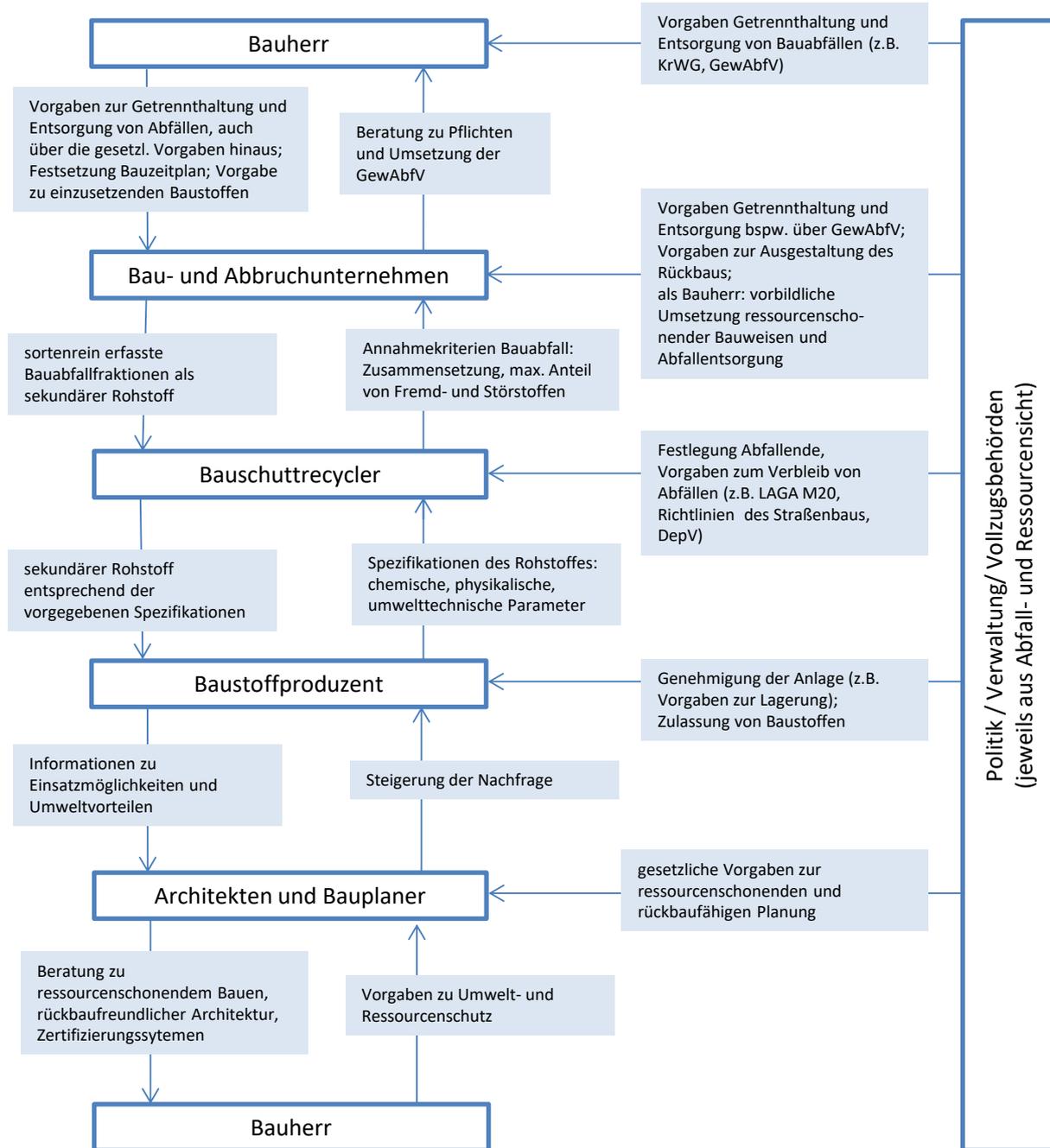
Das Ziel der Kreislaufwirtschaft im Bau ist die möglichst hochwertige Rückführung von Bau- und Abbruchabfällen in den Wirtschaftskreislauf und die Substitution von primären mineralischen Rohstoffen. Die aufbereiteten Materialien müssen dazu definierte bau- und umwelttechnische Eigenschaften einhalten. Gelingen kann dies nur, wenn alle Akteure, die am Bau und der Entsorgung beteiligt sind, die Ihnen zugeschriebene Teilaufgabe so wahrnehmen, dass wertgebende Eigenschaften von Materialien erkannt, erhalten und an nachfolgende Akteure weitergegeben werden.

Die relevanten Akteursgruppen sind in Abbildung 5 benannt. Sie alle haben signifikanten Einfluss auf die Qualität und Zusammensetzung von Bauabfällen sowie den Einsatz und den Verbrauch von Ressourcen. Je nach Phase des Bauvorhabens bzw. der Stufe des Lebenszyklus eines Gebäudes, haben die Akteure unterschiedliche Aufgaben zu erfüllen. Die Aufgaben reichen von Beratung- und Planungsleistungen über die Ausführung von Bau- und Abbruch bis hin zur Behandlung von Abfällen und der Vermarktung als sekundärer Rohstoff.

Wie das Schema verdeutlicht, ist mindestens die Vernetzung der jeweils vor- und nachgeschalteten Akteure notwendig, um Stoffströme im Kreislauf zu halten. Die im Forschungsprojekte durchgeführten Dialogforen waren besetzt mit Vertretern sämtlicher Akteursgruppen – der Austausch erfolgte daher insbesondere an den Schnittstellen der Verwertungskette.

Dieses Kapitel stellt die Akteure und die Bedeutung ihrer Aufgaben innerhalb der Verwertungskette vor. Abbildung 5 fasst außerdem stichpunktartig zusammen welche Aufgaben und welchen Einfluss die Akteure an ihren Schnittstellen der Verwertung ausüben.

Abbildung 5: Kreislaufwirtschaft Bau: relevante Akteure der Bau- und Entsorgungswirtschaft und deren Schnittstellen



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Dem Bauherrn obliegt die Gesamtverantwortlichkeit über das Bauvorhaben. Als Auftraggeber einer Baudienstleistung wird er zum Erzeuger von Abfällen. Das KrWG verpflichtet Abfallerzeuger u. a. zur Getrennthaltung von Abfällen (§ 9 KrWG) und zur ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung (§7 KrWG). Die Gewerbeabfallverordnung konkretisiert die für die Hauptabfallströme eines Bauvorhabens zulässigen Entsorgungswege sowie die sich daraus

ergebenden Dokumentationspflichten. Unabhängig davon, ob es sich bei der Baumaßnahme um einen Neubau oder um ein Sanierungs- oder Rückbauvorhaben handelt, sind Bau- und Abbruchabfälle vorrangig einer Vorbereitung zur Wiederverwendung oder einem Recycling zuzuführen.

Über die Ausschreibung und die Vertragsgestaltung hat der Bauherr Einfluss auf die Ausgestaltung des Abbruchs, die Erfassung und Entsorgung von Abfällen sowie auf die zum Einsatz kommenden Baustoffe. Insbesondere der Zeitplan eines Bauprojektes und die Investitionsbereitschaft haben Auswirkungen auf die Selektivität eines Rückbaus.

Eine öffentliche Institution, die als Bauherr agiert, nimmt automatisch eine Vorbildfunktion ein. Wird diese durch die Wahl einer vorbildlichen, innovativen und / oder ressourcenschonenden Bauweise umgesetzt, sollten diese als Best-Practice-Beispiel präsentiert werden. Die Bekanntheit und das Image von Baustoffen mit rezyklierten Anteilen und von nachhaltigen Bauweisen werden so gefördert.

Bau- und Abbruchunternehmer übernehmen, meist nach bereits abgeschlossener Planungsleistung, die auszuführenden Bauleistungen im Auftrag der Bauherren. Nach der Gewerbeabfallverordnung unterliegen sie (ebenso wie der Bauherr) der Getrennthaltungspflicht bestimmter Bau- und Abbruchabfälle, bspw. der sortenreinen Erfassung von Beton, Ziegel und gipshaltigen Abfällen. Die bauausführenden Unternehmen nehmen damit bezüglich der Qualität der Abfallströme und der späteren Verwertungsmöglichkeiten eine Schlüsselposition ein. Je homogener und selektiver die einzelnen Stoffströme den Recyclingunternehmen zur Verfügung gestellt werden, desto höher ist die Qualität der Verwertung [UBA 2014]. Die Ausgestaltung des Abbruchs ist abhängig von Qualifikation, Fachwissen und technischer Ausstattung des Abbruchunternehmers. Starken Einfluss haben gleichzeitig der Bauzeitplan sowie die Trennbarkeit der verbauten Materialien.

In Abhängigkeit der Qualität und der Nachfrage entscheiden Bauschuttrecycler über den Verbleib der Ihnen zur Entsorgung angelieferten Bauabfälle. Eine gütegesicherte Produktion von RC-Baustoffen ermöglicht bspw. die Verwertung im qualifizierten Straßenbau. Wirtschaftliche und technische Grenzen erfordern jedoch die Bereitstellung der Abfallströme in ausreichender Qualität, d. h. mit möglichst geringen Anteilen an Fremd-, Schad- und Feinanteilen. Die Aufbereitung muss dabei auf die Anforderungen des Abnehmers der sekundären Rohstoffe ausgerichtet sein. Die für den Straßenbau erforderlichen Eigenschaften sind in den Technischen Regelwerken des Straßenbaus, z. B. in den TL SoB-StB 04, definiert und vom Markt anerkannt.

Rohstoffeigenschaften, die in der Baustoffindustrie zur Herstellung von Baustoffen für den Hochbau erforderlich sind, müssen meist bilateral und anlagenspezifisch vereinbart werden, da häufig Abhängigkeiten zu den primär eingesetzten Rohstoffen und der installierten Produktionstechnik bestehen. Dies gilt nicht für die Zusammensetzung der Gesteinskörnungen für Beton, da diese über die DIN EN 12620 festgeschrieben sind.

Die beratene Funktion der Architekten und Bauingenieure entscheidet über die Nachfrage und die Imageentwicklung eines Baustoffs. Darüber hinaus übernehmen die planenden Berufsgruppen auch die Konzeption und die Aufsicht der Bauausführung. Insbesondere bei Rückbauvorhaben müssen Schadstoffbelastungen durch spezialisierte Fachberater im Vorfeld identifiziert und Anforderungen der getrennten Erfassung erarbeitet werden. Mit ausreichendem Fachwissen kann so zu einer hochwertigen Verwertung von Baustoffen oder zur Wiederverwendung ganzer Bauteile beigetragen werden.

Über die Gesetzgebung beeinflussen die Politik und die Verwaltungsbehörden das Vorgehen sämtlicher Akteursgruppen. Zentrale Elemente sind: Vorgaben zur Getrennthaltung und

Entsorgung von Bauabfällen, Einsatzmöglichkeiten von rezyklierten Gesteinskörnungen und Bodenaushub bspw. mittels Grenzwertfestlegung, Festsetzungen zum Ende einer Abfalleigenschaft, Genehmigungsverfahren zur Behandlung und Lagerung von Abfällen. Bei einem einheitlichen Vollzug werden Standards geschaffen, an die alle Akteure gebunden sind und zu fairen Wettbewerbsbedingungen führen.

Darüber hinaus agiert die öffentliche Hand auch selbst als Bauherr und kann in dieser Funktion über die Vergabe von Bau- und Planungsleistungen Einfluss auf die Art der einzusetzenden Rohstoffe sowie die Erfassung und Entsorgung der anfallenden Abfälle nehmen. Vorbildhafte ressourcenschonende Bauprojekte steigern den Bekanntheitsgrad von Baustoffen und Bauweisen und können Marktimpulse setzen.

3.3 Hemmnisse und Lösungsstrategien zur Förderung der Kreislaufwirtschaft Bau

Die Rahmenbedingungen und Hemmnisse, die aktuell dazu führen, dass die wertgebenden Eigenschaften der Bau- und Abbruchabfälle unzureichend genutzt und sekundäre Rohstoffe nur in geringen Anteilen in Baustoffen verwendet werden, sind nachfolgend beschrieben. Darauf aufbauend werden Lösungsstrategien benannt, die zur Optimierung des Verwertungsprozesses beitragen und die Kreislaufwirtschaft fördern. In Tabelle 2 sind die Lösungsansätze zusammengefasst.

3.3.1 Absatz von mineralischen Sekundärrohstoffen

In der gesellschaftlichen Diskussion ist die Verknappung von Rohstoffen für die Baustoffindustrie zunehmend präsent. Für die Natursteinindustrie ist insbesondere die Erweiterung oder Neuerschließung von Abbaustätten ein immer schwierigerer und zeitaufwendigerer Prozess. Trotzdem bemühen sich die Baustoffproduzenten bislang nur zögerlich alternative sekundäre Rohstoffe in relevanten Größenordnungen in die Produktionsprozesse zu integrieren und Zulieferstrukturen aktiv aufzubauen. Grund dafür sind insbesondere die unternehmerischen Zugehörigkeiten und Konzernstrukturen zwischen den produzierenden Betrieben und den Rohstoffversorgern sowie dessen bestehende transportoptimierte Standortwahl, so dass wirtschaftliche Anreize bislang fehlen. Das Bewusstsein der zunehmenden Verknappung steigt jedoch bei allen Akteuren und Initiativen aus der Sekundärrohstoffwirtschaft finden zunehmend Beachtung. Diese bemüht sich um neue Absatzwege und eine Erweiterung des Portfolios.

Klassisch erfolgt der Absatz von aufbereiteten mineralischen Gesteinskörnungen in den Straßen- und Wegebau in Form von Frost- und Schottertragschichten. Die im Oberbau von Straßen oder anderen Tiefbaumaßnahmen als ungebundene Schichten eingesetzten Materialien werden hierfür gemäß dem Regelwerk TL SoB-StB 04 produziert und qualitätsgesichert. Als RC-Baustoff mit definierten Eigenschaften werden diese Massen als ein Produkt aus der Kreislaufwirtschaft vermarktet. Bauschuttrecycler berichten jedoch häufig über schwierige Absatzmöglichkeiten in den ungebundenen Bereich aus mangelnder Akzeptanz und eher sinkender Nachfrage aus dem Straßen- und Wegebau. Zudem ist der Absatz von RC-Gesteinskörnungen, über den reinen Betonbruch hinaus, schwierig bis unmöglich. Obwohl die Regelwerke im Straßenbau schon seit vielen Jahren zulässige materialspezifische Anteile auch für weitere Körnungen neben dem Altbeton benennen, fehlt die Akzeptanz seitens der Bauherren oder der (Straßen)Bauunternehmen. Insbesondere rotes Ziegelmaterial, das als Bestandteil ausdrücklich über die Regelwerke gedeckt ist, wird von Verantwortlichen vor Ort häufig als Zeichen einer minderen Qualität gewertet und umgehend beanstandet. Entsprechend produzieren die Bauschuttrecycler die RC-Gesteinskörnungen fast ausschließlich aus Altbeton.

Um die wertgebenden Eigenschaften der Altmassen besser zu nutzen, Absatzwege zu diversifizieren und Märkte zu erschließen, die den Bauschuttrecyclern ein höheres Preisniveau bieten, müssen Bauabfälle aus dem Hochbau auch diesem Bausektor wieder zur Verfügung gestellt werden. Dies erfolgt aktuell nur für die Baustoffe Beton und Gips – aber auch hier nur in ersten Ansätzen und regional auf einzelne Anlagen beschränkt. Für alle anderen Mauerwerksbaustoffe geht die Rückführung in die Produktion noch nicht über Forschungs- oder Pilotvorhaben hinaus. Großtechnische und marktreife Aufbereitungstechniken sowie eine angepasste Abnehmerstruktur haben sich noch nicht etabliert, obwohl die Produktionsprozesse für die Baustoffe Beton, Gips, und Mineralwolle geeignete Voraussetzungen bieten. Denn der Einsatz von Altmaterial im ursprünglichen Produktionsprozess ist in relevanten Anteilen möglich, ohne dass Produkteigenschaften entscheidend verändert werden oder umfangreiche Anpassungen der Technik erforderlich sind. Bei der Herstellung von Ziegeln, Kalksandsteinen und Porenbeton hingegen können aus technischen Gründen nur geringe Anteile (< 15 %) in den Produktionsprozess rückgeführt werden. Dies wird in der Regel über Produktionsausschüsse, Bruch- und Verschnittreste gedeckt. Entsprechend ist für diese Baustoffe die Erschließung alternativer Verwertungswege notwendig. Für Altziegel beispielsweise als Pflanz- und Kultursubstrat. Sortenrein erfasstes Ziegelmaterial eignet sich aufgrund der hohen Wasserspeicherkapazität und dem stabilen pH-Wert als Mischungskomponente für Vegetationssubstrate sowie als Schüttbaustoff für Dränschichten im Garten- und Landschaftsbau [Hedemann, J.; Meinshausen, I. 2017]. Weitere Informationen zu Aufbereitungs- und Verwertungswegen und dem Stand der aktuellen Forschung zu den einzelnen Baustoffen entnehmen Sie bitte den vorab veröffentlichten Factsheets³.

Die obigen Schilderungen und Überlegungen gelten nicht für die Flachglasindustrie. Im Gegensatz zu anderen Recyclingzweigen, sind der Automatisierungsgrad und der Einsatz von hochspezialisierter Erkenn- und Trenntechnik in der Glasbranche bereits Stand der Technik. Die technischen Prozesse lassen hohe Recyclingraten von bis zu 75 % zu und die produzierenden Unternehmen sind stetig bemüht diesen Anteil mit Altscherben zu decken. Das Angebot an qualitativ hochwertigen Scherben, die für die Produktion von Flachgläsern zwingend nötig ist, deckt die Nachfrage jedoch nicht. Nach Herstellerangaben können aktuell durchschnittlich 20 - 40 % des Bedarfs mit Scherbengranulat gedeckt werden. Die Konkurrenz zur Behälterglasindustrie ist groß. Es fehlen Sammelstrukturen für Gläser aus dem Baubereich. Das Potenzial an Fenster-, Tür- und Fassadenglas des Gebäudebestandes geht fast vollständig verloren.

Die Entwicklung von neuen Produktlinien, die unter Einsatz von sekundären Rohstoffen und angepasster Rezeptur als eigener Baustoff vermarktet werden, wird in der Industrie grundsätzlich nicht angestrebt. Der finanzielle, zeitliche und bürokratische Aufwand für die Zulassung des Baustoffes sowie die zusätzlichen Anstrengungen zum Aufbau des Vertriebs werden gescheut. Etwaige Forschungsansätze in diese Richtung sind bislang nicht zielstrebig verfolgt worden. So befasste sich beispielsweise 2009 ein Forschungsprojekt mit der Frage, inwieweit die Produktionstechnologie der Kalksandsteinherstellung zur Produktion von Mauersteinen genutzt werden kann, die auf aufbereiteten Bauschutt als Rohstoff zurückgreifen. Hier zeigte sich, dass der Einsatz von sekundären Rohstoffen für einen Recycling-Mauerstein technisch umsetzbar ist, wobei u. a. längere Betriebszeiten des Autoklaven oder ein höherer Kalkgehalt notwendig werden, ohne dass zu Kalksandsteinen vergleichbare Produkteigenschaften erreicht worden wären. Bisher wurden jedoch keine Initiativen ergriffen, diese Ideen in die Praxis zu überführen.

³ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining/stoffstrommanagement-im-bauwesen#textpart-5>

Ende der Abfalleigenschaft

Unterliegen sekundäre Rohstoffe dem Abfallrecht und sind nicht als Produkt eingestuft, ist ihre Verwendung für die Baustoffindustrie mit einem deutlich erhöhten Genehmigungs- und Verwaltungsaufwand verbunden. Die Genehmigungen und die technische Ausstattung der Produktionsanlagen müssen hinsichtlich Annahme, Lagerung und Behandlung von Abfällen erweitert werden. Diese langwierigen und kostspieligen Umstrukturierungen werden in der Regel nicht verfolgt. Zudem wird seitens der Baustoffproduzenten befürchtet, dass mit der Verwendung von Abfall als Rohstoff das Image der einzelnen Baustoffe und damit deren Vermarktbarkeit gefährdet werden könnte.

§ 5 KrWG gibt vor, welche Kriterien erfüllt sein müssen, um für Stoffe oder Gegenstände das Ende der Abfalleigenschaft zu erreichen. Dies ist erfüllt, wenn der Stoff oder Gegenstand ein Verwertungsverfahren durchlaufen hat und

- a. üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird,
- b. ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht,
- c. er alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt,
- d. seine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt führt.

Werden die Spezifikationen der Baustoffindustrie erreicht und Produktion und Produkt einer Qualitätssicherung unterworfen, liegt es nahe, die oben genannten Kriterien als erfüllt zu betrachten. In der Praxis gibt es jedoch nur wenige Beispiele, dass Altmassen nach der Aufbereitung und zur Rückführung in den Wirtschaftskreislauf aus dem Abfallregime entlassen und damit zu einem Produkt werden.

Bei der Gesteinskörnung für den Einsatz im Beton ist dies gelungen, sie unterliegt dem gleichen Regelwerk (DIN EN 12620) wie primäre Gesteinskörnung und weist eine CE-Kennzeichnung auf. Für den aufbereiteten Recyclinggips konnten aufbauend auf den Anforderungen des KrWG für die Outputströme der Anlagenstandorte Einzelfalllösungen im Rahmen der Bundesimmissionsschutz-Genehmigung erarbeitet werden. Die nach § 5 Abs. 2 KrWG gegebene Ermächtigung für die Bundesregierung, durch Rechtsverordnung allgemeingültige Regelungen zu treffen, wurde bisher nicht genutzt.

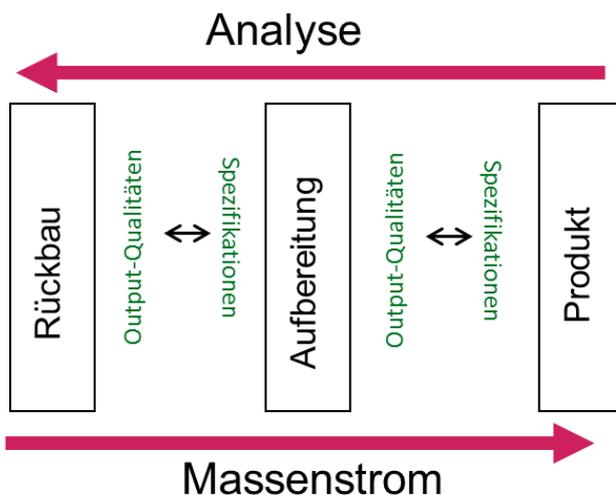
Regelungen zum Ende der Abfalleigenschaften müssen nicht zwingend auf Ebene der Europäischen Union oder auf nationaler Ebene gefunden werden. Derartige Festlegungen sind auch auf Ebene der Bundesländer zu erreichen. Ein Beispiel hierfür ist das System QRB4 in Baden-Württemberg für Baustoffe zum Einsatz im ungebundenen Bereich, wie im Erdbau oder im Straßen- und Wegebau. Der Erlass des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg definiert Kriterien, um RC-Baustoffe als Produkt einzustufen. Dies sind „Positiver Marktwert“, „vergleichbare Eigenschaften der Recyclingbaustoffe mit den Eigenschaften der zu substituierenden Primärrohstoffe“, „Herstellung bei einem Aufbereiter, der einer Gütegemeinschaft angeschlossen ist“ und „die Recyclingbaustoffe halten die im Erlass genannten Zuordnungswerte Z 1.1“ zuverlässig ein. Die Recyclingbaustoffe müssen ebenso wie Primärbaustoffe ordnungsgemäß deklariert werden, was bedeutet, dass für das Output-Material einer Recyclinganlage der jeweilige Anwendungsbereich genau zu bestimmen ist.

⁴ https://www.qrb-bw.de/home/das_produkztzertifikat

3.3.2 Optimierung von Aufbereitungsstrategien

Der Rückgriff auf sekundäre Rohstoffe ist für die Baustoffindustrie umso interessanter, je näher die Spezifikationen und Eigenschaften der aufbereiteten Materialien an, die der primären Rohstoffe heranreichen. So kann sichergestellt werden, dass die Bauprodukte in ihren gewohnten Leistungseigenschaften und Qualitäten nicht gefährdet werden und die Produktionsprozesse möglichst wenig auf diese sekundären Rohstoffe hin angepasst werden müssen. Von der Entsorgungswirtschaft verlangt diese Ausrichtung auf eine bessere Kreislaufführung nicht nur Investitionen in Technik und Know-how. Sie bedeutet ein Umdenken, die gesamten Prozesse der Aufbereitung müssen auf diese Anforderungen der Baustoffindustrie ausgelegt werden.

Abbildung 6: Denkrichtung einer rohstofforientierten Aufbereitungsstrategie



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Wie in der Grafik skizziert, muss die Konzeption der Aufbereitung vom geplanten Absatzweg bzw. den Erfordernissen des Kunden her erfolgen. Die nachgefragten Eigenschaften des Produktes müssen über die Aufbereitungstechnik bis hin zu der Entscheidung, welche Inputmaterialien geeignet sind, gesteuert werden, quasi gegenläufig zum Abfallmassenstrom. Die Materialien werden hierzu getrennt angenommen, gelagert und gezielt aufbereitet. Die Qualität des Inputmaterials, d. h. die Selektivität mit der die Abfälle ab der Baustelle bereitgestellt werden, bleibt auch bei dieser Vorgehensweise entscheidend, da der Sortierung technische und wirtschaftliche Grenzen gesetzt sind (vgl. 3.3.2).

Die klassische stationäre Aufbereitung ist in der Regel wenig technisiert. Die Anlagen beschränken sich auf Brecher und Siebe, das Handling erfolgt über Radlader. Die Maschinen sind nicht selten mobile oder semi-mobile Einheiten, was grundsätzlich die Möglichkeit bietet, Transportaufwendungen zu reduzieren, indem die Maschinen an die jeweils aufbereitende Anlage gestellt werden können. Die eigentliche Aufbereitung ist mit Brechen und Sieben „steinzeitlich“ und in ihren Möglichkeiten begrenzt. Dem klassischen Aufbereitungsziel, nämlich der Herstellung von Erdbaustoffen oder bestenfalls Baustoffen für den Straßen- und Wegebau, jedoch angemessen. Selbst zweistufige Anlagen mit unterschiedlichen Brechertypen und einer Abtrennung der ungeeigneten und häufig höher mit Schadstoffen belasteten Feinanteile durch ein Vorsieb sind selten.

Eine sortenreine Trennung der heterogenen Baustoffgemische, wie sie für ein hochwertiges Recycling vorausgesetzt wird, kann mit dem derzeitigen Stand der Technik nicht erreicht werden. Es bedarf zukünftig technischer Nachrüstungen, insbesondere zur besseren Abtrennung von Stör- und Fremdstoffen. Wärmedämmstoffe, die als Verbundsystem oder integriert in den Wandbaustoff vorliegen, sowie der Trend zu kunststoffbasierten Baumaterialien werden zukünftig die Zusammensetzung dieser Stoffströme weiter beeinflussen und die Anforderungen einer vertieften Aufbereitungsstrategie verstärken. Zunehmend werden die Abbruchmassen aus Bauwerken stammen, die zu einem Zeitpunkt errichtet wurden, zu dem viele heute für ein Recycling eher ungeeignete oder gar schadstoffbelastete Baustoffe eingesetzt wurden.

Zerkleinerungs- und Klassierverfahren müssen modifiziert und erweitert werden. Im Bereich der Sortierung kann auf sensorbasierte Verfahren zurückgegriffen werden, die in anderen Sektoren der Recyclingwirtschaft bereits zum Stand der Technik gehören. So ermöglichen beispielsweise optische Verfahren, wie NIR-Trennverfahren oder Farberkennungssysteme eine automatisierte Einzelkornsortierung im feinen Partikelgrößenbereich. Zudem wird eine Positivsortierung möglich, d. h. die Materialien mit den gewünschten Eigenschaften werden gezielt dem Massenstrom entzogen, was zu einer hohen Homogenität und Reinheit dieser separierten Fraktion führt.

In einem Unternehmen am Rande Berlins werden mit der optischen Sortierung Ziegel aus einem Bauschuttgemisch gewonnen, die als hochwertiges Granulat für die Herstellung von Pflanzsubstraten vermarktet werden. Ein vorgeschaltetes Sieb trennt die bodenlastige Feinfraktion, die aussortierten Ziegelbestandteile des Überkorns werden abschließend über einen Brecher konfektioniert. In Abbildung 7 ist das Ausgangsmaterial (hinten) sowie das reine Ziegelgranulat nach der Aufbereitungsstrecke zu erkennen.

Abbildung 7: Mittels optischer Farbsortierung separiertes Ziegelgranulat (vorne) und dessen Ausgangsmaterial (hinten)



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Eine Nassaufbereitung ist bislang nur in wenigen Anlagen installiert. Diese ermöglichen eine Trennung über die Dichte und erzielen einen zusätzlichen Reinigungseffekt. Problematisch ist die Aufbereitung der im internen Kreislauf gehaltenen Waschwässer. Insbesondere für die im Wasser gelösten Sulfate gibt es noch keine befriedigende Reinigungslösung. In einem von der DBU geförderten Forschungsprojekt (AZ 32046/01-23) wurde die gezielte Aufbereitung von Böden über eine Nassklassierung entwickelt und erprobt. Böden werden hier in einzelne Korngruppen aufklassiert. Dabei zeigt sich, dass die Korngruppe Schluff/Lehm durchaus als

Rohstoff für die Ziegelindustrie geeignet sein kann, da in dessen Produktion auf tonige/lehmige Ausgangsstoffe zurückgegriffen wird. In Nachbarschaft zu ihren Produktionsstätten greift die Ziegelindustrie auch direkt auf geeignetes, unbehandeltes Aushubmaterial zu. Da Böden deutschlandweit ein großes Entsorgungsproblem darstellen, bietet dieser Verwertungsansatz ein großes Potenzial. Voraussetzung ist u. a., dass der geogene Hintergrund keinen grobstückigen Kalk enthält. Die Entwässerung des klassierten Materials muss auf möglichst hohe Trockensubstanzgehalte (TS-Gehalte) erfolgen.

Im Rahmen eines vom BMBF geförderten Forschungsprojektes R-Beton⁵ wurden durch den Forschungspartner Verband der Deutschen Zementindustrie (VDZ) Untersuchungen zum Einsatz in der Zementproduktion durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass sich der Brechsand aus der Aufbereitung von ziegelreichem Mauerwerk möglicherweise als Hauptbestandteil von Zementrezepturen eignet und den Anteil Zementklinker reduzieren hilft. Die Brechsande enthalten Anteile an reaktiver Kieselsäure und sind widerstandsfähiger gegen Chlorideinträge. Die Entwicklung von genauen Rezepturen und RC-Anteilen erfordert aber noch weitergehende Forschung [Hedemann, J.; Meinshausen, I. 2017].

Darüber hinaus werden auf Forschungsebene weitere Aufbereitungsverfahren erprobt. Dazu zählen innovative Aufschlussverfahren, deren Aufgabe es ist Materialverbunde entlang der Grenzflächen voneinander zu trennen, um diese in nachgeschalteten Sortierprozessen zu trennen. Großtechnisch sind diese Verfahren, wie z. B. thermo-mechanische Verfahren oder die elektrodynamische Fragmentierung, noch nicht etabliert.

Neben der technischen Aufrüstung ist die Umstellung der Aufbereitungsstrategie von immenser Bedeutung. Ist das Ziel bislang die Herstellung von Gemischen für den Erdbau und bestenfalls für den Straßen- und Wegebau, die in ihrer Heterogenität und stofflichen Zusammensetzung größere Bandbreiten tolerieren, so müssen zukünftig komplexere und anspruchsvollere Kenngrößen, die die Produkteigenschaften bestimmen, erreicht werden.

Eine Vermarktung an die Baustoffindustrie erfordert die Einhaltung engerer Toleranzbereiche und eine Reproduzierbarkeit der Aufbereitungsergebnisse über große Massenströme hinweg. Der Wahl und Separierung des geeigneten Inputmaterials wird eine größere Bedeutung zukommen. Auch die Einstellung von Eigenschaften über Doseure, die bislang bei Bauschuttrecyclern kaum Anwendung finden, kann erforderlich werden. Insgesamt sind Aufbereitungsstrategien und –philosophien zu hinterfragen und anzupassen.

Die Umstellung der Aufbereiter auf das Portfolio ist recht groß. Weiterhin ergibt sich die Notwendigkeit einer Zertifizierung und eines dichten Kontrollsystems aus werkseigener Produktionskontrolle und Fremdüberwachung. Dies führt dazu, dass es bisher nur vergleichsweise wenige Produzenten von RC-Gesteinskörnungen für die Betonindustrie deutschlandweit gibt, was der wesentliche Grund für eine noch geringe Marktdurchdringung des Baustoffs R-Beton ist.

Aufbereitung von Gemischen für die Betonproduktion

Mit den oben aufgeführten Lösungen sind Strategien benannt, die darauf fokussiert sind, sortenreine Altmassen in die Baustoffproduktion zurück zu führen. Für gemischte Bauschuttfraktionen bietet die Produktion von Gesteinskörnungen des Typs 2 für die Betonproduktion ein hohes Potenzial, große Massenströme aus Mauerwerkbruch in den Hochbau zurückzuführen. Für Aufbereiter ist dies ein interessanter Absatzweg, da für die

⁵ <https://www.r-beton.de/>

großen Massenanteile an gemischtem Bauschuttstmals hochwertige Absatzmöglichkeiten erschlossen werden.

Die Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton erlaubt eine Recyclinggesteinskörnung nach Typ 2, die neben aufbereitetem Altbeton bis zu 30 % Mauerwerksanteile aufweisen darf. Dies können Ziegel- oder Kalksandsteinanteile und andere mineralische Altmassen sein, solange die für die Gesteinskörnung geforderten Spezifikationen nicht gefährdet werden. Dies sind insbesondere Kornrohdichte und Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischen Beanspruchungen. Trotzdem wird die Gesteinskörnung Typ 2 bundesweit bislang nur von einem Aufbereiter produziert.

Die Aufbereitung ist nicht trivial und wurde im Rahmen eines vom Umweltministerium Baden-Württemberg unterstützen Projektes entwickelt. Die wesentlichen Bausteine sind die getrennte Bereitstellung von Altbeton und den für das Verwertungsziel geeigneten Bauabfällen aus anderen Mauerwerksbaustoffen. Dies ist Ziegel- und Kalksandsteinmaterial, möglichst frei von Putzen und Leichtbaustoffen sowie bodenähnlichen Materialien. Die Aufbereitung erfolgt getrennt, so dass die zur Herstellung der in Typ 2 gewünschten Mischung nach der Aufbereitung erfolgen muss. Dies stellt bislang das zentrale Hemmnis dar. Auch wenn geeignetes Mauerwerk separat gehalten wird, können in großem Umfang auch Altbetone enthalten sein. Um eine definierte Zusammensetzung herstellen zu können, müssen die Altbetonanteile im Haufwerk Altmauerwerk bekannt sein. Diese schwanken und sind in der Praxis analytisch nicht zu bestimmen. Es bedarf daher Erfahrungswerten und die Optik als Hilfsgröße.

Die Mischung erfolgt bislang über die Radlader und deren in den Schaufeln eingebauten Waagen. Doseure sind bislang noch nicht im Einsatz. Sie verursachen höhere Betriebskosten, ohne das grundsätzliche Problem der fehlenden Kenntnis der genauen Zusammensetzung des Altmauerwerks beheben zu können. Um zulässige Anteile sicher einhalten zu können, werden in der Praxis daher Mischungen 80/20 anstatt 70/30 hergestellt.

Mit einem vom BMBF geförderten Forschungsprojekt⁶ wurden zudem jüngst die Grundlagen zur Fortschreibung des Regelwerkes gelegt. Die Forschungsergebnisse zeigten, dass RC-Gesteinskörnungen in wesentlich größerem Umfang in Betonrezepturen eingesetzt werden können, ohne die Eigenschaften des Transportbetons zu gefährden. Auch werden weitere Betonrezepturen zugelassen werden. Im Moment ist die mangelnde Rohstoffversorgung für die weitere Verbreitung von R-Beton das zentrale Problem. Mit dieser geplanten Fortschreibung des Regelwerkes wird es auch möglich werden, Brechsande aus der Aufbereitung von Altbeton einzusetzen. Brechsande fallen bei der Aufbereitung in größerem Umfang im Brechvorgang der Altmaterialien an. Können diese in Zukunft ebenfalls an die Betonindustrie vermarktet werden, wird die Ausrichtung auf diese neue Produktionslinie RC-Gesteinskörnung für die Betonindustrie leichter fallen.

Trotzdem liegt in der Aufbereitung der Bauschuttmassen in Richtung Betonindustrie noch größeres Potenzial. Eine Idee ist die Kombination aus Sortieren und Dichtentrennung. Dies würde nicht nur die Zusammensetzung beeinflussen, sondern auch die Chance bergen, Gesteinskörnungen unterschiedlicher spezifischer Dichte produzieren, die dann gezielt als solche der Betonproduktion zugeführt werden können. So gibt es die Leichtbetonindustrie, die Leichtbetone mit unterschiedlichen Kornrohdichten bzw. spezifischen Gewichten produziert und daher auch Gesteinskörnungen unterschiedlicher Kornrohdichten benötigt. Diese Spezifikationen wären nicht nur im Transportbetonbereich gegeben, sondern auch bei

⁶ <https://www.r-beton.de/>

Betonfertigteilen und allen Anwendungen, in denen die Betone neben den tragenden Funktionen auch hinsichtlich Wärmedämmung unterstützend wirken sollen.

Betonbauwerke stehen aber auch im Fokus bezüglich Ressourcenschutz. Es gilt, Betonbauwerke schlanker ausführen zu können, um die mit der Baustoffproduktion verbundenen Lasten zu mindern. Eine Option ist hier die Herstellung von gradierten Betonen.

An der Bauhaus-Universität Weimar wurde die Idee entwickelt, aus aufbereitetem gemischtem Mauerwerk Ausgangsmaterialien zu produzieren, die zur Herstellung einer sogenannten Aufbaukörnung verwendet werden können. Die Materialien werden in einem Drehrohr erhitzt, es entstehen Granulate, die dem Blähton ähnlich sind. Diese werden schon heute als Zuschlag in der Leichtbetonproduktion eingesetzt. Den Aufbaukörnungen aus der Aufbereitung von Altmaterialien stünde diese Option analog offen.

Konkurrierende Entsorgungswege

Die Erfahrung zeigt: Billige Senken sind des Recyclings Tod!

Minimale Preisunterschiede auf dem Entsorgungsmarkt führen zu Entsorgungsentscheidungen, die rein wirtschaftlich getrieben sind und die Abfallhierarchie untergraben. Betreiber von Aufbereitungsanlagen bewegen sich derzeit in einem Spannungsfeld, das geprägt ist von der Konkurrenzsituation zu niedrigen Annahmepreisen einfacher Verwertungs- oder Beseitigungsverfahren und den steigenden Qualitätsanforderungen der Baustoffindustrie (siehe oben). Eine Neuausrichtung der Produktion auf dieses Portfolio ist mit Investitionen und höheren Betriebskosten verbunden. Anreiz zur Erschließung dieser Absatzwege kann nur ein signifikant höheres Preisniveau für die sekundären Rohstoffe sein, als es bislang im klassischen Absatzbereich des Erd-, Straßen- und Wegebbaus erreicht werden konnte. Zur Kostendeckung tragen zwar auch die Erlöse aus der Annahme von Abfallmassen bei. Hier sind auskömmliche Preise bzw. die Sicherstellung der Inputmassen der Aufbereitungsanlage jedoch nur dann zu erzielen, wenn aufbereitungsarme und kostengünstige Entsorgungsoptionen insbesondere über Deponien und Verfüllmaßnahmen unterbunden werden bzw. nicht in einen ökonomischen Wettbewerb treten.

Deponiekapazitäten sind restriktiv zu halten. Seitens der Bundesländer sollte aktiv der Austausch mit Deponiebetreibern gesucht werden, um Annahmepreise für einzelne Abfallstoffe sicherzustellen, die das Recycling schützen und damit der Intention des Gesetzgebers der Abfallhierarchie entsprechen. Die zunehmend angespannte Entsorgungssituation führt aktuell zu immer weiteren Transportentfernungen. So werden aus Berlin große Massenströme mineralischer Bauabfälle zur Ablagerung oder zur Verfüllung in Richtung Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Thüringen oder Sachsen verbracht. Die Andienung der Abfälle in diesen einfachen und kostengünstigen Verwertungsverfahren sollte Abfällen vorbehalten sein, deren Eigenschaften eine höherwertige Verwertung selbst mit ambitionierten Aufbereitungstechniken nicht zulassen. Sinnvoll wäre zudem ein Verbot der Beseitigung von recyclingfähigen Abfällen. Dies könnte auf Ebene einzelner Bundesländer ausgesprochen werden.

Nach sukzessiver Anhebung der Annahmepreise für Gipsabfälle (Größenordnung ca. 40 €/t) konnte der Trend zur Ablagerung auf der Deponie in einigen Regionen Deutschlands gestoppt werden. Die Aufbereitung in spezialisierten Gipsrecyclinganlagen zu Recyclinggips gegenüber der Entsorgung auf einheimischen Deponien ist damit konkurrenzfähig worden. Das Problem der Verbringung ins Ausland konnte mit dieser Maßnahme jedoch nicht entgegengewirkt werden. Zur Verfüllung und Rekultivierung alter Uranschlammteiche werden erhebliche Massen gipshaltiger Abfälle nach Aufnahme auf der Grünen Liste nach Tschechien zur Verwertung exportiert. Aufgrund der sehr niedrigen Entsorgungsgebühren von unter 10 €/t sind die langen Transportwege und die daraus entstehenden Kosten kein Hemmnis. Das UBA prüft derzeit mit

Vertreter*innen der Länder sowie in Kooperation mit der Generaldirektion Umwelt der Europäischen Kommission rechtliche und administrative Schritte, um diese Form der Verbringung zukünftig zu unterbinden, denn auch aus umwelttechnischer Sicht ist die als Verwertung deklarierte Entsorgung äußerst kritisch zu betrachten.

3.3.3 Struktur Logistik

Am Beispiel der Verbringung von Gipsabfällen ins europäische Ausland zeigt sich, dass die Transportkosten kein Hemmnis darstellen, große Massenströme über weite Strecken zu fahren, um durch billige Annahmepreise Entsorgungskosten einzusparen. Auch im innerdeutschen Bereich sind Transportstrecken von mehreren hundert Kilometern keine Seltenheit mehr. Zielorte sind häufig kostengünstige Verfüllstätten. Die dabei entstehenden Emissionen sind vermeidbar. Nötig sind Steuerungsmechanismen, die den Straßentransport beschränken und so die ortsnahe Recyclingwirtschaft und die Aufbereitung stärken. Denkbar wäre eine Kostensteigerung nach dem Mautsystem der Schweiz, das für LKW ab 3,5 t eine Schwerverkehrsabgabe auf allen Straßen verlangt (nicht nur auf Bundesstraßen und Autobahnen). Die Höhe der Abgabe richtet sich nach den gefahrenen Kilometern, dem zulässigen Gesamtgewicht sowie der Emissionsklasse des LKWs und erhöht die Transportkosten in erheblichem Umfang.

Da gefahrene Bahnkilometer deutlich weniger Emissionen erzeugen als der gefahrene Straßenkilometer, muss von der Politik der Umstieg auf die Schiene unterstützt werden. Bauschuttrecycler mit Anschluss an das Schienennetz berichten von großen Schwierigkeiten diesen Nutzen zu können. Ebenso sollte der Umstieg auf Elektromobilität, auch im privaten Entsorgungs- und Transportbereich, gefördert werden.

Für mineralische Dämmstoffe ist die Logistik, aufgrund des großen Volumens bei sehr geringem spezifischem Gewicht, besonders kostenintensiv. Es müssen effizientere Transportlösungen entwickelt werden, die zum Beispiel eine Verdichtung vor dem Transport oder im Transportfahrzeug ermöglichen.

3.3.4 Schaffung von Marktanreizen für ressourcenschonende Baustoffe

Für den Einsatz von RC-Gesteinskörnungen im Beton stellt die Verfügbarkeit auf dem Markt, trotz der mittlerweile gestiegenen Bekanntheit des R-Betons, ein weiteres entscheidendes Hemmnis dar. Ambitionierte Architekturbüros, deren Auftraggeber sich zum Einsatz von R-Beton entschieden haben, berichten, dass trotz intensiver Bemühungen und Austausch mit Betonwerken, der Baustoff häufig regional nicht verfügbar ist.

Öffentliche Auftraggeber sind gemessen am Bauvolumen im Hoch- wie im Tiefbau eine relevante Einflussgröße. Die Vorbildfunktion zur Umsetzung der ressourcenpolitischen Zielstellungen, die auf Europa-, Bundes- und Landesebene in der Gesetzgebung verankert ist, wird jedoch in aller Regel nicht erfüllt. Nicht selten werden von öffentlichen Stellen gezielt Naturmaterialien ausgeschlossen und Nebenangebote nicht zulassen, so dass der Einsatz von RC-Baustoffen ausgeschlossen ist. Es bestehen große Unsicherheiten, ob bei Bevorzugung von RC-Baustoffen eine Verletzung des Vergaberechts vorliegen könnte. Vertragspartner von öffentlichen Auftraggebern ist jedoch nicht der Baustoffproduzent, sondern die bauausführende Firma. Somit hat jeder Anbieter die Möglichkeit, über die Wahl des Baustofflieferanten einen Baustoff mit RC-Anteil zu beziehen. Eine vergabewidrige Bevorzugung einzelner Unternehmen bei der verbindlichen Forderung nach dem Einsatz von RC-Baustoffen, findet somit nicht statt.

Zudem erfolgt die Vergabe fast ausschließlich über den Preis, obwohl nach §16d EU VOB/A die Anwendung und Gewichtung von weiteren Zuschlagskriterien nach eigenem Ermessen zulässig

ist. Voraussetzung ist, dass die zu Grunde liegende Bewertungsmatrix dem Bieter vorab zur Verfügung gestellt wird. In der Praxis stellt die Bewertung über den Preis hinaus jedoch einen Mehraufwand dar, der vermieden wird. Zudem sind diese Entscheidungen oft mit einem Ermessensspielraum behaftet, der grundsätzlich angreifbar sein kann und daher von einzelnen Sachbearbeitern gescheut wird. Dabei kann die Nachfrage von RC-Baustoffen durch den öffentlichen Auftraggeber den Markt anschieben und bestenfalls auch verstetigen. Dies schafft Planungssicherheit bei den Betreibern von Recyclinganlagen und führt langfristig zu einer Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der RC-Materialien.

Praxisbeispiele: Ausschreibung und Vergabe der öffentlichen Hand

Im Folgenden werden drei Ansätze zur Praxis der Ausschreibung und Vergabe der öffentlichen Hand aufgezeigt, die den Einsatz von ressourcenschonenden Baustoffen fördern.

Das Land Berlin setzt in diesem Bereich seit Jahren deutliche Akzente. Basierend auf § 7 (3) Berliner Ausschreibe- und Vergabegesetz gilt die Verwaltungsvorschrift Beschaffung und Umwelt (VwVBU). Diese Verwaltungsvorschrift ist mit Leistungsblättern⁷ hinterlegt, die als Baustein eines Leistungsverzeichnisses konkrete und verpflichtende Mindestanforderungen an die Beschaffung von Produkten oder die Beauftragung von Dienstleistungen formulieren. Für Baudienstleistungen sind Leistungsblätter in Kraft, die bei Hoch- und Tiefbaumaßnahmen Anwendung zu finden haben. So gibt das Leistungsblatt 26 für den Neubau und die Komplett-sanierung von bestimmten Gebäuden ab einer Bausumme von 10 Mio. € verpflichtend den Einsatz von R-Beton vor. Im Vorfeld der Einführung des neuen Leistungsblattes wurde durch den Senat ein enger Austausch zu allen am Bau beteiligten Akteuren, insbesondere den Bauschuttrecyclern und Betonherstellern, gepflegt, um mittelfristig eine stabile regionale Versorgungsstruktur zu etablieren. So wurde bspw. im September 2018 in Kooperation mit verschiedenen Bau- und Entsorgungsverbänden der Fachdialog „Einsatz von Recycling-Beton“ durchgeführt, um über die rechtlichen Grundlagen und spezifischen Anforderungen der Herstellung der RC-Gesteinskörnungen zu informieren und Netzwerke zu stärken. Bei der Pflanzung von Stadtbäumen ist nach Leistungsblatt 28 als Baumsustrat der Einsatz von industriellen Nebenprodukten (Rostasche) oder RC-Baustoffen (Ziegelsplitt) verpflichtend. Der Einsatz von Naturmaterialien wie Bims oder Lava ist für Baumsustrate unzulässig. Die Vorgabe, dass gütegesicherte RC-Baustoffe anstelle von Primärrohstoffen für Frostschutz- und Schottertragschichten sowie Erdbaustoffe im Straßenbau verpflichtend einzusetzen sind, wird voraussichtlich ab Herbst 2020 gültig. Entsprechende Leistungsblätter wurden erarbeitet und sind den zuständigen Behörden ab sofort zur Anwendung empfohlen. Die Ergebnisse eines extern vergebenen Monitorings bestärken die Praxis, die Akzeptanz bei den Vergabestellen des Landes ist hoch⁸. Dies ist insbesondere darauf zurück zu führen, dass eine eventuell schwierige und angreifbare Ermessungsentscheidung im Vergabeprozess dem einzelnen Sachbearbeiter abgenommen wird. Die in den Leistungsblättern formulierten Umwelanforderungen können zudem auch von privaten Bauherren als Mindestanforderungen für ihre Vorhaben genutzt werden.

Das Amt für Hochbau und Gebäudewirtschaft der Stadt Karlsruhe hat den Beschluss gefasst, in ihren Bauvorhaben R-Beton einzusetzen. Da die Verfügbarkeit des Baustoffes in der Region nicht gegeben war, musste der Markt schrittweise und in Absprache mit den Akteuren vor Ort aufgebaut werden. Die Ausschreibung des R-Betons erfolgt seit diesem Zeitpunkt gezielt und setzt Anreize. Gestärkt wurde das Vorgehen durch einen Gemeinderatsbeschluss des Jahres 2009, der über eine Leitlinie die bevorzugte Verwendung von R-Beton konkret benennt.

⁷ https://www.berlin.de/senuvk/service/gesetzestexte/de/download/beschaffung/VwVBU_Anhang1.pdf

⁸ https://www.berlin.de/senuvk/service/gesetzestexte/de/beschaffung/studie_evaluierung.shtml

Weiterhin ermöglicht es die Vergabe-Dienstanweisung der Stadt Karlsruhe, die die stadtspezifischen Festlegungen für die wirtschaftliche, rechtmäßige und transparente Vergabe aller Leistungen regelt, ein Angebot mit umweltverträglichen Leistungen auch dann als wirtschaftlich gelten zu lassen, wenn es preislich über einem anderen Angebot liegt. In Karlsruhe wurden dementsprechend bereits erste Bauvorhaben mit R-Beton errichtet. Aktuell erfolgt die Erweiterung der Drais-Schule.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes wurde zudem ein eigener Ansatz entwickelt, der Umweltaspekte bei Vergabeprozessen und den Rückgriff auf den Materialkreislauf honorieren soll. Hintergrund sind die Landesabfallgesetze, die bspw. in Rheinland-Pfalz in §2 (1) zur Absatzförderung vorgeben, dass „solchen Produkten der Vorzug zu geben ist, die durch Vorbereitung zur Wiederverwendung oder durch Recycling von Abfällen (...) hergestellt sind, (...) sofern die Produkte für den Verwendungszweck geeignet sind und dadurch keine unzumutbaren Mehrkosten entstehen.“. Basis ist eine neutrale, auf die Eigenschaften abzielende Ausschreibung, die aber neben dem Preis weitere Wertungskriterien vorsieht. Diese müssen in den Ausschreibungstexten explizit mit ihrer Gewichtung und den Bewertungsansätzen benannt sein. Ein Vorschlag für eine Bewertungsmatrix für die Baustofflieferung (hier: Transportbeton) ist nachfolgend skizziert. Sowohl Klima- als auch Ressourcenschutzaspekte sind darin berücksichtigt.

Tabelle 1: Beispielhafte Berücksichtigung von umweltbezogenen Bewertungskriterien im Vergabeprozess

Hauptkriterium	Unterkriterium	Gewichtungsfaktor	Zielerreichung	Faktor	
Ressourcenschonung	Anteil RC-Beton	10	100 %	1	
	20	in Massen %	0 %	0	
		Grad der Ausschöpfung GK nach	7,5	zu 100 %	1
		den Vorgaben des DAfStb		zu 20 %	0,2
		Verwendung GK Typ 1	2,5		0,5
		Verwendung GK Typ 2			1
Klimaschutz	Lieferentfernung	10	Bis 20 Straßenkilometer	1	
			20	Bis 30 km	0,75
				bis 40 km	0,5
				bis 50 km	0,25
				>50	0
		Zementensatz	10	Portlandzementanteil 50 %	1
			60 %	0,8	

			70 %	0,6
			80 %	0,4
			90 %	0,2
			100 %	0
Preis	Endpreis			
60		60		

Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Es gilt festzuhalten, dass die Verfügbarkeit von R-Beton in einigen Regionen Süddeutschlands (Stuttgart, Mannheim) besser ist, als im restlichen Bundesgebiet. Mithilfe mehrerer Pilotprojekte wurden Praxiserfahrungen gesammelt, die bei einigen Betonmischwerken zu einer dauerhaften Produktion mit recycelter Gesteinskörnung geführt haben. In Summe gibt es deutschlandweit (Region Stuttgart, Region Berlin) 3 Transportbetonwerke, die im Regelfall auf die Herstellung von R-Beton umgestellt haben und innerhalb der Spielräume des Regelwerkes möglichst alle Baustellen damit beliefern. Eine gezielte Nachfrage für diesen Baustoff blieb in den anderen Regionen bislang jedoch weitestgehend aus bzw. auf wenige Baumaßnahmen beschränkt. Trotzdem wäre der Einsatz von R-Beton in öffentlichen Bauten, gerade in diesen Regionen, mit vergleichbar wenig Aufwand umzusetzen. Bei entsprechender Nachfrage reagiert die Baustoffindustrie in der Regel umgehend.

Kennzeichnung und Vermarktung von Baustoffen mit RC-Anteil

Werden ressourcenschonende Baustoffe in Vergabeprozessen gefordert, müssen die Eigenschaften der angebotenen Produkte, wie z. B. der RC-Anteil oder die geografische Herkunft der Bestandteile, durch den Auftraggeber nachvollzogen und bewertet werden können. Der Nachweis kann nur über den Hersteller der Baustoffe geführt und kommuniziert werden. Es bedarf daher Produktlabel oder anderer nachprüfbarer und geprüfter Angaben.

Baustoffe, denen positive Umwelteigenschaften (Ressourcenschonung) zugeschrieben werden, können darüber vermarktet werden und wecken das Interesse bei Architekten und Bauherren. Vor allem die Planer, d. h. die Architekten, sind hier von zentraler Bedeutung. Bauausführende Firmen und Bauhandwerk sind den Baustoffen gegenüber grundsätzlich positiv eingestellt, sie reagieren jedoch nur auf entsprechende Nachfrage. Aufgrund der erwarteten positiven Resonanz auf diese Baustoffe ist die Transportbetonindustrie dabei ein entsprechendes Label zu entwickeln.

Insgesamt zeigt sich die Baustoffindustrie jedoch bislang zurückhaltend. Die bereits heute in der Produktion eingesetzten sekundären Rohstoffe werden nicht als Verkaufsargumente eingesetzt. Weder der in Gipsprodukten verwendete REA-Gipsanteil aus der Rauchgasentschwefelung von Kohlekraftwerken, noch die Anteile an Altscherben bei der Produktion von Glaswolle oder Flachgläsern werden an die Endverbraucher kommuniziert. Gründe dafür liegen in der volatilen Verfügbarkeit der sekundären Rohstoffe. Schwankende RC-Anteile machen eine allgemeingültige quantitative Angabe schwierig. Zudem stellt sich die Frage der Betrachtungsgrenze. Sollen Angaben standort- oder anlagenbezogen ermittelt oder Konzerne in Gänze bilanziert werden. Es fehlt an branchenweiten Absprachen. Ein weiteres entscheidendes Hemmnis stellt die fehlende Akzeptanz des Endverbrauchers dar. Insbesondere aus Imagegründen wird darauf verzichtet den Einsatz von aufbereiteten Materialien zu benennen.

Da eine höhere Ressourceneffizienz von Baustoffen und ihr Einsatz nicht per se mit unmittelbaren wirtschaftlichen Vorteilen verbunden ist – bzw. im Zweifel auch ein wenig mehr kosten darf – muss die Verwendung im Gesamtpaket sinnvoll sein. So sollte der Einsatz ressourcenschonender Baustoffe die Anforderungen aus Gebäudezertifizierungssystemen erfüllen helfen und die Vermarktung der Immobilie fördern.

Lenkungswirkung von Gebäudezertifizierungssystemen

Welche Bedeutung Zertifizierungssysteme für Bauwerke haben können, zeigt das Beispiel der Schweiz. Minergie ist ein Schweizer Baustandard für neue und modernisierte Gebäude. Die Marke wird von der Wirtschaft, den Kantonen und dem Bund gemeinsam getragen. Minergie-ECO ergänzt die drei Minergie-Baustandards mit den Themen Gesundheit und Bauökologie, wobei mit letzterem die Auswahl der Baustoffe einbezogen ist. Der Kriterienkatalog enthält 80 Kriterien, die Mindeststandards definieren oder sogar als Ausschlusskriterien fungieren. Das Kriterium MM3.0209 benennt Anforderungen an die Verwendung von RC-Beton. Die Vorgabe lautet, dass mindestens 50 % der Betonbauteile in einem Gebäude, die nach dem Regelwerk der Schweiz aus RC-Beton hergestellt werden dürfen, aus diesem Baustoff bestehen müssen. Von diesem Mindeststandard kann nur dann abgewichen werden, wenn nachgewiesen werden kann, dass für den RC-Beton keine Bezugsmöglichkeit innerhalb von 25 km um die Baustelle besteht (oder das Recyclingmaterial weiter als 25 km zum Betonwerk transportiert werden müsste). Da in der Schweiz ein Transportbeton erst dann als RC-Beton gilt, wenn mindestens 25 % RC-Gesteinskörnung in der Rezeptur enthalten sind¹⁰, ist mit dieser Vorgabe von Minergie-Eco ein großer stoffstromlenkender Effekt verbunden. Schon im Jahre 2010 lag die gesamte in der Schweiz produzierte Menge RC-Beton bei 1,5 Mio. Tonnen und damit bei etwa 5 % der Betonproduktion. Mittlerweile sind etwa 15 % Marktanteil erreicht. Dieser Erfolg ist nicht unwesentlich auf die Vorgaben aus Minergie-Eco zurückzuführen.

Die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) kennt derartige Vorgaben bislang nicht. Im Januar 2019 wurde die Broschüre: Circular Economy – Kreisläufe schließen, heißt zukunftsfähig sein¹¹, veröffentlicht, die unter anderem Circular-Economy-Boni für das DGNB-System benennt. Der Aspekt „Sicherung der Nachhaltigkeitsaspekte in Ausschreibung und Vergabe“ ermöglicht 10 Boni-Punkte (von insgesamt 130), macht aber keine konkreten, verbindlichen Vorgaben. Die sehr allgemein gehaltene Formulierung lautet: „In den Ausschreibungen werden mineralische Recyclingmaterialien ausdrücklich nicht ausgeschlossen, sondern es sind Anforderungen an die Bauprodukte formuliert, die eine Wiederverwendung oder die Nutzung von Sekundärmaterialien explizit empfehlen oder fordern.“ Mit dieser Formulierung lassen sich die Boni auch dann erreichen, wenn faktisch keine unter Verwendung von Recyclingmaterial produzierten Bauprodukte zur Anwendung kommen. Ausreichend ist die Nutzung von Sekundärmaterialien in den Ausschreibungsunterlagen zu empfehlen.

Im Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen BNB, das vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung in Kooperation mit der DGNB für öffentliche Bauvorhaben entwickelt und im Jahre 2010 eingeführt wurde, wird der „ökologischen Qualität“ eine Bedeutung von 22,5 % am gesamten Kriterienkatalog zugestanden. Diese ökologische Qualität der Gebäude wird über eine Ökobilanz bestimmt, die der Qualitätsbewertung zugrunde liegenden Kriterien sind meist klassische Ökobilanz-Wirkungskategorien. In dem Kriterium „Nachhaltige Materialgewinnung / Biodiversität“ (1.1.7) wird die Verwendung von Materialien, deren Gewinnung und Verarbeitung

⁹ https://www.minergie.ch/media/180125_vorgabenkatalog_de_modernisierung_2018_v1.4.pdf

¹⁰ https://www.empa.ch/documents/55996/4860287/Rezyklierte+Gesteinsk%C3%B6rnung-HoffmannJacobs_2010.pdf/83946bf8-ec2d-4430-a654-5d5f731d80eb

¹¹ Christine Ruiz Durán, Dr. Christine Lemaitre, Dr. Anna Braune (DGNB e.V.), Circular Economy – Kreisläufe schließen, heißt zukunftsfähig sein, Januar 2019

anerkannten ökologischen Standards entsprechen, eingefordert. Materiell ist das ganze Kriterium jedoch auf die Bewertung von Holzbaustoffen ausgerichtet. Auch das Kriterium „Flächeninanspruchnahme“ (1.2.4) zielt nur auf die Beanspruchung durch das Bauvorhaben selbst und nicht vorgelagert auf die Inanspruchnahme durch die für die Herstellung der Baustoffe notwendige Rohstoffgewinnung und berücksichtigt damit den Rückgriff auf Baustoffe aus dem Materialkreislauf nicht.

Es zeigt sich, dass die deutschen Zertifizierungssysteme für Gebäude den Rückgriff auf Baustoffe mit RC-Anteil nicht oder nur sehr untergeordnet honorieren. Eine Lenkungswirkung zur Optimierung der Kreislaufwirtschaft der derzeitigen Bewertungskategorien ist damit ausgeschlossen. Nötig wären transparente und verpflichtende Vorgaben zum Einsatz von ressourcenschonenden Baustoffen, deren Erfüllung ein relevanter Anreiz im Zertifizierungsprozess darstellt.

3.3.5 Konzeption von Rückbau, Abbruch und Entsorgung

Wie aus den obigen Ausführungen deutlich wurde: die Bereitstellung der Abfallmassen, möglichst sortenrein, sauber und frei von Stör- und Fremdstoffen ist eine zentrale Voraussetzung für eine ambitionierte Kreislaufwirtschaft. Die Möglichkeiten einer Aufbereitung sind begrenzt. Dies gilt auch, wenn ambitionierte Trenn- und Sortiertechniken zum Einsatz kommen.

Umsetzung der Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV)

Für die Bereitstellung getrennter Abfallfraktionen gelten durch die Novellierung der GewAbfV im Jahr 2017 verbindliche gesetzliche Vorgaben. Nach § 8 (1) GewAbfV sind u. a. Beton, Baustoffe auf Gipsbasis, Ziegel, Holz, Kunststoffe, Glas und Dämmmaterialien sortenrein auf der Baustelle zu erfassen und vorrangig einer Wiederverwendung oder einer stofflichen Verwertung zuzuführen. Gemische dürfen nur in begründeten Ausnahmefällen anfallen und sind je nach Zusammensetzung einer Aufbereitungs- oder Vorbehandlungsanlage zur Entsorgung anzudienen. Mineralische Gemische sind Aufbereitungsanlagen zu übergeben, d. h. Anlagen, die Straßenbaustoffe nach TL SoB StB 04 oder Gesteinskörnungen für die Betonindustrie (DIN EN 12620) oder Heißasphaltnischwerke (DIN EN 13043) herstellen und der Betrieb und seine Produkte einer permanenten Güteüberwachung nach dem System 2+ unterliegen. Diese Vorgaben stehen nach §8 (2) GewAbfV unter dem Vorbehalt technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar. Wie in der Mitteilung 34 der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA M34) ausgeführt, ist technisch nicht möglich insbesondere bei statischen Fragestellungen ein gerechtfertigter Ausnahmefall und als Begründung für die gemischte Erfassung anwendbar. Nahezu alle anderen Rahmenbedingungen wie schwierige Platzverhältnisse und Stellmöglichkeiten von Containern sind eher Fragen der Kosten und damit der wirtschaftlichen Zumutbarkeit. Diese Grenze der Zumutbarkeit ist jedoch nicht näher definiert.

Die Praxis zeigt deshalb, dass insbesondere die getrennte Bereitstellung der abgebrochenen Baumaterialien nur unzureichend umgesetzt wird. Die Pflichten der Gewerbeabfallverordnung werden regelmäßig nicht ausreichend erfüllt. Gleichzeitig sind auch die behördliche Überwachung und der Vollzug von abfallrechtlichen Vorgaben auf der Baustelle unzureichend. Dieser Missstand ist bei Abbruchunternehmen bekannt und führt dazu, dass Abbruch- und Entsorgungsdienstleistungen vorwiegend unter dem Aspekt „Arbeitsaufwand“ kalkuliert, optimiert und angeboten werden. Eventuell entstehende höhere Entsorgungskosten für nicht sortenrein erfasste Bauabfälle werden durch den geringeren Arbeitsaufwand in der Gesamtkalkulation kompensiert. Dieses Vorgehen wird besonders in Regionen verfolgt, in denen

kostengünstige Entsorgungsoptionen für Bauabfallgemische im nahen oder mittleren Umkreis zur Verfügung stehen.

Überwachend tätig werden die zuständigen kommunalen Abfallbehörden in der Regel nur dann, wenn der Verdacht eines Verstoßes vorliegt - eine routinemäßige Überprüfung findet nicht statt. Entscheidende Hemmnisse sind die knappe personelle Ausstattung der Kontrollbehörden sowie die Unkenntnis über geplante oder bereits in der Umsetzung befindliche Bauvorhaben. Anzeige- und Genehmigungspflichten bei Abbruch- und Rückbaumaßnahmen sind in den Bauordnungen der Länder festgesetzt und bundesweit sehr uneinheitlich geregelt. Über eine Angleichung der Landesbauordnungen ist daher sicherzustellen, dass alle erforderlichen Informationen rechtzeitig vor Baubeginn der Baubehörde vorliegen. Diese Informationen sind der zuständigen Abfallbehörde zur Verfügung zu stellen. Nur so ist eine Überwachung vor Ort während der Bauphase, als auch die Abfrage der Dokumentation des Verbleibs nach GewAbfV der Abfälle nach Abschluss einer Baumaßnahme möglich. Der dafür notwendige Vollzugshebel, nämlich die Erhebung einer Geldbuße von bis zu 100.000 € bei einem Verstoß gegen das Getrennthaltungsverbot, hat der Gesetzgeber über die GewAbfV bereits implementiert. Insbesondere die behördliche Erfassung des bauausführenden Unternehmens ist für die Planung von Routinekontrollen von Bedeutung, denn mit steigenden Erfahrungswerten können so auffällig gewordene Unternehmen einer gezielten Kontrolle unterzogen werden.

Der prekären personellen Ausstattung der Vollzugsbehörden ist mit der kurzfristigen Schaffung von zusätzlichen Stellen entgegenzuwirken. Gleichzeitig ist die Zusammenlegung von Zuständigkeiten ein wirksames Instrument, um Kapazitäten der Behördenmitarbeiter zu bündeln. Die Einführung bzw. Ausweitung von digitalisierten Verwaltungsprozessen ermöglicht weitere Effizienzgewinne. Als Vorbild operiert der Landkreis Konstanz, der durch die enge Zusammenarbeit unterschiedlicher Fachabteilungen ein dichtes Kontrollnetz in der Praxis etabliert hat. So nehmen bspw. Mitarbeiter des Gewerbeamtes bei einer Vor-Ort-Begehung zusätzlich Prüfaufgaben der Abfallbehörden wahr – und umgekehrt. Wichtig ist, dass Kontrollen vereinheitlicht und das Personal entsprechend geschult wird. Die obersten Abfallbehörden der Länder müssen in Abstimmung mit den oberen und unteren Landesbehörden Vorgaben erarbeiten, die den Mitarbeitern in Form von Checklisten oder Handlungsleitfäden zur Verfügung gestellt werden. Dieses Informationsmaterial ist gleichzeitig den Bauunternehmen und Bauherren als Orientierungshilfe zur Verfügung zu stellen.

Rückbau- und Entsorgungskonzept

Die entscheidende Weichenstellung für die Hochwertigkeit der Verwertung der beim Rückbau anfallenden Abfallmassen ist die Selektivität des Rückbaus der Bauwerke. Entscheidend ist zum einen die getrennte Entnahme von Bauteilen, die entweder über die Nutzungszeit hinweg relevant durch Schadstoffe belastet wurden oder die unter Verwendung von Stoffen produziert wurden, die heute als umwelt- oder gesundheitsgefährdend gelten. Zum anderen lassen sich Bauteile und Baumaterialien nur dann stofflich verwerten, wenn sie möglichst sortenrein ab Baustelle einer Verwertung übergeben werden können. Dies bedeutet, dass bereits auf der Baustelle Material- und Konstruktionsverbunde im erforderlichen Umfang zu lösen sind und für die einzelnen Verwertungswege separat bereitgestellt werden müssen. Weiterhin haben Verwerter und Betreiber von Aufbereitungs- und Vorbehandlungsanlagen konkrete Anforderungen und nötige Spezifikationen an die Abfallmassen, bspw. die Freiheit von Stör- und Fremdstoffen. Dies ist für jede einzelne Rückbaumaßnahme zu prüfen und dann in ein entsprechendes Konzept zu überführen.

Die genaue Ausgestaltung des selektiven Rückbaus ergibt sich aus dem Einzelfall und ist abhängig von der Gebäudeart, der Nutzungsgeschichte und der Bauweise. Verbindliche

Regelwerke, die allgemeine Anforderungen an einen selektiven Rückbau definieren, bestehen bislang nicht. Nötig wären eine Begriffsdefinition und die verpflichtende Vorgabe zur Anwendung über die Landesbauordnungen. Eine Verankerung im Abfallrecht ist nicht zielführend, da diese Regelungen erst dann greifen können, wenn die Materialien bereits als Abfall vorliegen. Konzeption und Planung von Rückbaumaßnahmen müssen aber zu einem Zeitpunkt erfolgen, wenn das Bauwerk noch im Produktstatus vorhanden ist. Sinnvoll wäre die Einführung der Pflicht zur Beauftragung eines Abbruchberaters ab einem bestimmten Abbruchvolumen (bspw. gemessen am umbauten Raum).

Für die Schadstoffbegutachtung, die Konzeption der Entkernung und des Abbruchs stehen Fachfirmen und Experten zur Verfügung. So benennt bspw. der Deutsche Abbruchverband "Fachberater Abbruch", die einen entsprechenden Fachkundenachweis erbringen müssen. Die Tätigkeitsschwerpunkte der Abbruchberater liegen bislang auf der Beurteilung des Schadstoffpotenzials sowie auf rückbaustatischen Fragestellungen. Bei Ausweitung der Expertise auf die Wiederverwendung von Bauteilen bzw. auf die hochwertige Verwertung von Bauabfällen, könnte die Qualität des selektiven Rückbaus und damit das Verwertungspotenzial der an der Baustelle anfallenden Bauabfallfraktionen noch gesteigert werden. Die Ernennung zum Fachberater durch den Deutschen Abbruchverband erfordert die Teilnahme an jährlichen Fort- und Weiterbildungsmaßnahmen sowie die Aktualisierung der Nachweise nach spätestens 5 Jahren. Themen wie „Verwertungsstrategien von Bauabfällen und dessen Erfordernisse“ könnten mittelfristig über die bestehende Struktur in den Qualifikationsanforderungen verankert werden. Bauherren berichten, dass bei Einbindung eines Abbruchberaters durchweg positive Erfahrungen gemacht werden. Der geringfügigen Kostensteigerung steht eine erhöhte Planungssicherheit gegenüber. Entsorgungskosten und Zeitplan können im Vorfeld deutlich sicherer kalkuliert und eingehalten werden.

Die Ausgestaltung des Rückbaus muss im Leistungsverzeichnis vorgegeben werden, bspw. durch Beifügen des im Vorfeld erstellen Rückbaukonzeptes. Dieses muss im Rückbauprozess durch den Auftragnehmer vollumfänglich erfüllt werden. Dies ist nur durch ein qualifiziertes Rückbauunternehmen umsetzbar, so dass Mindestvorgaben an die Qualifizierung der Unternehmen zu definieren sind, die zur Angebotsabgabe berechtigen bzw. eine Zulassung im Vergabeverfahren ermöglichen. Ein Teilnahmekriterium könnte das RAL Gütezeichen Abbruch sein. Das Gütezeichen differenziert nach den einzelnen Einsatzbereichen und verlangt darauf zugeschnitten eine Mindestausstattung mit entsprechender Maschinenteknik und qualifiziertem Personal.

Nicht zuletzt die Diskussion um die mögliche Asbestbelastung von Abbruchmassen macht erneut deutlich, dass dem eigentlichen Abbruch eine umfassende Schadstofferkundung und ggf. -entfrachtung voraus gehen muss. Nur die Verantwortung des Bauherren bietet die Gewähr für einen verlässlichen Ablauf von Gebäudeerkundung bis zur ordnungsgemäßen Entsorgung. Und nur vor dem eigentlichen Abbruch lassen sich problematische Bauteile erkennen und separieren. Eine Abtrennung aus dem Abfallmassenstrom nach Abbruch ist nicht mehr möglich. In der Gefahrstoffverordnung soll zukünftig eine Erkundungspflicht der Bauherren verankert werden. Dies muss auch noch im Abfallrecht verankert werden – Abfallerzeuger ist der Bauherr.

Der Nachweis der Asbestfreiheit muss eine Freischaltung für die gesamte weitere Entsorgungskette bedeuten. Dies wurde der Bundesregierung durch unterschiedliche Fachverbände kommuniziert. Zwingend nötig ist dafür eine kurzfristige Regelung, wie Asbestfreiheit definiert ist und welche Analysemethoden zur Bestimmung geeignet sind. Da die Bausubstanz wird vor allem aus 1-2 Familienhäusern gebildet wird, dürfen private Bauherren nicht von dieser Pflicht ausgenommen werden.

3.3.6 Recyclinggerechtes Bauen

Eine getrennte Bereitstellung von Abfallmassen, möglichst frei von Fremd- und Störstoffen, ist Grundvoraussetzung einer hochwertigen Verwertung. Trotzdem scheitert auch ein ambitionierter und möglicherweise stark handgeführter Rückbau an nicht lösbaren Material- und Konstruktionsverbunden. Beides ist in den letzten Jahrzehnten immer üblicher geworden. Der Rückbau ist zunehmend mit problematischeren Altbauten konfrontiert.

Der heutige Bestand lässt sich rückwirkend baulich nicht verändern. Rückbaumaßnahmen erfolgen in der Regel erst Jahrzehnte nach der Errichtung des Bauwerkes, so dass es aus den heutigen Problemen zu lernen gilt. Die Konstruktion der Bauwerke sowie die Auswahl der Baustoffe muss zukünftig immer auch die Rückbaubarkeit und Recyclingfähigkeit gewährleisten.

Ausbildung von planenden und bauausführenden Berufsgruppen

Elementare Bestandteile des recyclinggerechten Bauens sind eine recyclinggerechte Baukonstruktion und die Verwendung von Materialien, die sich bei Rückbau und Abbruch von Gebäuden möglichst ohne Verluste wiederaufbereiten und zu Baustoffen verarbeiten lassen. Voraussetzung ist Konstruktions- und Materialverbünde lösbar zu gestalten, sodass eine Trennung, möglichst noch auf der Baustelle, möglich ist. Dafür müssen insbesondere die Architekten und Bauplaner diesen Aspekt bei Planung, Konzeption und Ausschreibung berücksichtigen und über entsprechendes Fachwissen verfügen.

Die Beobachtung der Baupraxis und der Praxis in Ausschreibung und Vergabe zeigt, dass es den zentralen Akteuren auf Seiten der Bauherren sowie den eingebundenen Planern hinsichtlich des Einsatzes von RC-Baustoffen häufig sowohl an Erfahrung als auch entsprechendem Fachwissen mangelt. Schaut man sich die Ausbildungssituation genauer an, ergibt sich folgendes Bild:

Über Universitäten und Hochschulen werden Architekten und Bauingenieure ausgebildet. Zwar gibt es eine Vielzahl von Studiengängen, auch zum Thema Ressourcenschonung, betrachtet man die Studieninhalte jedoch näher, werden deutliche Defizite erkennbar. Seminare und andere Einheiten rund um die Kreislaufwirtschaft auf dem Bau werden nur im absoluten Ausnahmefall angeboten. Dies gilt sowohl für die Ausbildung der Architekten als auch die der Bauingenieure. Auch die genauere Betrachtung der Studiengänge für Ressourceneffizienz zeigt, dass damit in der Regel Fragen des Energieeffizienz und des Klimaschutzes oder die Verwertung anderer Abfallmassenströme angesprochen werden. Die Aufbereitung von mineralischen Bauabfallmassen wird maximal angeschnitten, aber nicht vertieft.

Die Situation dürfte sich dort im Wandel befinden wo es Hochschulkooperationen mit der deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB) gibt. Sie trägt dazu bei die Studierenden auch in den Punkten Ressourceneffizienz, recyclinggerechtes Bauen und Kreislaufwirtschaft zu erreichen. Bis dato sind es bundesweit aber nur sehr wenige Hochschulen, die eine Kooperation mit der DGNB oder ähnlichen Institutionen eingehen.

Es bestätigt sich die Einschätzung, dass Tragwerksplaner und Architekten im Studium für dieses Thema nicht zwangsläufig eine „Grundausbildung“ erhalten. Bauingenieure und Architekten unterliegen der sogenannten Fort- und Weiterbildungsordnung ihrer jeweiligen Kammer, so werden beispielsweise von der Architektenkammer jährlich mindestens acht Unterrichtsstunden durch anerkannte Fortbildungsträger gefordert. Dies gilt für die gesamte Zeit der Berufstätigkeit. Bei etwa 100.000 Architekten und mindestens genauso vielen Bauingenieuren in Deutschland muss das Angebot zwangsläufig sehr umfangreich sein. Aber auch hier zeigt sich das gleiche Bild. Angebote aus dem Bereich Kreislaufwirtschaft auf dem Bau sind die absolute Ausnahme.

Die Fortbildungsverpflichtung ist jedoch der zentrale Ansatzpunkt zur Optimierung der Situation. Sowohl die Fortbildungsinstitutionen als auch die Fortbildungsangebote selbst bedürfen einer Anerkennung der Kammern. Die Kammern besitzen damit einen Hebel, um unmittelbar auf das Fortbildungsangebot Einfluss nehmen können und eine Vielzahl von Mitgliedern zu erreichen. In Anlehnung an das Konzept der "außerschulischen Lernorte" sollten geeignete Orte zusammengestellt, ausgestattet sowie die Lehrangebote finanziell unterstützt werden. Hierzu bedarf es entsprechender Kriterien, die Best Practice Beispiele benennen und sich zudem über die Zeit fortschreiben lassen, sowie Kartenwerke, auf denen diese verzeichnet und bspw. mit Steckbriefen hinterlegt sind.

Die Überprüfung und Anpassung der Curricula sollte auch auf den nicht-universitären Bereich übertragen werden. In den Ausbildungsordnungen und Rahmenplänen für Lehrberufe aus dem Bauhandwerk werden diese Aspekte ebenfalls nicht ausreichend berücksichtigt. Als wesentliche Akteure in der Ausgestaltung des Innenausbaus beeinflussen sie die Baustoffauswahl auch im konstruktiven Bereich mit, so dass ein geschärftes Bewusstsein erforderlich ist.

Lösungsansätze aus dem Bereich Design for Recycling bieten ein großes Potenzial, signifikante Änderungen können jedoch aufgrund der langen Nutzungsdauer der Bauprodukte erst mittelfristig wirksam werden. Es braucht ein übergeordnetes Interesse, um schon heute in die Forschung und Entwicklung zu investieren und die Grundlagen für ein hochwertiges Recycling zukünftiger Materialströme zu erarbeiten, um zukünftigen Generationen die anthropogenen Rohstofflager verfügbar zu machen.

Zulassung von Baustoffen nur bei nachgewiesener Recyclingfähigkeit

Materialverbunde sind unter den Baustoffen immer populärer geworden. Dies resultiert zum einen daraus, dass die Baumaterialien nicht nur statische Eigenschaften erfüllen, sondern zunehmend auch hinsichtlich des Klimaschutzes höheren Anforderungen gerecht werden müssen. Als Ergebnis dieses Trends sind bspw. mit Dämmstoffen gefüllte Mauersteine entwickelt und auf den Markt gebracht worden. Diese Dämmstoffe lassen sich später ab Baustelle nicht getrennt halten. Die Aufbereiter werden demzufolge in Zukunft mit einem Massenstrom konfrontiert werden, der zu > 50 Vol.-% aus Dämmmaterialien besteht, die in einem ersten Schritt zunächst vom eigentlichen mineralischen Bauschutt vollständig abzutrennen sind. Dies wird sich nur über gezielt mit entsprechender Aufbereitungstechnik ausgestatteten Aufbereitungslinien bewerkstelligen lassen, die nicht für rein mineralische Abfallfraktionen ausgelegt sind.

Carbon- oder Textilbeton ist ein Beispiel für eine Baustoffentwicklung, die versucht, den steigenden Ansprüchen an ressourcenschonendem Bauen gerecht zu werden. Lässt sich der Baustahl als übliche Bewehrung substituieren, werden Betonwände deutlich schlanker, da die für die Sicherstellung eines ausreichenden Korrosionsschutzes übliche stärkere Überdeckung mit Beton entfallen kann. Die Stärke der Betonwand kann sich ausschließlich aus den Anforderungen der Tragwerksplanung ableiten. Bis heute gibt es aber keine Aufbereitungsstrategie für diesen Baustoff. Während der Behandlung bzw. in der Abluft aus den Brechanlagen werden gesundheitsgefährdende Stäube vermutet. Gerade dann, wenn diese neue Bewehrung in Form von Fasern eingebracht wird, werden diese organischen Komponenten unwiederbringlich in der RC-Körnung gelangen und damit die bis dato klassische Verwertung dieser Materialien verhindern. Die ressourcenschonende Konstruktion der Bauwerke wird möglicherweise mit einer zukünftig fehlenden Recyclingfähigkeit erkauft. Die Baustoffe würden damit „in Summe“ nicht zur Steigerung der Ressourcenproduktivität beitragen.

Die Frage der Recyclingfähigkeit muss daher schon bei der Entwicklung des Baustoffes gestellt und spätestens mit der Zulassung beantwortet werden. Dies entspricht sowohl dem

Vorsorgeprinzip als auch der Produktverantwortung der Hersteller gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz. Bislang werden Kriterien dieser Art im Zulassungsverfahren von Baustoffen und Produkten nicht berücksichtigt. Die Entsorgungsverantwortung wird damit dem Endverbraucher bzw. der Entsorgungswirtschaft der Zukunft auferlegt.

Informationsbereitstellung über Gebäudesteckbriefe

Ein weiterer Ansatz das recyclinggerechte Bauen zu fördern, ist das Vorhalten von Informationen über die Konstruktion der Gebäude und der eingesetzten Baustoffe in Form von Gebäudesteckbriefen. Die Informationen liegen bei der Konstruktion der Gebäude digital vor. Die Bauwerksdatenmodellierung (building information modeling (BIM)) ist nicht nur eine Methode der vernetzten Planung und Ausführung von Gebäuden und anderen Bauwerken mithilfe von Software. Es ist auch eine Hilfe für die Bewirtschaftung der Gebäude durch die Liegenschaftsverwaltung oder Betreuung der Gebäude (facility management). Werden diese Informationen über die Lebenszeit eines Bauwerkes fortgeführt, können sie für die Konzeption des Rückbaus zur Verfügung gestellt und genutzt werden.

Eine professionelle Betreuung von Gebäuden, die diese Fortschreibung veranlassen könnte, ist jedoch nur bei sehr großen Gebäuden und insbesondere im Nicht-Wohnungsbau üblich. Sie bleibt aber auch dann schwierig. Die Dokumentation der Bauweise (Konstruktionsverbunde) und des Materialbestandes von Gebäuden ist aufgrund der langen Verweilzeit und der großen Vielzahl von Akteuren bei Errichtung und auch Nutzung der Gebäude (Instandhaltung, Sanierung) sehr schwierig. Die neuen Gebäudesteckbriefe bzw. BIM erweisen sich oft als kompliziert aufgebaut, um eine breite Anwendung zu finden. Dennoch sollen Instrumente der Bauwerksdokumentation erarbeitet werden, um zu hinterlegen, womit gebaut wurde – auch mit Blick auf mögliche zukünftige SchadstoffEinstufungen –um zu gegebener Zeit den Rückbau zu erleichtern, der derzeit mangels Dokumentation rein diagnostisch erfolgt.

3.3.7 Zusammenfassung

Die in Kapitel 4 im Detail beschriebenen Hemmnisse und Lösungsansätze werden in Tabelle 2 zusammenfassend dargestellt. Gegliedert ist die Aufstellung nach den in der Verantwortung stehenden Akteuren. Das System der Kreislaufwirtschaft kann nur dann etabliert werden und nachhaltig funktionieren, wenn die Maßnahmen in Kooperation der Akteure entwickelt werden und aufeinander aufbauen. Insbesondere das schlechte Image der RC-Baustoffe, das der heutigen Qualität und Gütesicherung der Produktion nicht gerecht wird, muss zur Steigerung der Akzeptanz umfassend verbessert werden. Bauherren und Baustoffproduzenten müssen die Bereitschaft entwickeln, notwendige Aufbereitungskosten für die Produktion von hochwertigen sekundären Rohstoffen mitzutragen, um primäre Rohstoffe zu ersetzen.

Tabelle 2: Zentrale Lösungsansätze entlang der Akteurskette zur Optimierung des Verwertungsprozesses von Bau- und Abbruchabfällen

Akteure	Lösungsansätze
<p>Bau- und Abbruchunternehmen</p> <p>Einhaltung der Pflichten der Gewerbeabfallverordnung</p>	<ul style="list-style-type: none"> - getrennte Erfassung der Bauabfälle in sortenreinen Fraktionen und vorrangige Zuführung zur Wiederverwendung oder einem Recyclingverfahren - Erfassung von Bauabfällen im Gemisch nur in begründeten Ausnahmefällen

Akteure	Lösungsansätze
	<ul style="list-style-type: none"> - Vernetzung mit Bauschuttrecyclern, um ein gemeinsames Verständnis für recyclingfähige Bauabfälle zu entwickeln
Erweiterung der Ausbildung: Kreislaufwirtschaft Bau	<ul style="list-style-type: none"> - Baustoffkunde, Baustoffrecycling und abfallrechtliche Grundlagen umfassend in die Ausbildung integrieren
Bauschuttzubereiter	
Produktion güteüberwachter RC-Baustoffe für den Tiefbau	<ul style="list-style-type: none"> - Herstellung von gütegesicherten RC-Baustoffen nach den Regelwerken des Straßen- und Erdbaus mit entsprechender Vermarktung
Produktion von RC-Baustoffen für den Hochbau	<ul style="list-style-type: none"> - Vernetzung mit Baustoffproduzenten, um ein gemeinsames Verständnis der erforderlichen Qualitäten für RC-Rohstoffe zu entwickeln
Optimierung der Aufbereitungstechnik	<ul style="list-style-type: none"> - Investition in Aufbereitungstechnik, angepasst an ambitioniertes Aufbereitungsziel
Stoffstrommanagement	<ul style="list-style-type: none"> - getrennte Annahme, Lagerung und Behandlung von Stoffströmen unterschiedlicher Qualität
Baustoffproduzenten	
Entwicklung ressourcenschonender Rezepturen	<ul style="list-style-type: none"> - Forschung und Entwicklung zum Einsatz von RC-Rohstoffen, auch in Zusammenarbeit mit Bauschuttzubereitern
Kennzeichnung ressourcenschonender Baustoffe	<ul style="list-style-type: none"> - Labeling als ressourcenschonender Baustoff, um Kunden zu informieren und einen Produktvergleich zu ermöglichen
Steigerung der Rohstoffeffizienz	<ul style="list-style-type: none"> - Optimierung der Produktionstechnik zur Vermeidung von Verschnittresten, insbesondere beim Endkunden
Architekten und Planer	
Recyclinggerechte Bauweisen fördern	<ul style="list-style-type: none"> - modulare Bauweisen und recyclinggerechte Konstruktionen konsequent umsetzen - Sensibilisierung der Auftraggeber zum Thema „Jedes Bauwerk wird einmal zum Abfall“
Fort- und Weiterbildungen: Kreislaufwirtschaft Bau	<ul style="list-style-type: none"> - Ergänzung der bereits verpflichtend zu absolvierenden Fort- und Weiterbildungen um Angebote zu ressourcenschonenden Baustoffen und Bauweisen, initiiert von Architekten- und Ingenieurkammern in Zusammenarbeit mit Baustoffproduzenten und Berufsverbänden
Erweiterung der Ausbildung: Kreislaufwirtschaft Bau	<ul style="list-style-type: none"> - Recyclinggerechte Konstruktionen, Baustoffkunde, Kreislaufwirtschaft auf dem

Akteure	Lösungsansätze
	<p>Bau und abfallrechtliche Grundlagen in die Curricula aufnehmen</p>
Bauherren/Auftraggeber von Bauleistungen	
Rückbau- und Entsorgungskonzept	<ul style="list-style-type: none"> - Erstellung eine Schadstoffgutachtens und eines Rückbaukonzeptes, das als Bestandteil der Ausschreibung zwingend umzusetzen ist
öffentliche Ausschreibungs- und Vergabeverfahren um Umweltaspekte ergänzen	<ul style="list-style-type: none"> - Vorgabe von Umwelanforderungen, die bei der Ausschreibung zwingend gefordert werden müssen - Gewichtung von ökologischen und ökonomischen Aspekten eines Angebots – Vergabe nicht ausschließlich über den Preis - Einsatz von Baustoffen aus ausschließlich primären Rohstoffquellen muss begründungspflichtig werden - Beauftragung erfolgt ausschließlich an nachweislich fachkundige (zertifizierte) Unternehmen - Wahrnehmung der Vorbildfunktion der öffentlichen Hand
Einhaltung der Pflichten der Gewerbeabfallverordnung	<ul style="list-style-type: none"> - Erstellung der Dokumentation zum Aufkommen und Verbleib der Bau- und Abbruchabfälle
Politik und Vollzugsbehörden	
Produktstatus für RC-Baustoffe	<ul style="list-style-type: none"> - praxisnahe Regelungen, um aufbereitete und qualitätsgesicherte RC- Rohstoffe aus dem Abfallrecht zu entlassen - Vereinheitlichung der Bewertung der Umweltverträglichkeit von klassischen und RC- Rohstoffen
Vollzug der Gewerbeabfallverordnung	<ul style="list-style-type: none"> - einheitlicher Vollzug der GewAbfV sowohl während der Bauphase vor Ort als auch bei der Prüfung der Einhaltung der Getrennthaltungs- und Dokumentationspflichten nach Abschluss des Bauvorhabens - Entwicklung von Handlungshilfen und Leitfäden zur Schulung des Vollzugspersonals - Praxisgerechte und vollzugstaugliche Definition von „technisch nicht möglich“ und „wirtschaftlich nicht zumutbar“ - Aufstockung des Verwaltungspersonals und ggf. Zusammenlegung von Zuständigkeiten im Vollzug, um Personalkapazitäten zu bündeln
Verpflichtung zum „Selektiven Rückbau“	<ul style="list-style-type: none"> - Definition des Begriffes „Selektiver Rückbau“ und verpflichtende Einführung über die Landesbauordnungen

Akteure	Lösungsansätze
Erweiterung der Kriterien für die Baustoffzulassung	<ul style="list-style-type: none"> - Zulassung von Baustoffen nur bei nachgewiesener Recyclingfähigkeit sowie Stärkung der Produktverantwortung des Herstellers
Vorbildfunktion wahrnehmen und Öffentlichkeitsarbeit ausbauen	<ul style="list-style-type: none"> - Förderprogramme und Leuchtturmprojekte zur Einführung von Baustoffen mit RC-Anteil sowie Öffentlichkeitsarbeit zur Steigerung der Akzeptanz - Einführung der Pflicht zur Zertifizierung von öffentlichen Gebäuden auch auf Landesebene (Vorbild BNB)

3.4 Stoffstromanalyse für die Beispielregionen Kurpfalz und Berlin

3.4.1 Methodisches Vorgehen

Die Stoffstromanalyse ist in Anlehnung an [Volk et al. 2018] erstellt. Bis 2030 werden jährliche Materialmengen prognostiziert, die als Bau- und Abbruchabfälle anfallen und in Form von sekundären Rohstoffen dem Wirtschaftskreislauf wieder zur Verfügung stehen. Dafür wird im ersten Schritt der Bestand an Wohn- und Nichtwohngebäuden erhoben, um über die ermittelten Wohn- und Nutzflächen bzw. Gebäudevolumen materialspezifische Stoffflüsse abzuleiten, die dem Gebäudebestand jährlich entnommen werden bzw. durch Zubaumaßnahmen das anthropogene Lager aufstocken. Zusätzlich wird der Tiefbau berücksichtigt, indem diesbezüglich Daten aus der Literatur zu Bestand, Instandhaltung und Neubau auf die betrachteten Regionen umgelegt werden. Dies erfolgt jeweils für zwei Beispielregionen.

3.4.1.1 Betrachtete Beispielregionen

Als Beispielregionen wurden die Kurpfalz sowie die Stadt Berlin ausgewählt, die in Tabelle 3 näher spezifiziert werden. Die Region Kurpfalz stellt die Summe des Rhein-Neckar-Kreises sowie der Stadtkreise Heidelberg und Mannheim dar. Berlin umfasst das Stadtgebiet/Bundesland Berlin. Damit werden zwei räumlich weit voneinander getrennte Regionen betrachtet, die beide eine große Entwicklungsdynamik aufweisen und über Infrastruktur zur Bauabfallverwertung verfügen. Beide Regionen wachsen und ziehen netto Pendler an. Beide Regionen sind verstädtert, wobei der Rhein-Neckar-Kreis in der Kurpfalz keine Stadt, aber einen städtisch geprägten Kreis darstellt.

Tabelle 3: Spezifika der Beispielregionen

	Kurpfalz (Stadt Heidelberg + Stadt Mannheim + Rhein-Neckar-Kreis)	Stadt Berlin
Fläche [Destatis 2016]	1.315,41 km ²	891,12 km ²
Bevölkerungszahl 2018 [Destatis 2018]	1.017.350	3.644.826
Siedlungsstruktur [BBSR 2017]	Kreisfreie Großstadt + ~ + Städtischer Kreis	Kreisfreie Großstadt
Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte [Arbeitsagentur 2018]	459.583	1.510.736

Berufspendler: Einpendler	150.586	333.859
Auspendler [Arbeitsagentur 2019]	98.720	187.147
Wachstum Bevölkerungszahl von 2018 bis 2012	45.101	269.604

Die Verfügbarkeit primärer Rohstoffe für Baumaterialien ist in beiden Regionen unterschiedlich. In der Kurpfalz ist die Versorgung mit Kies für Beton und Splitt für den Straßen- und Wegebau aus der Region heraus möglich. Im Oberrheingraben gibt es Schottervorkommen, in den angrenzten Mittelgebirgen Steinbrüche. Natürliche Gipslagerstätten sind in der Nähe beider Regionen nicht vorhanden. Die der Kurpfalz am nächsten liegenden Gipsvorkommen befinden sich in der Muschelkalk-, Keuper-Schichtstufe und damit nicht sehr weit entfernt nördlich und westlich der Schwäbischen Alb. Von Berlin aus sind es die Lagerstätten des Zechsteins am Harzrand, die entsprechend weiter entfernt sind. Aufgrund der billigen Transporte ist die Nähe zu Produktionsstandorten daher nicht mehr sehr wichtig, auch in der Nähe von Berlin gibt es einen Standort der Gipsindustrie. Ein bedeutender Rohstoff für Gips ist auch REA-Gips, der in der Nähe von Kohlekraftwerken und damit in beiden Regionen verfügbar ist, aber dies in Zukunft immer weniger sein wird. Tone für Ziegel und Quarzsand für Flachglas sind in beiden Regionen verfügbar. Früher war das Rohstoffangebot in den jeweiligen Regionen ein bedeutsamer Faktor. So gab es in der Region Berlin sehr viele Ziegeleien, so dass die alten Gebäude Berlins aus Ziegel errichtet sind, wohingegen heute die Bedeutung der Ziegelproduktion deutlich gesunken ist.

Berlin und sein direktes Umland verfügen über einige große Standorte von Aufbereitern für mineralische Bauabfälle mit hohen Durchsatzleistungen. Dies resultiert nicht zuletzt aus den aufgrund der Baukonjunktur großen Abfallmassenströmen in Verbindung mit in Stadtgebieten typischerweise für derartige Betriebe wenigen geeigneten Standorten. Die Aufbereitung der mineralischen Abfallmassen findet eine vergleichsweise gute Absatzsituation, Splitt aus Steinbrüchen für den Straßen und Wegebau muss über größere Entfernungen antransportiert werden. Dies ist ein Standortvorteil. Problematischer sind die konkurrierenden kostengünstigen Entsorgungslösungen in der Region, die die Erlössituation für die Annahme von Abfallmassen beeinflussen. Da es sich hier in aller Regel um einfache Entsorgungslösungen handelt, die keine Rückführung der Materialien in den Wirtschaftskreislauf ermöglichen, wird hier zunehmend steuernd eingegriffen. Die großen Durchsatzleistungen vieler Berliner Betriebe ermöglichen entsprechende Investitionen in Aufbereitungstechnik, verbunden auch mit der zunehmenden Erschließung neuer Verwertungswege. So wird an einem Standort bundesweit erstmalig die Aufbereitung und optische Sortierung von Mauerziegeln mit dem Ziel der Herstellung von Pflanzsubstraten betrieben. Abscheideanlagen für Leichtbaustoffe bzw. Stör- und Fremdstoffe sind in den Anlagen integriert, dies auch über Nassaufbereitungen. Einige Aufbereiter verfügen zudem über die Zulassung zur Herstellung einer RC-Gesteinskörnung für die Transportbetonindustrie.

Die Region Kurpfalz weist eine andere Konkurrenzsituation zu primären Rohstoffen auf. Für die Aufbereiter ist die Konkurrenz zu den Steinbrüchen als Splittproduzenten entscheidend. Dies führt dazu, dass sich große qualifizierte Aufbereiter in Mannheim (und dem angrenzenden Ludwigshafen) etablieren konnten. In der übrigen Region sind die Aufbereiter kleiner, trotzdem sind einige Betriebe als Hersteller qualifizierter und güteüberwachter Straßenbaustoffe (TL SoB-StB 04) gelistet. Hier dürfte auch das in Baden-Württemberg etablierte QRB-System hilfreich sein, das aufbereitete Massen mit einer Schadstoffbelastung maximal der Zuordnungsklasse Z 1.1 aus dem Abfallregime entlässt.

Die Lage im Oberrheingraben mit seinen Kiesvorkommen und dies in Verbindung mit Transporten per Schiff führt zu Rohstoffpreisen, die eine wettbewerbsfähige Produktion von RC-Gesteinskörnungen für die Betonindustrie bis dato kaum möglich machen. In der Region sind Ablagerungskapazitäten insbesondere über Deponien vorhanden, so dass sich höhere Entsorgungspreise ausgebildet haben. Dies stärkt nicht nur die Erlössituation für die Aufbereiter. Sie machen einen ambitionierten selektiven Rückbau und die Getrennthaltung der unterschiedlichen Materialien auch wirtschaftlich konkurrenzfähig, eine wichtige Grundvoraussetzung für eine Kreislaufführung der anfallenden Abfallmassen.

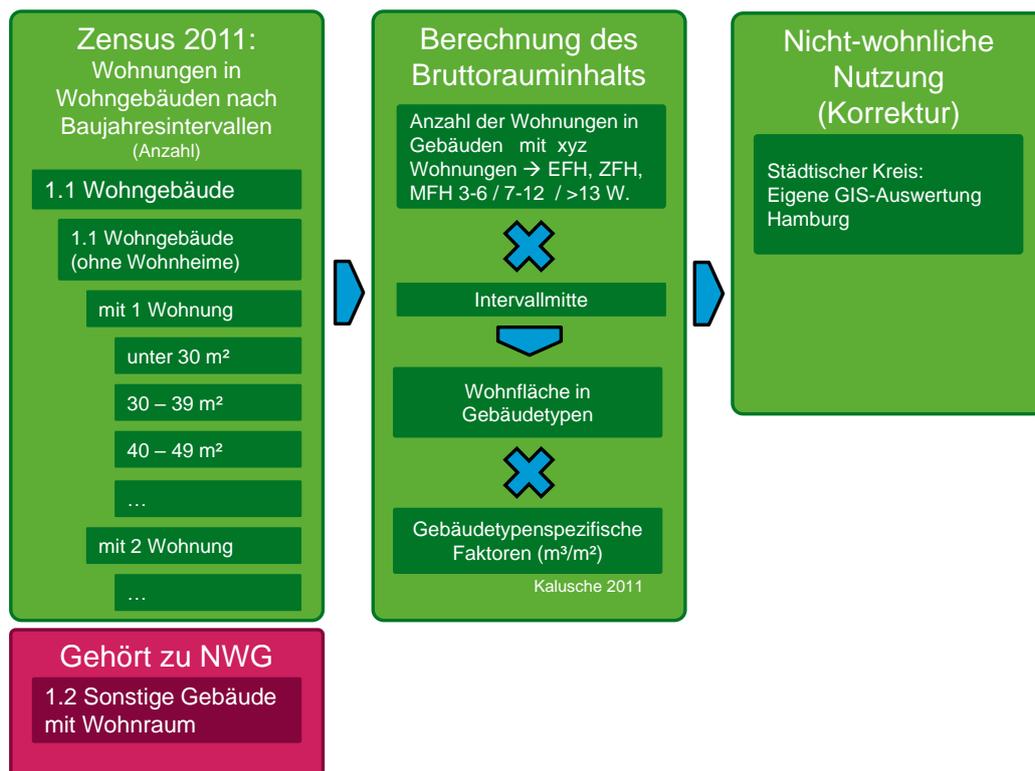
Anlagen zum Gipsrecycling gibt es noch nicht so viele, so dass von beiden Regionen eine gewisse Anfahrt des Altgipses erfolgen muss. Für Flachglas gibt es laut dem Fachverband Glasrecycling heute schon ein flächendeckendes Sammel-, Aufbereitungs- und Verwertungsnetz. In beiden Regionen sitzen zudem Flachglashersteller. Hersteller für Mineralwollgedämmstoffe gibt es in Berlin im Gegensatz zur Kurpfalz nicht.

3.4.1.2 Wohngebäudebestand in Fläche und Volumen

Für die Wohngebäude basiert die Abschätzung des Wohnflächenbestands auf den im [Zensus 2011] erhobenen, kreisscharfen Daten. Dort werden die Anzahl der Wohnungen untergliedert nach Baujahr des Gebäudes, Anzahl der Wohnungen im Gebäude (Gebäudetyp) [UBA 2014] und Wohnflächen (10 m²-Intervalle) der Wohnungen gelistet. Für die vorliegende Stoffstromanalyse wird der 2011 ermittelte Bestand mittels der entsprechenden Wohnungszahlen in den Folgejahren nach Angaben des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg bzw. Berlin-Brandenburg fortgeschrieben. Die über die Multiplikation der jeweiligen Wohnungsanzahl mit der Mitte des zugehörigen Wohnflächenintervalls ermittelten Wohnflächen können über gebäudetypenspezifische Faktoren und Geschosshöhen in den Bruttorauminhalt (BRI) der Gebäude umgerechnet werden (Abbildung 8). In dieser Studie wird nach Ein- und Zweifamilienhäusern und Mehrfamilienhäusern (> 3 Wohnungen) sowie nach Baualterintervallen ausgewertet.

In Wohngebäuden werden Flächen auch für gewerbliche Zwecke genutzt, die über die Zensus Abfrage jedoch nicht erfasst werden. Diese gilt es zu ermitteln, um den Flächenbestand der Wohngebäude nicht zu unterschätzen. Zur Abschätzung wurden in [Volk et al. 2018] die öffentlich zugänglichen Daten des 3D-Gebäudemodells der Stadt Hamburg ausgewertet und mit den aus Zensus für Hamburg abgeleiteten Daten zum Wohngebäudebestand verglichen. Für die resultierende Differenz im BRI wurde entsprechend angenommen, dass es sich dabei um gewerblichen Nutzen in Wohngebäuden handelt. Bezogen auf den BRI der Nichtwohngebäude beträgt dieser Anteil 9,8 %. Auf den BRI der Wohngebäude in der Kurpfalz und Berlin wird dementsprechend ebenso 9,8 % des dort ermittelten BRI an Nichtwohngebäuden aufgeschlagen.

Abbildung 8: Vorgehen zur Ermittlung des Wohngebäudebestands



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

3.4.1.3 Nichtwohngebäudebestand in Fläche und Volumen

Der Bestand von Nichtwohngebäuden ist statistisch nicht erfasst. Um den Bestand näherungsweise zu ermitteln, werden Kennzahlen gebildet, die über regionalspezifische Kenngrößen auf den Bestand unterschiedlicher Gebäudetypen schließen lassen. Die Kennzahlen setzen Angaben zu den jeweiligen Nichtwohngebäudenutzflächen in Beziehung zu sozialversicherungspflichtig Beschäftigten (SVB), Einwohnern, Anzahl Schülern, Studenten, verfügbaren Plätzen in Kindertagesstätten sowie landwirtschaftlichen Nutzflächen, die jeweils bis auf Kreisebene bekannt sind. Basis für die Nichtwohngebäudenutzflächen sind v.a. die gebäudetypenspezifischen Angaben in [Deilmann 2013] zu Gesamtdeutschland und die Auswertung des Hamburger Gebäudemodells (Tabelle 4). Letztere dient als Basis für die Gebäudetypen, deren spezifische Nutzflächen besonders stark von der Siedlungsstruktur abhängen (bspw. Gaststätten und Restaurants, Gebäude für kulturelle Zwecke, etc.), für die die Kennzahlen aus der Stadt Hamburg für die betrachteten städtischen Regionen besser geeignet erscheinen.

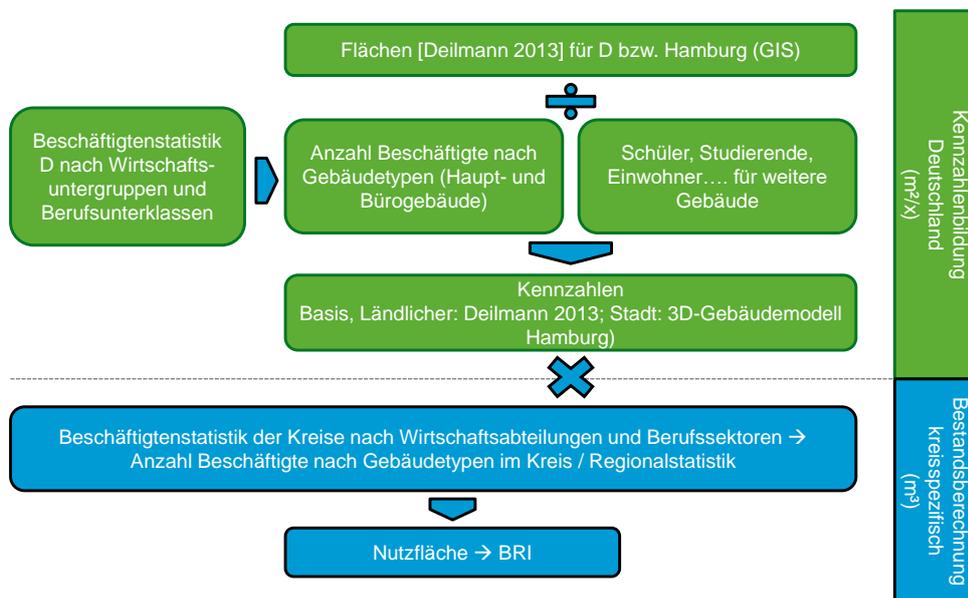
Die Flächen der Gebäude mit einer hohen SVB-Dichte (nichtlandwirtschaftliche Betriebsgebäude, Anstalts- und Bürogebäude, Tabelle 4) werden zur Kennzahlenbildung ins Verhältnis zu den jeweils dort arbeitenden SVB gesetzt, die diesen Gebäuden zugeordnet werden können. Grundlage für die Zuordnung der SVB ist dabei die bundesdeutsche Beschäftigtenstatistik in einer gleichzeitigen Auswertung nach Wirtschaftsabteilungen und Berufsgattungen. So werden bspw. die SVB im Maschinenbau in den ausführenden Berufsgruppen dem Gebäudetyp Fabrik- und Werkstattgebäude und in den Berufsgruppen mit Aufsichts- und Führungsbezug den Büro- und Verwaltungsgebäuden zugeordnet. Die so generierten Kennzahlen aus gesamtdeutschen/Hamburger Daten lassen sich dann auf die SVB der Kreise anwenden, um den regionalen Bestand abzuschätzen. Das Vorgehen ist schematisch in Abbildung 9 skizziert.

Für die weiteren Nichtwohngebäude (Tabelle 4) wird die Anzahl an Schülern, Studenten, Einwohnern etc. zur Kennzahlenbildung und regionalen Bestandsabschätzung herangezogen.

Daraus lassen sich die in Tabelle 4 aufgeführten Flächennachfragen für die betrachteten Regionen ermitteln. Um von der Nachfrage auf den Bestand zu kommen, wird angenommen, dass die Leerstandsquoten in allen Nichtwohngebäudetypen so hoch sind wie diejenigen in Mehrfamilienhäusern der betrachteten Region. Die Aufteilung der Flächen/Volumina auf die verschiedenen Gebäudealter erfolgt, indem die entsprechend relative Aufteilung der Mehrfamilienhäuser (MFH) in der betrachteten Region auf die Nichtwohngebäude übertragen wird.

Abbildung 9: Vorgehen zur Ermittlung des Nichtwohngebäudebestands

1. Kennzahlenbildung über die Division von Nutzflächen und regional verfügbaren Größen;
2. Bestandsberechnung für die Regionen



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Tabelle 4: Betrachtete Nichtwohngebäudetypen (fett), wie diese spezifiziert werden und die dafür für 2018 ermittelten Flächennachfragen für die Kurpfalz bzw. Berlin

	Spezifizierung über	Nutzflächennachfrage 2018 (in 1.000 m ²) Kurpfalz / Berlin
Anstaltsgebäude: Krankenhäuser	SVP; WG-ähnlich	1.053 / 2.223
Büro- u. Verwaltungsgebäude	SVP; WG-ähnlich	4.683 / 13.884
Landwirtschaftliche Betriebsgebäude	LNF	5.477 / 497
Fabrik- und Werkstattgebäude: Fabrikgebäude Werkstattgebäude Gebäude der technischen Erschließung	SVP SVP SVP	6.743 / 11.261
Handels- und Lagergebäude: Lagergebäude Verkaufsgebäude	SVP SVP	5.971 / 15.552
Hotels und Gaststätten: Hotels und Pensionen Gaststätten und Restaurants	SVP; WG-ähnlich SVP; WG-ähnlich	624 / 3.441
Sonstige Nichtwohngebäude: Schulen Schwimmballen Gebäude der verkehrlichen Erschließung Hochschulen und Forschung Kindergarten, KiTas Praxisgebäude Allgemeine Sportbauten Museum, Bibliothek, Ausstellungsgebäude Oper, Theater, Veranstaltungshallen Gebäude für kulturelle Zwecke	Schüler; WG-ähnlich EW EW Studenten; WG-ähnlich Plätze; WG-ähnlich SVP; WG-ähnlich EW SVP SVP SVP	7.884 / 32.705

SVP = sozialversicherungspflichtig Beschäftigte; LNF = landwirtschaftliche Nutzfläche; EW = Einwohner; WG-ähnlich = Wohngebäudeähnlich

3.4.1.4 Prognose Gebäudebestand

Grundlage für die Prognose bilden die zukünftige Flächennachfrage, der aktuelle Bestand und die Veränderung der Leerstandsquote. Der Leerstand berechnet sich über die Differenz aus Bestand und Flächennachfrage zum Bestand. Die Größen sind daher durch folgende Formel miteinander verknüpft:

$$LQ_{t1} - LQ_{t0} = (B_{t1} - N_{t1})/B_{t1} - (B_{t0} - N_{t0})/B_{t0}$$

$$\rightarrow B_{t1} = N_{t1}/(1 - (B_{t0} - N_{t0})/B_{t0} - (LQ_{t1} - LQ_{t0}))$$

mit LQ = Leerstandsquote; B = Bestand; N = Nachfrage; t0 = Zeitpunkt 0; t1 = Zeitpunkt 1

[Hedemann, J.; Meinshausen, I. 2017]

Durch Umstellen der Formel nach B_{t1} zeigt sich, dass der Bestand im nächsten Zeitschritt sich aus dem aktuellen Bestand, der aktuellen und prognostizierten Nachfrage sowie aus der prognostizierten Veränderung der Leerstandsquote bestimmen lassen. Im Folgenden wird darauf eingegangen, wie diese Größen ermittelt werden können.

[Gruhler & Böhm 2011] sowie [Banse & Effenberger 2006] gehen davon aus, dass bis 2020 bei Stagnation des Bestands die Leerstandsquote in Westdeutschland eine jährliche Zunahme von 0,07 % erfährt ($LQ_{t1}-LQ_{t0}$), ab 2020 bis 2030 dann eine von 0,15 %. Eine Stagnation findet in den betrachteten Regionen bis 2030 nicht statt, sondern weiteres Bestandswachstum. Für die Kurpfalz wie für Berlin bis 2020 wird daher von einer jährlichen Abnahme der Leerstandsquote von 0,07 % ausgegangen, ab 2020 bis 2030 für Berlin von einer konstanten Leerstandsquote, da hier eher von einer weiteren Bestandsvergrößerung auszugehen ist. Die zusätzliche Nachfrage kann nicht mehr durch weiter sinkende Leerstandsquoten befriedigt werden.

Die Flächennachfrage (N_{t1}) wird für Wohngebäude in [BBSR 2015] prognostiziert. Diese basiert auf älteren Prognosen zur Bevölkerungsentwicklung, die u. a. aufgrund von Zuwanderungsentwicklungen nicht mehr aktuell sind. Daher wird die Nachfrage korrigiert, indem die aktuelle Bevölkerungsprognose ins Verhältnis zur damals zugrunde gelegten gesetzt wird und daraus ein linearer Trend bezüglich der prognostizierten Zeit in Jahre abgeleitet wird, der dann auf die Nachfrage des [BBSR 2015] aufgeschlagen wird. Für die Kurpfalz wird dabei die Bevölkerungsprognose für ganz Deutschland [Destatis 2015] nach dem Szenario Kontinuität bei stärkerer Zuwanderung verwendet, für Berlin diejenige der Senatsverwaltung [SenStUm 2017]. Zusätzlich wird berücksichtigt, dass der Wohnungsneubau der Nachfrage hinterherhinkt. Daher wird die wohnungsbauwirksame Zunahme der Nachfrage im Jahr 2016 mit einem Drosselungsfaktor von 0,75 belegt, der dann bis 2020 in Schritten auf den Faktor 1 angehoben wird. Der dabei entstehende Baustau wird gleichmäßig auf die wohnungsbauwirksame Zunahme der Nachfrage von 2022 bis 2030 umgelegt. Dies hat zur Folge, dass die Bestandszunahme bis 2020 etwas geringer ausfällt und dafür danach auf höherem Niveau verbleibt. Damit werden die in Tabelle 5 aufgeführten Wohnflächennachfragen für Berlin und die Kurpfalz angesetzt.

Tabelle 5: Angesetzte zukünftige Wohnflächennachfrage für Wohngebäude in der Kurpfalz und in Berlin

Angesetzte Wohnflächennachfrage in 1.000 m ²	2018	2020	2025	2030
Kurpfalz EFH/ZFH	21.838	22.342	23.685	24.878
Kurpfalz MFH	21.365	21.640	22.192	22.450
Berlin EFH/ZFH	23.364	24.422	27.271	29.867
Berlin MFH	111.351	113.264	117.706	120.578

Für Nichtwohngebäude wird die Veränderung der Flächennachfrage für das Basisjahr 2016 über die Veränderung der regionalen Größen abgebildet: Für alle Gebäudetypen, die über die Anzahl der SVB charakterisiert werden, erfolgt eine Verrechnung der zwischen 2015 und 2016 auftretenden Veränderung der Beschäftigten, die auf die verschiedenen Gebäudetypen wie im Bestand aufgeteilt werden, mit den jeweils für die Bestandsermittlung hergeleiteten Kennzahlen. Damit ergeben sich jährliche Nachfragezuwächse als Basis. Für die weitere Prognose wird davon ausgegangen, dass die Bestandsentwicklung nicht von der Entwicklung der SVB abhängt, weil die Kennzahlen durch weiter fortschreitende Automatisierung und weitere strukturelle Veränderungen keine Konstanten darstellen. Daher wird zur Prognose der bauwirksamen Nachfrage dieser Gebäudetypen auf Prognosen zum gemittelten Bauvolumen in Mrd. Euro im sonstigen Neubau zugegriffen (Mittelwert aus oberer und unterer Variante) [BBS 2016]. Daraus

wird ein jährlicher Steigungsfaktor des Zubaus für die jeweiligen Zeitintervalle bis 2030 berechnet, der jeweils auf den Nachfragezuwachs vom vergangenen Jahr aufgeschlagen wird, angefangen bei dem für das Basisjahr 2016 über die Veränderung der SVB errechneten Nachfragezuwachs (Tabelle 7). Damit wird sichergestellt, dass trotz tendenziell eher stagnierender SVB der Nichtwohngebäudebestand mit steigender Wirtschaftsleistung weiter zunimmt. Hiernach wird die in Tabelle 7 angegebene prozentuale Entwicklung der Nachfrage für die Nichtwohngebäude mit SVP-Bezug prognostiziert.

Für die Gebäudetypen, die nicht über Kennzahlen mit Bezug zu SVB abgebildet werden, wird hingegen für alle einheitlich die relative Veränderung der Einwohner [UBA 2014] im jeweils prognostizierten Jahr im Vergleich zum Vorjahr direkt auf die Flächennachfrage übertragen. Die Veränderung der Nachfrage nach diesen Gebäudetypen hängt von der Bevölkerungsentwicklung ab, die entsprechend den neuen Trends von [SenStUm 2017] für Berlin bzw. [Destatis 2015] für die Kurpfalz aktualisiert wurde, so dass von den in Tabelle 6 aufgeführten Bevölkerungszahlen ausgegangen wird.

Das gesamte Vorgehen ist schematisch in Tabelle 12 skizziert.

Tabelle 6: Angesetzte Bevölkerungsentwicklung in der Kurpfalz und in Berlin

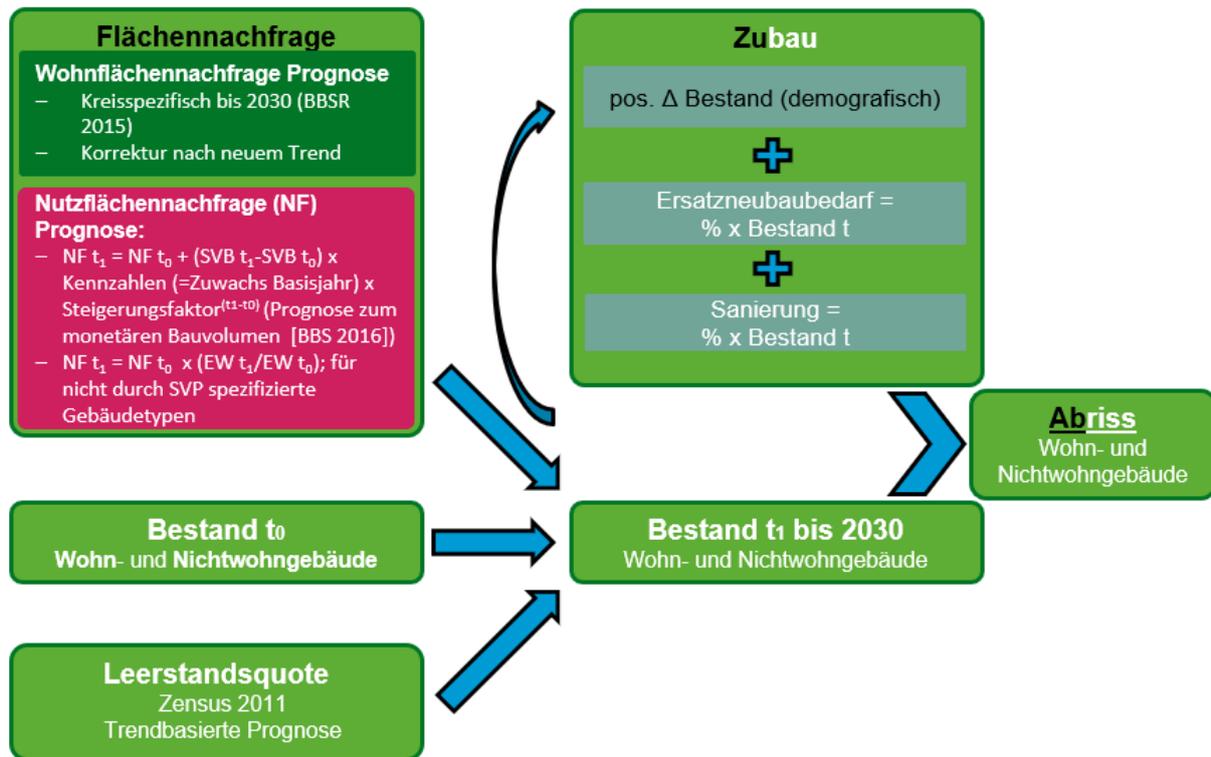
Angesetzte Bevölkerungsprognose	2018	2020	2025	2030
Kurpfalz	1.011.628	1.017.978	1.028.802	1.031.716
Berlin	3.720.000	3.750.000	3.800.000	3.825.000

Tabelle 7: Ableitung der Nachfrageentwicklung für Nichtwohngebäudetypen in der Kurpfalz und in Berlin, die über SVB spezifiziert werden

	2013	2020	2025	2030
Prognostiziertes Bauvolumen Mittelwert (Mio. €) nach (BBS 2016)	31,29	33,87	34,90	35,60
Daraus abgeleiteter jährlicher Steigerungsfaktor des Nachfragezuwachses, ausgehend vom Zuwachs im Basisjahr, jeweils aufgeschlagen auf den dadurch vergrößerten Zuwachs des vergangenen Jahres → für Gebäude mit SVB-Bezug angesetzt	1,01 = $(33,87/31,29)^{1/8}$ (für 2013-2020)	1,006 (2020-2024)	1,004 (2025-2029)	
= Prozentuale Nachfrageentwicklung für Gebäude mit SVB-Bezug Kurpfalz; 100 % = 2018; oberste Zahl: Stadt Heidelberg, mittlere Zahl: Stadt Mannheim, untere Zahl: Rhein-Neckar-Kreis		1,014 1,021 1,011	1,050 1,075 1,038	1,087 1,131 1,067
= Prozentuale Nachfrageentwicklung für Gebäude mit SVB-Bezug Berlin; 100 % = 2018		1,015	1,055	1,095

SVP = sozialversicherungspflichtig Beschäftigte

Abbildung 10: Vorgehen zur Prognose des Gebäudebestands und der In- und Outputs aus dem Gebäudelager



EW = Einwohner; SVB = sozialversicherungspflichtig Beschäftigte; t0 = Ursprungsjahr; t1 = Prognosejahr

Quelle: eigene Darstellung, ifeu

3.4.1.5 Ersatzneubaubedarf und Sanierung

Positive Veränderungen im Gebäudebestand implizieren einen Zubau an Fläche und BRI, negative einen Abriss. Hierzu addiert werden müssen Baumaßnahmen im Bestand, die ebenso mit Stoffströmen verbunden sind.

Ersatzneubautätigkeiten umfassen den kompletten Abriss und Wiederaufbau von Gebäuden mit dem damit verbundenen Bedarf an Baustoffen sowie von Bauabfällen. Entsprechend [BBSR 2015] wird davon ausgegangen, dass jährlich 0,2 % des jeweiligen Bestands der Ein- und Zweifamilienhäuser und 0,3 % der Mehrfamilienhäuser einem Ersatzneubau unterliegen. Bei den Nichtwohngebäuden sind etwas höhere Werte angesetzt, die sich über den bundesdeutschen Netzflächenzuwachs von 2003 bis 2010 aus [Deilmann 2014] im Verhältnis zum Bestand in diesem Zeitraum errechnen unter der Annahme, dass in diesem Zeitraum kaum Zubau über den Ersatzneubaubedarf hinaus auftrat (Tabelle 8).

Tabelle 8: Angesetzter jährlicher Ersatzneubaubedarf für die verschiedenen Nichtwohngebäudetypen bezogen auf den Bestand

Anstaltsgebäude	Büro- und Verwaltungsgebäude	Landwirtschaftliche Betriebsgebäude	Fabrik- und Werkstattgebäude	Handels- und Lagergebäude	Hotels und Gaststätten	Sonstige Nichtwohngebäude
1,09 %	0,76 %	0,98 %	0,78 %	0,78 %	0,82 %	0,31 %

Eine Sanierung von Wohngebäuden hingegen, in welcher nur ein Teil der im Gebäude verbauten Materialien adressiert wird, findet oft mit dem Generationenwechsel ca. alle 40 Jahre statt, so

dass eine jährliche Sanierungsquote von 2,5 % bezüglich des jeweiligen Bestands angesetzt ist. Für jedes Sanierungsobjekt wird entsprechend [Deilmann 2014] veranschlagt, dass dabei 5,5 % der Materialströme eines Neubaus eingesetzt und 5 % derjenigen eines Abrisses anfallen. Bei Nichtwohngebäuden ist die Sanierungsquote geringer angesetzt und beträgt 2 % für wohngebäudeähnliche Nichtwohngebäude und 0,5 % für die anderen Typen. Für Letztere sind auch die dabei anfallenden Materialströme mit 3 % bezüglich eines Neubaus für den Input und 2,5 % bezüglich eines Abrisses für den Output geringer angesetzt. Um dem Sachverhalt Rechnung zu tragen, dass im Zuge der Sanierung weniger die Wandbaustoffe als der Innenausbau und die Dämmung adressiert werden, wird für die davon v.a. betroffenen Materialien Gips, Flachglas und mineralische Dämmstoffe von einem Bedarf (Inputmasse) ausgegangen, der genauso groß ist wie im Falle eines Neubaus des betroffenen Gebäudes. Im Gegenzug wird davon ausgegangen, dass genauso viel Flachglas anfällt, wie wenn das betroffene Gebäude abgerissen würde. Weiterhin wird angesetzt, dass 75 % des im Gebäude enthaltenen Gipses im Zuge der Sanierung als Output anfallen, ein Teil des Gipses bspw. in Putzen bleibt hingegen im Gebäude. Für mineralische Dämmstoffe wird bis 2030 von keinem Output ausgegangen, weil diese bis dahin eher noch zusätzlich verbaut als rückgebaut werden dürften.

3.4.1.6 Gebäude: Von Fläche und Volumen zu Materialmassen

In [Volk et al. 2018] wurden die Materialmassen, die in verschiedenen Gebäudetypen verschiedenen Baualters pro Kubikmeter BRI verbaut sind, anhand von Gebäudesteckbriefen bestimmt. Auf diese wird hier zurückgegriffen, um die ermittelten Wohn- und Nutzflächen bzw. BRI des Bestands bzw. des In- und Outputs aus dem Bestand in Materialmassen umzurechnen. Grundlage für die Steckbriefe sind für Beton und die Mauerwerksbaustoffe die Bautätigkeitsstatistik nach vorwiegend verwendetem Baustoff, der Anteil der Konstruktionsgrundfläche und der Anteil der tragenden Konstruktion. Weiterhin gehen hier ein die Gebäudesteckbriefe des [IÖR 2018], untersuchte Referenzgebäude sowie Korrekturen bezüglich der Größe der Gebäude in verschiedenen Baualtersklassen.

Bei den eingesetzten Baustoffen ergeben sich regionale Unterschiede. Da sich die o.g. Gebäudesteckbriefe auf Baden-Württemberg beziehen, werden in dieser Studie zusätzlich die Gebäudesteckbriefe des [IÖR 2018] herangezogen, um den Betonanteil an der Summe aus Beton und Mauerwerk für die verschiedenen Gebäudetypen verschiedenen Baualters zu ermitteln und auf die Summe aus Beton, Mauerwerk und Leichtbaustoffe der Steckbriefe aus [Volk et al. 2018] anzuwenden und so die Betonmenge zu korrigieren. Insbesondere für Ost-Berlin wird so auch für die Mehrfamilienhäuser (MFH), die zwischen 1949 und 1990 errichtet wurden, der andere Betonanteil für diese Gebäudetypen in der damaligen DDR berücksichtigt. Dafür wird abgeschätzt, wie viel der aktuellen Wohnfläche Berlins in Wohngebäuden mit 3 oder mehr Wohnungen auf die ehemaligen Bezirke Ost-Berlins entfällt. Es handelt sich demnach um knapp 41 % der MFH im Bestand. Folglich wird angenommen, dass die zwischen 1949 und 1990 in Berlin gebauten MFH ebenso zu knapp 41 % in Ost-Berlin errichtet wurden, für die dann der jeweilige Steckbrief Ost aus [IÖR 2018] bezüglich des Betonanteils herangezogen wird. Damit ergeben sich die in Tabelle 9 aufgeführten Betonanteile in den Bestandsgebäuden und Neubauten in der Kurpfalz und in Berlin. Für die Bestandsgebäude handelt es sich dabei um ein gewichtetes Mittel aus den verschiedenen Baualtersklassen im Bestand.

Tabelle 9: Angesetzter Betonanteil an Summe der Wandbaustoffe (Beton, Mauerwerk + Leichtbaustoffe) für die Gebäudetypen im Bestand und im Neubau

	EFH/ ZFH	MFH	Anstal- tsgebä- ude	Büro- und Verwaltun- gsgebäude	Landwirts- chaftliche Betriebsge- bäude	Fabrik- und Werkstatt- gebäude	Handels- und Lagerge- bäude	Hotels und Gast- stätten	Sonstige Nicht- wohn- gebäude
B KP	58 %	59 %	72%	79%	95%	87%	87%	84%	87%
B B	57 %	46 %	72%	79%	95%	87%	87%	86%	87 %
Neu- bau	65 %	59 %	72%	79%	95%	86%	93%	71%	87 %

B KP = Bestand Kurpfalz, B B = Bestand Berlin

Weiterhin werden die Summe der Materialien Mauerwerk ($>2.000 \text{ kg/m}^3$) und Leichtbaustoffe ($<2.000 \text{ kg/m}^3$) aus [Volk et al 2018] auf die hier betrachteten Materialien Mauerziegel, Kalksandstein und mineralische Leichtbaustoffe/Porenbeton aufgeteilt. Als Verteilungsschlüssel werden vereinfachend die Mittelwerte der Jahre 2012 bis 2016 aus der Bautätigkeitsstatistik von Baden-Württemberg bzw. Berlin zum Bruttorauminhalt der jeweils mit diesem überwiegend verwendeten Baustoff errichteten Wohn- und Nichtwohngebäude herangezogen. Der Anteil jeweils dieser Baustoffe an der Summe der drei wird angesetzt, um die Aufteilung vorzunehmen (Tabelle 10) und dies einheitlich für alle Baualtersklassen. Daher wird nicht berücksichtigt, dass die Anteile mit dem Baualter variieren, weil dafür keine regionenspezifischen Daten vorliegen. So wird Kalksandstein erst seit 1950 in größerem Maßstab produziert, wohingegen die Produktion von Mauerziegel über die Zeit recht konstant blieb [Müller et al. 2016]. Porenbeton wird erst seit den 80er Jahren in größerem Maßstab produziert, dafür war davor aber der Einsatz von Leichtbeton größer als heute. Die Aufteilung der Summe aus Mauerziegel, Kalksandstein und mineralischen Leichtbaustoffen auf die jeweiligen Materialien ist daher für ältere Baualtersklassen und damit auch den Bestand unsicher. Kalksandstein und Porenbeton werden eher über-, Mauerziegel unterschätzt.

Tabelle 10: Anteil von Mauerziegel, Kalksandstein und Porenbeton an den Mauerwerksbaustoffen (Summe Mauerwerk und Leichtbaustoffe) im Mittel von 2012 bis 2016

Mauerwerk und Leichtbaustoffe	Anteil Mauerziegel	Anteil Kalksandstein	Anteil Porenbeton
Kurpfalz	58 %	32 %	10 %
Berlin	24 %	70 %	6 %

Summe Mauerwerksbaustoffe aus [Volk et al. 2018], einzelne Mauerwerksbaustoffe entsprechend Bautätigkeitsstatistik nach überwiegend verwendetem Baustoff

Für den Neubau bis 2030 wird zeitlich jeweils derselbe Steckbrief für die jeweils neu zu errichtenden Gebäudetypen verwendet, für den aktuellen Bestand und den Abriss zu verschiedenen Prognosezeitpunkten errechnet sich der gemittelte Steckbrief über die BRI-Verteilung der Baualtersklassen gewichtet aus den jeweiligen Steckbriefen.

Die Stoffflüsse im Zuge einer Sanierung werden mit den jeweiligen Steckbriefen für neu zu errichtend Gebäude (Input) bzw. abzureißende Gebäude (Output) verknüpft. Dies stellt eine Vereinfachung dar, weil damit angenommen wird, dass die durch die Sanierung

hervorgerufenen Stoffflüsse dieselbe Materialzusammensetzung haben wie im Falle des Neubaus oder Abrisses eines Gebäudes. Die Massenströme für die von einer Sanierung v.a. betroffenen Materialien Gips, Flachglas und mineralische Dämmstoffe werden aber wie in Kap. 3.4.1.5 beschrieben angepasst. Trotzdem sind die hier mit der Sanierung ausgewiesenen Materialströme mit Unsicherheiten behaftet, die Mauerwerksbaustoffe werden darin eher überschätzt.

In DyMAS werden Bestand und Flüsse differenziert nach Gebäudetypen als Flächenangaben in Fünfjahresintervallen und die zugehörigen spezifischen Materialcharakteristika für dieselben Zeitpunkte importiert und dann im System zu Materiallagern und -flüssen verrechnet. Zwischen den importierten Zeitpunkten erfolgt eine lineare Interpolation.

3.4.1.7 Bestand und Prognose Tiefbau

Für die Straßen und deren Bauwerke steht mit [UBA 2016] eine Studie zur Verfügung, in welcher über die Nutzung der ALKIS-Datenbank (Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem) und GIS-Auswertung sowie Abfragen bei Kommunen die Flächen des Straßennetzes ermittelt wurde. Diese Flächen wurden dort verknüpft mit Informationen zum Aufbau der Straßen, aus denen Kennzahlen auch in Abhängigkeit von Bau- bzw. Belastungsklassen abgeleitet wurden. Sowohl die Längen (Tabelle 12) als auch die spezifischen Materialmassen gehen als Bestand in DyMAS ein.

In [UBA 2016] wurden weiterhin regionalspezifische Prognosen zu Neu- und Ausbau aufgestellt. Die Erneuerung wurde u. a. aus Erneuerungszyklen für gebundene und ungebundene Schichten abgeschätzt. Diese Zahlen werden hier übernommen. Sowohl die Straßenlängen, für die Instandsetzung bezogen auf die Länge der betroffenen Deckschicht (Tabelle 12), als auch die spezifischen Materialmassen gehen als Neubau und Instandsetzung in DyMAS ein.

Für die weiteren Tiefbausektoren werden Angaben zu gesamtdeutschem Bestand und Erneuerung aus [Bergmann et. al 2015] entnommen (Schienen, Luftverkehrsinfrastruktur, Schifffahrts- bzw. Wasserverkehrsinfrastruktur, Stromnetz bzw. Stromleitungsnetze, Gasnetz bzw. Gasleitungsnetze, Wärmenetz bzw. Wärmeleitungsnetz, Wasser- und Abwasserversorgung). Hier sind Massen und zugehörige Längen- bzw. Flächen- bzw. Stückanzahlen des Bestands sowie Massen für den jährlichen Erneuerungsbedarf nach allen wichtigen Materialien aufgeschlüsselt. Der jährliche Erneuerungsbedarf wird dabei als konstant angesetzt. Aus der angegebenen bzw. aus den Massen zum jährlichen Erneuerungsbedarf ableitbaren Lebensdauer und den Angaben zu Längen bzw. Flächen bzw. Stück des Bestands lässt sich dann auch die zugehörige Länge bzw. Fläche bzw. Stück für den Erneuerungsbedarf ableiten, um spezifische Massen für DyMAS angeben zu können. Die teilweise sehr weit ausdifferenzierten Sektoren werden aggregiert. Für Neubau und Abriss wird auf Trendangaben in [Trapp et al. 2017] bis 2030 zu den verschiedenen Sektoren zurückgegriffen, woraus sich unter der Annahme eines gleichmäßigen Zubaus ein jährlicher, über die Zeit konstant bleibender, Zubau errechnen lässt.

Die gesamtdeutschen Zahlen müssen jetzt noch auf die betrachteten Regionen heruntergebrochen werden mit der Annahme, dass Erneuerungsbedarf und Zubau sich in diesen Regionen ähnlich verhält wie in Deutschland gesamt. Dies erfolgt für den Sektor Schiene auf Basis der Gleislänge in der Kurpfalz bzw. Berlin, die über GIS-Auswertungen unter Zuhilfenahme von OpenStreetMap für diese Regionen bestimmt wird (Tabelle 11), im Verhältnis zur Selbigen in ganz Deutschland. Für die Ermittlung der Gleislänge in Deutschland werden Daten zum Schienennetz ohne S-Bahn Berlin und Hamburg [Schmied & Mottschall 2010] und für die Gleislänge der U-Bahnen und Straßenbahnen [VDV 2017] herangezogen. Für die S-Bahn Berlin und Hamburg wird angenommen, dass das Verhältnis von Gleis- zu Streckenlänge sich jeweils

genauso verhält wie dasjenige für das entsprechende Schienennetz nach der Eisenbahn-Bau und Betriebsordnung (EBO) [Destatis 2017]. Für den Sektor Wasserverkehr werden die ebenso über GIS-Auswertungen ermittelten Längen der Wasserstraßen (Kanäle, Uferbefestigungen) in der Kurpfalz und Berlin ins Verhältnis wiederum zur Länge der Wasserstraßen in ganz Deutschland gesetzt. Für die weiteren Sektoren wird angenommen, dass sie v. a. von der Einwohneranzahl abhängen und daher gut über das Verhältnis der Einwohner in der Kurpfalz bzw. Berlins zur Gesamtbevölkerungszahl in Deutschland abgebildet werden können. Weitere Tiefbausektoren wie die Materialbestände im Bereich Informations- und Kommunikationstechnik und der Straßenbegleitinfrastruktur werden hier ausgeblendet, weil sie kaum einen Beitrag zu den hier betrachteten mineralischen Massen liefern. Die angesetzten Längen zum Bestand, zur Instandsetzung und zum Neubau sind in Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 11: Angesezte Gleis- und Wasserweglänge für die Kurpfalz und Berlin

	Kurpfalz	Berlin	Deutschland
Gleislänge	1.145 km (davon 189 km Tram) ¹	2.531 km (davon 372 km U-Bahn, 422 km Tram) ¹	81.104 km (davon 818 km U-Bahn, 6.269 km Tram) ²
Wasserstraßenlänge	89 km (davon 15 km Kanal) ¹	189 km (davon 87 km Kanal) ¹	7.237 km (4.907 km + 577 km Uferbefestigungen an Binnen- und Seeschiffahrtsstraßen + 1.753 km Kanäle)

Quellen: 1 Eigene GIS-Auswertung auf Basis von OpenStreetMap; 2 [Schmied & Mottschall 2010], [VDV 2017], [Destatis 2017]

Tabelle 12: Angesezte Werte zu Längen bzw. Flächen bzw. Stück des Infrastrukturbestands sowie der Erneuerungs- und Neubautätigkeit in der Kurpfalz und Berlin

Sektor	Betrachtete Güter	Länge bzw. Fläche bzw. Stück Bestand Kurpfalz/Berlin	Länge bzw. Fläche bzw. Stück Erneuerung pro Jahr Kurpfalz/Berlin	Länge bzw. Fläche bzw. Stück Neubau pro Jahr Kurpfalz/Berlin
Straßen ¹	Bundesautobahnen	226/137 km	23/14 km (Deckschicht)	4,4/1,3 km
	Bundesstraßen	286/194 km	29/19 km (Deckschicht)	4,0/1,9 km
	Landstraßen	428/0 km	28/0 km (Deckschicht)	2,1/0 km
	Kreisstraßen	397/0 km	17/0 km (Deckschicht)	2,1/0 km
	Gemeindestraßen	3.338/5.141 km	82/126 km (Deckschicht)	18/25,2 km
	Straßenbauwerke	54/48 km	0,6/0,6 km (Deckschicht)	2,5/2,3 km

Sektor	Betrachtete Güter	Länge bzw. Fläche bzw. Stück Bestand Kurpfalz/Berlin	Länge bzw. Fläche bzw. Stück Erneuerung pro Jahr Kurpfalz/Berlin	Länge bzw. Fläche bzw. Stück Neubau pro Jahr Kurpfalz/Berlin
Schieneninfrastruktur ²	Schienen	540/1.193 km	18/40 km	1,4/3,2 km
	Oberleitungen	740/1.637 km	37/82 km	3,7/8,2 km
	Ingenieursbauwerke	21/47 km	0,3/0,6 km	0,047/0,104 km
Luftverkehrsinfrastruktur ³	Start- und Landebahn	0,06/0,22 km ²	0,003/0,011 km ²	0,0007/0,0023 km ²
	versiegelte Schultern	0,07/0,24 km ²	0,004/0,012 km ²	0,0007/0,0026 km ²
	Vorfelder und Rollbahnen	0,27/0,94 km ²	0,013/0,047 km ²	0,003/0,01 km ²
Schifffahrtsinfrastruktur bzw. Wasserverkehrsinfrastruktur ²	Bauwerke	4/9 Stück	0,07/0,15 Stück	0/0 Stück
	Wasserstraßen	89/189 km	1,5/3,2 km	0/0 km
Stromnetz bzw. Stromleitungsnetze ³	Freileitungen	6.140/21.358 km	154/534 km	28/96 km
	Erdkabel	15.788/54.917 km	395/1.373 km	59/207 km
Gasnetz bzw. Gasleitungsnetze ³	Gas-Fernleitungsnetz	462/1.607 km	19/64 km	0,7/2,5 km
	Regional- und Ortsnetz	5.767/20.062 km	192/669 km	32/112 km
Wärmenetz bzw. Wärmeleitungsnetze ³	Wärmenetz	1.160/4.036 km	58/202 km	18/63 km
Wasserversorgung	Brunnen	1.136/3.952 Stück	18/63 Stück	0/0 Stück
	Trinkwasserleitungen	6.498/22.602 km	65/226 km	36/126 km
	Talsperren	4/13 Stück	0,04/0,13 Stück	0/0 Stück
Abwasserentsorgung ³	Kanalnetz öffentlich	6.885/23.949 km	69/240 km	44/152 km
	Kanalnetz private Grundstücke	11.034/38.381 km	110/384 km	61/213 km
	Schächte im Kanalnetz	164.627/572.647 Stück	3.293/11.453 Stück	1.006/3.500 Stück

Sektor	Betrachtete Güter	Länge bzw. Fläche bzw. Stück Bestand Kurpfalz/Berlin	Länge bzw. Fläche bzw. Stück Erneuerung pro Jahr Kurpfalz/Berlin	Länge bzw. Fläche bzw. Stück Neubau pro Jahr Kurpfalz/Berlin
	Regenentlastungsanlagen	843/2.933 Stück	24/84 Stück	2,6/9,0 Stück

Quellen: 1 [UBA 2016]; 2 [Bergmann et. al 2015] & [Trapp et al. 2017] sowie eigene GIS-Aschätzung der Länge in der Region; 3 [Bergmann et. al 2015] & [Trapp et al. 2017] sowie Abschätzung über Anteil Bevölkerung in der Region

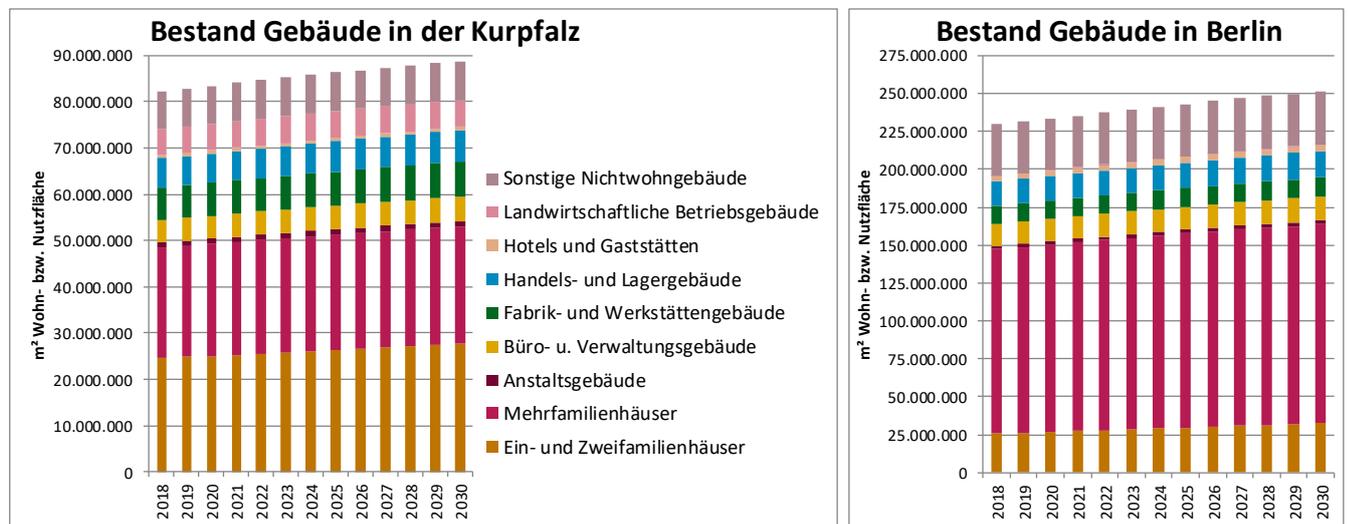
3.4.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden jeweils sowohl für die Region Kurpfalz als auch für die Stadt Berlin dargestellt.

3.4.2.1 Gebäude Kurpfalz und Berlin

Der aktuelle und bis 2030 jährlich prognostizierte Bestand in der Kurpfalz bzw. Berlin in Wohn- bzw. Nutzflächenangaben teilt sich wie in Abbildung 11 in den Sektoren der gestaffelten Balken gezeigt auf die verschiedenen Gebäudetypen auf. Die Wohnfläche in Ein- und Zweifamilienhäusern (EFH/ZFH) fällt in der Kurpfalz ungefähr genauso groß aus wie diejenige in MFH, in Berlin überwiegt die Wohnfläche in MFH deutlich. Der Anteil der Nichtwohngebäude an der Gesamtfläche ist demgegenüber in der Kurpfalz etwas, in Berlin merklich kleiner, wobei der Anteil der Anstaltsgebäude sowie der Hotels und Gaststätten jeweils am kleinsten ausfällt. Sowohl der Bestand an Wohn- als auch an Nichtwohngebäuden steigt weiter, wobei der Anstieg bei Nichtwohngebäuden etwas unsicherer ist, weil hier mit [BBS 2016] der Trend der monetären Bauvolumina für die Prognose der Nachfrage aus einer weiteren Quelle übernommen wird, die auf dem für das Basisjahr ermittelten Zubau entsprechend der Beschäftigtenentwicklung aufsattelt. Für die Wohngebäude liegt der weitere Anstieg in der Korrektur der Wohnflächennachfrage entsprechend neuer Prognosen zur Bevölkerungsprognose begründet. Da es sich bei beiden Regionen um Wachstumsregionen handelt, sind die diesbezüglichen Muster relativ ähnlich. Die Gesamtflächen in Berlin fallen entsprechend der größeren Einwohnerzahl größer aus.

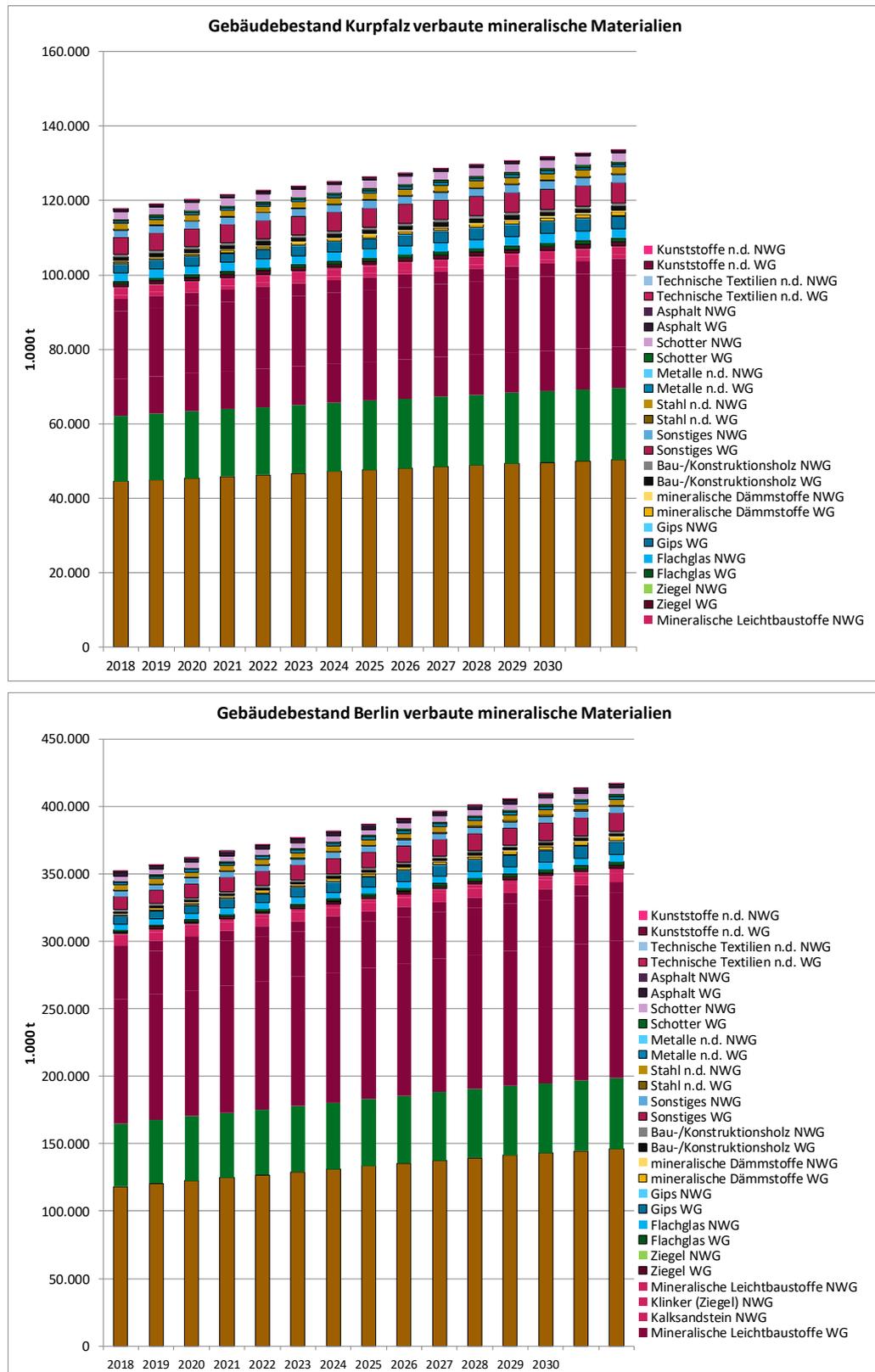
Abbildung 11: Entwicklung der Wohn- bzw. Nutzflächen im Bestand in der Kurpfalz und Berlin



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Nach der Umrechnung der Flächen in Materialmassen und der Darstellung der einzelnen Materialien als Sektoren in gestaffelten Balken zeigt sich, dass die Wohngebäude den deutlich größten Anteil am verbauten Materialbestand stellen (Abbildung 12). Nur Flachglas ist zu einer größeren Menge im Nichtwohngebäudebereich verbaut (Glasfassaden etc.), wohingegen in Wohngebäuden v.a. Beton und die Mauerwerksbaustoffe Kalksandstein, Mauerwerksziegel und mineralische Leichtbaustoffe sowie Dachziegel und Gips verbaut sind. Hinzu kommt insbesondere im Wohngebäudebereich „Sonstiges“, das u. a. die Summe aus Estrich, Putzen, Keramik, Lehen umfasst. Eine Differenzierung des Mauerwerks in Klinker (Mauerziegel), Kalksandstein und mineralische Leichtbaustoffe im Bestand ist nicht belastbar möglich. Die Gesamtmassen in Berlin sind entsprechend der größeren Einwohnerzahl größer.

Abbildung 12: Entwicklung der im Wohn- (WG) und Nichtwohngebäudebestand (NWG) in der Kurpfalz und Berlin verbauten Materialmassen

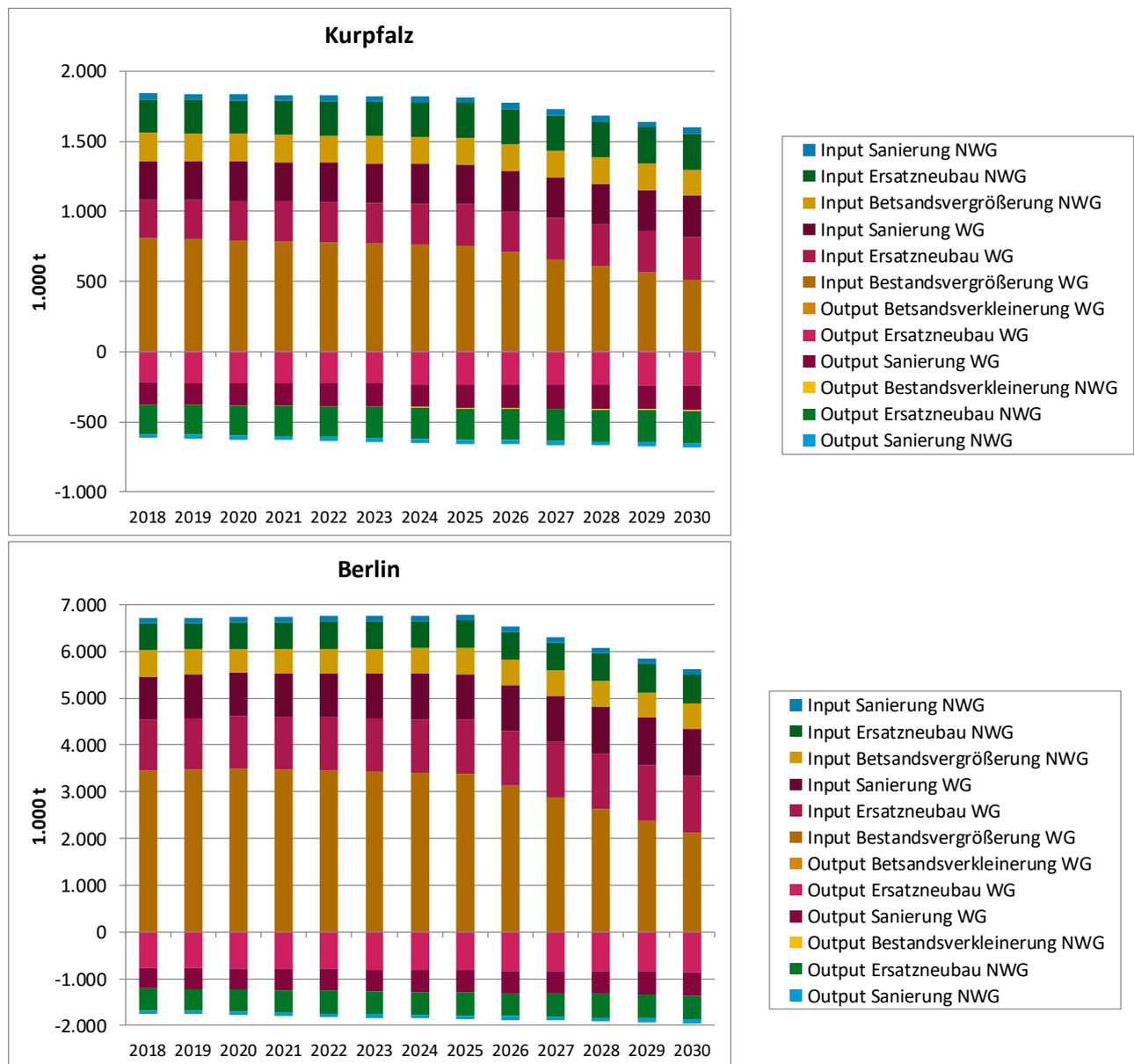


Quelle: eigene Darstellung, ifeu

In- und Outputmassenströme des Bestandes, die in Abbildung 13 nach oben bzw. unten auf der y-Achse aufgetragen sind, werden zum einen durch eine positive bzw. negative Veränderung des

Bestands verursacht (Sektor Bestandsvergrößerung bzw. -verkleinerung im gestaffelten Balken in Abbildung 13). Zum anderen kommt es im Bestand zu Ersatzneubaubedarf, der zu Massenströmen entsprechend eines vollen Abrisses und Neubaus führt. Weiterhin werden im Bestand Sanierungsmaßnahmen durchgeführt, die im Vergleich zu Neubau und Abriss mit deutlich geringeren Massen einhergehen, dafür aber häufiger anfallen als Ersatzneubau. Bei Wohngebäuden werden schlussendlich durch Sanierung fast dieselben Massenströme erzeugt wie durch Ersatzneubau, bei Nichtwohngebäuden ist demgegenüber der Ersatzneubau deutlich bedeutender, weil hier weniger saniert, sondern gleich mehr abgerissen und wieder neu aufgebaut wird. Zu Beginn des Prognosezeitraums wird der größte Inputmassestrom insbesondere in Berlin noch durch die weitere Wohngebäudebestandsvergrößerung verursacht, was sich bis 2030 durch die Verringerung des Nachfrageanstiegs ändert. Das Erhalten des Bestands durch Ersatzneubau und Sanierung wird dann demnach in der Summe in der Kurpfalz langsam wichtiger werden, in Berlin bis 2030 zumindest dasselbe Niveau wie die Bestandsvergrößerung erreichen. Dadurch wird auch die relative Bedeutung der Materialflüsse insbesondere in der Kurpfalz in den Nichtwohngebäudebereich mit der Prognosezeit größer, weil hier der Aufwand für Ersatzneubau durch kürzere Lebenszeiten größer ist und gleichzeitig eine weiterhin unveränderte Bestandsvergrößerung erwartet wird, die aber mit den o.g. Unsicherheiten behaftet ist. Im Output verändert sich über den Prognosezeitraum nicht viel, weil im Wohngebäudebereich gar keine Bestandsverkleinerung und im Nichtwohngebäudebereich nur im Bereich der über die Veränderung der Einwohner abgebildeten Gebäudetypen ohne SVP-Bezug eine sehr geringe Bestandsverkleinerung anfallen könnte. Durch die größere Bedeutung des Ersatzneubaus bei Nichtwohngebäuden stellen diese einen deutlichen Anteil der Output-Materialmassen.

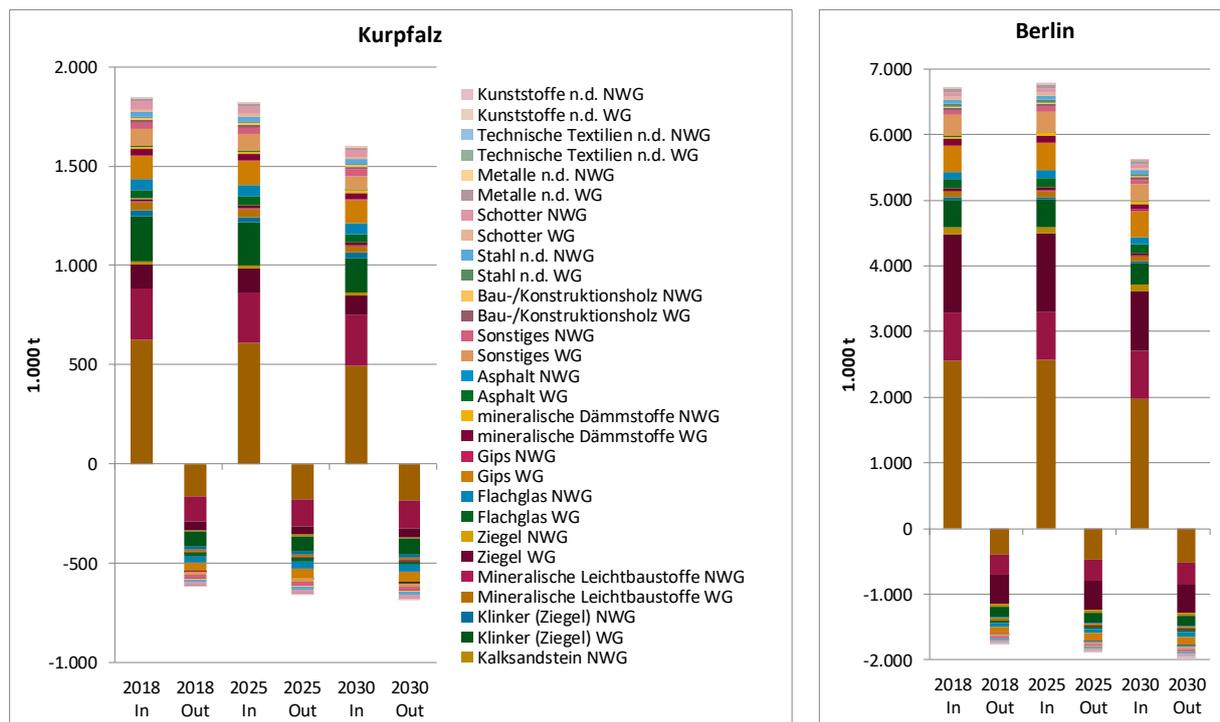
Abbildung 13: Prognostizierte Massenflüsse in (positiv) und aus (negativ) dem Gebäudelager untergliedert nach Bestandsvergrößerung (Zubau) bzw. Bestandsverkleinerung (Netto-Abriss), Ersatzneubau und Sanierungstätigkeiten von Wohn- (WG) und Nichtwohngebäuden (NWG) in der Kurpfalz und in Berlin



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

In Abbildung 14 werden die In- und Outputmassen in den Jahren 2018, 2025 und 2030 in den Sektoren nach Materialien differenziert dargestellt. Insgesamt werden entsprechend insbesondere für den Wohngebäudebereich in der Kurpfalz und Berlin weiterhin viel Beton und Mauerwerkbaustoffe (in der Kurpfalz insbesondere Klinker, in Berlin v.a. Kalksandstein) benötigt, wohingegen demgegenüber noch relativ wenig Beton und Mauerwerksstoffe aus dem Gebäudebestand zurückkommen. Insgesamt sinkt der Bedarf an Materialien für den Wohngebäudebereich aber mit der sinkenden Bestandsvergrößerung. Der Anteil an jeweils Kalksandstein, Mauerziegel (Klinker) und mineralischen Leichtbaustoffen im Output am gesamten Output dieser Mauerwerksbaustoffe ist aufgrund der Nutzung der Bautätigkeitsstatistik der letzten fünf Jahre als Verteilungsschlüssel sehr unsicher.

Abbildung 14: Prognostizierte Materialflüsse in und aus dem Bestand für die Jahre 2018, 2025 und 2030 für Wohn- (WG) und Nichtwohngebäude (NWG) in der Kurpfalz und in Berlin

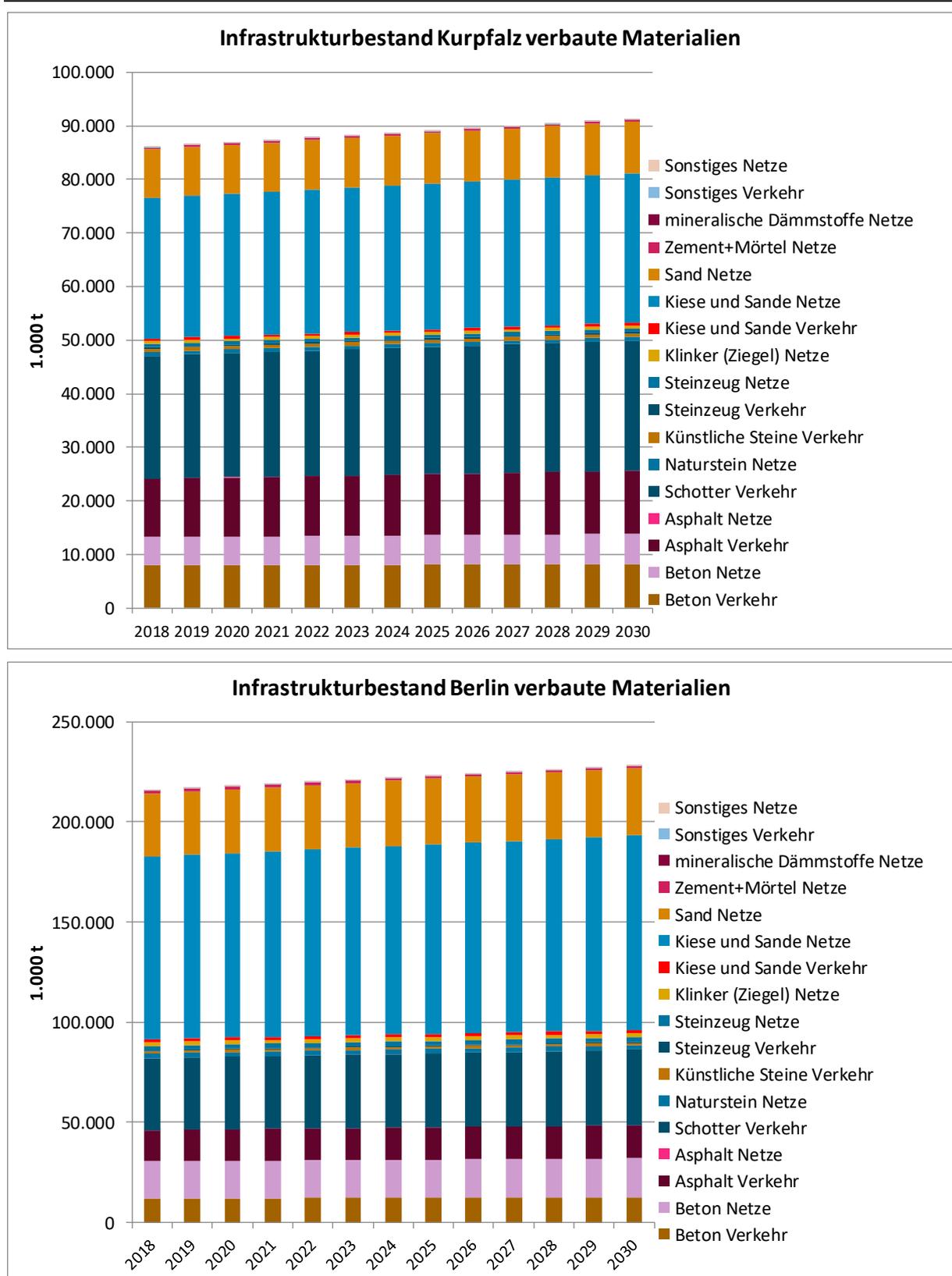


Quelle: eigene Darstellung, ifeu

3.4.2.2 Infrastruktur Kurpfalz und Berlin

In Abbildung 15 ist dargestellt, wie sich der aktuelle und prognostizierte Materialbestand in der Infrastruktur der Kurpfalz und Berlins entwickelt, differenziert nach dem Bereich Verkehr (Straßen, Schienen, Luftverkehrsinfrastruktur, Schifffahrts- bzw. Wasserverkehrsinfrastruktur) und dem Bereich Netze (Stromnetz bzw. Stromleitungsnetze, Gasnetz bzw. Gasleitungsnetze, Wärmenetz bzw. Wärmeleitungsnetz, Wasser- und Abwasserversorgung) sowie den zugehörigen Materialien über gestaffelte Balken. Danach wächst auch das infrastrukturelle Bestandslager noch weiter. Beim Beton in der Kurpfalz ist der Verkehrsbereich im Gegensatz zu Berlin bedeutender als die Netze, Asphalt und Schotter sind fast ausschließlich im Bereich Verkehr zu finden, wohingegen im Bereich Netze v.a. Sande und Kiese verbaut sind. Es zeigt sich, dass der Netzbereich in Berlin im Vergleich zur Kurpfalz eine größere Bedeutung hat, weil die größere Besiedlungsdichte in Berlin mit einer einwohnerspezifisch geringeren Verkehrsfläche einhergeht. Das führt dazu, dass in Berlin relativ weniger Schotter und mehr Kiese und Sande verbaut sind.

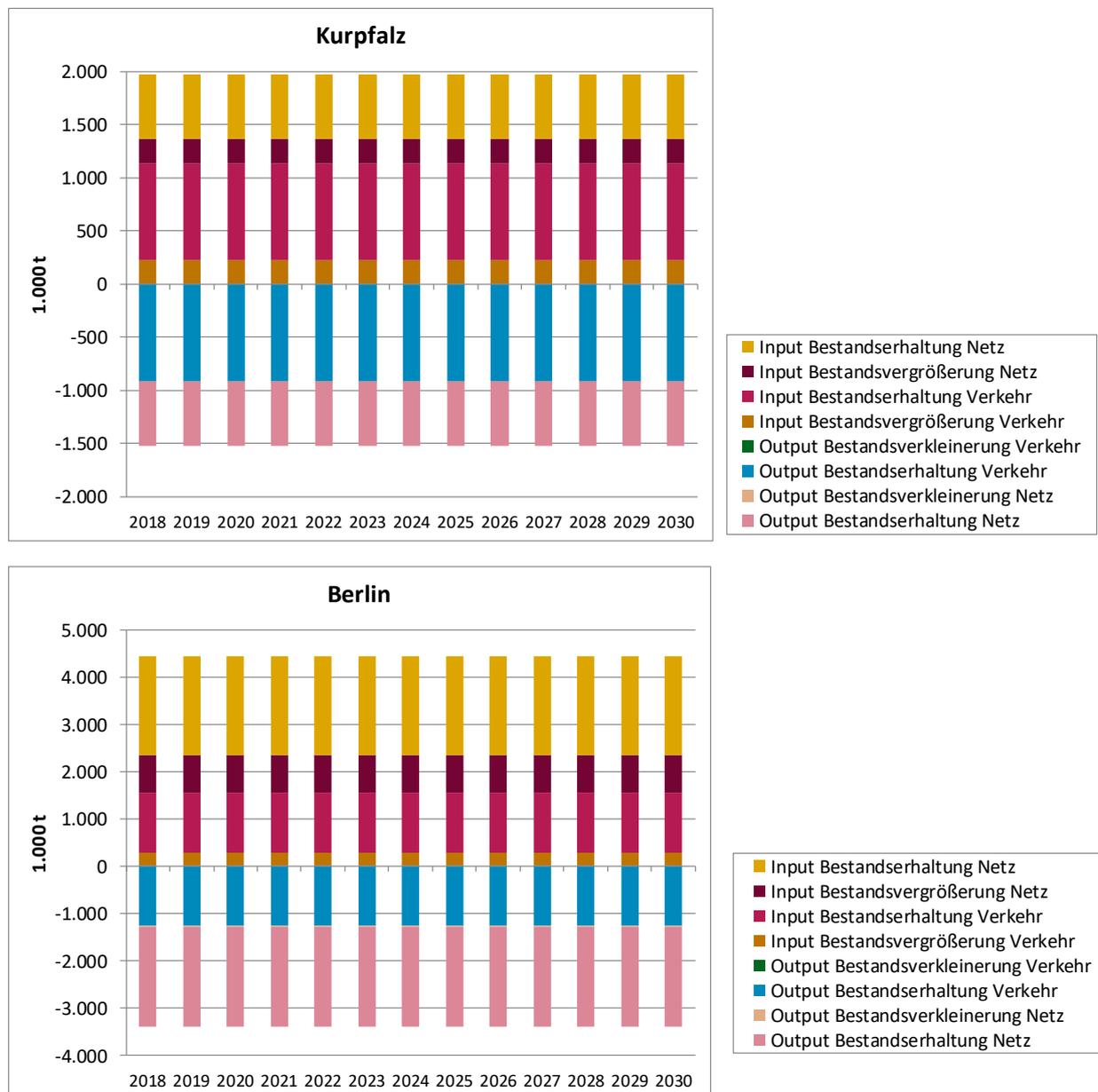
Abbildung 15: Prognostizierter Materialbestand für den Infrastrukturbereich in der Kurpfalz und in Berlin



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

In- und Outputmassenströme aus dem Bestand werden wiederum wie bei Gebäuden durch Zubau bzw. Netto-Abriss im Sinne einer Bestandsvergrößerung/-verkleinerung (Veränderung des Bestands) hervorgerufen oder durch Materialströme, die mit der Bestandserhaltung (inklusive Ersatzneubau) einhergehen. Eine weitere Aufgliederung in Ersatzneubau und Sanierung entfällt hier. Es zeigt sich, dass im Gegensatz zu Gebäuden bereits heute der Großteil der Inputflüsse durch Maßnahmen zur Bestandserhaltung hervorgerufen wird, die weitere Bestandsvergrößerung ist demgegenüber untergeordnet (Abbildung 16). Der Bereich Verkehr ist dabei wie im Bestand in der Kurpfalz etwas bedeutsamer als der Bereich Netze, in Berlin ist der Bereich Netze bedeutender. Dasselbe gilt für die Outputflüsse, wobei diese alleine durch Maßnahmen zur Bestandserhaltung verursacht werden, ein Abriss im Zuge einer Bestandsverkleinerung findet (noch) nicht statt. Aufgrund der gleichmäßigen Aufteilung des Zubaus bis 2030 auf alle Jahre bis dahin und der als konstant angesetzten Aktivitäten zur Bestandserhaltung ändern sich sowohl die jährlichen In- als auch Outputs über den betrachteten Zeitraum nicht.

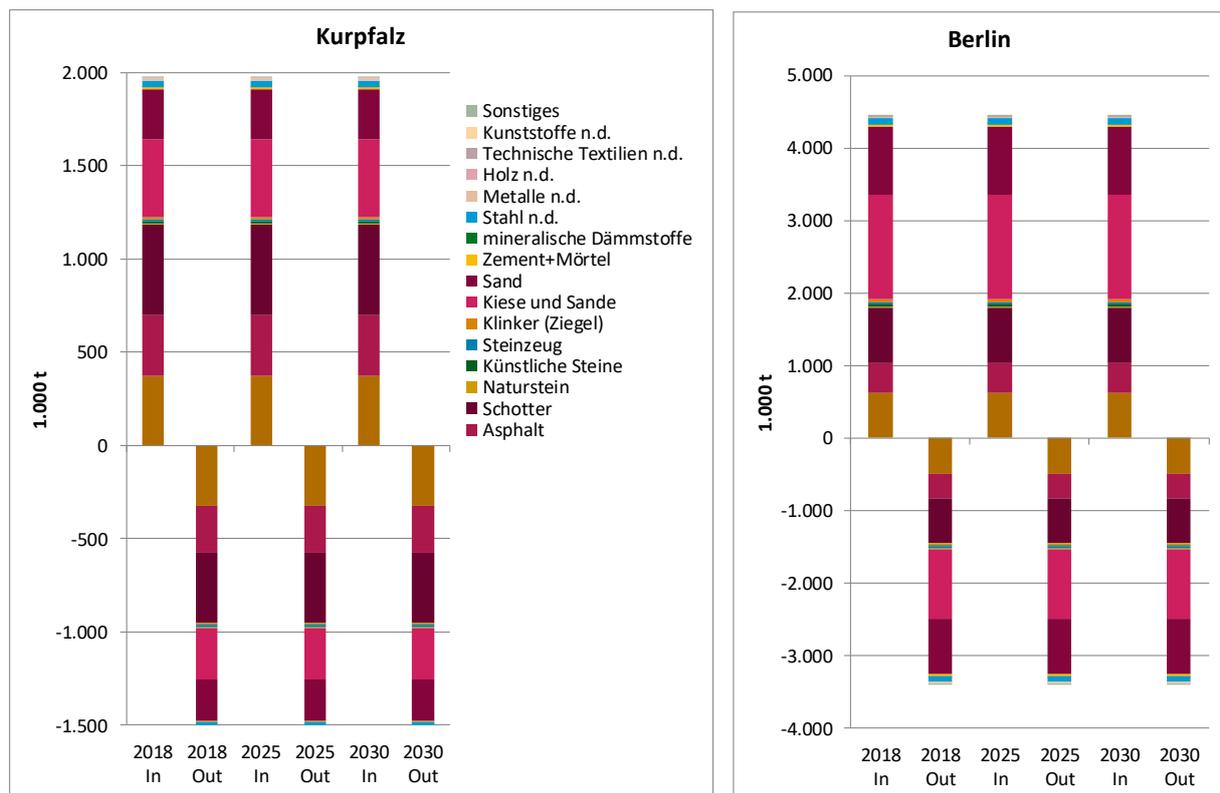
Abbildung 16: Prognostizierte Massenflüsse in (positiv) und aus (negativ) dem Infrastrukturlager untergliedert nach Bestandsvergrößerung (Zubau) bzw. Bestandsverkleinerung (Netto-Abriss) und Bestandserhaltung in den Bereichen Verkehr und Netze in der Kurpfalz und in Berlin



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Dementsprechend setzen sich die In- und Outputflüsse v.a. aus Beton, Asphalt, Schotter sowie Kiesen und Sanden zusammen (Abbildung 17). Der Masseanteil an Beton ist deutlich geringer als bei Gebäuden. Der etwas größeren Anteil der Materialien Beton, Asphalt und Schotter an den In- und Outputflüssen im Vergleich zum Bestand lässt auf eine kürzere Lebenszeit dieser im Sektor Verkehr verbauten Materialien schließen. Die höhere Bedeutung der Netze in Berlin schlägt sich auch in der Materialzusammensetzung der In- und Outputflüsse über den größeren Anteil von Kiesen und Sanden, die für die Netze benötigt werden, nieder.

Abbildung 17: Prognostizierte Materialflüsse in und aus dem Bestand für die Jahre 2018, 2025 und 2030 für die Summe der Infrastruktur in der Kurpfalz und in Berlin

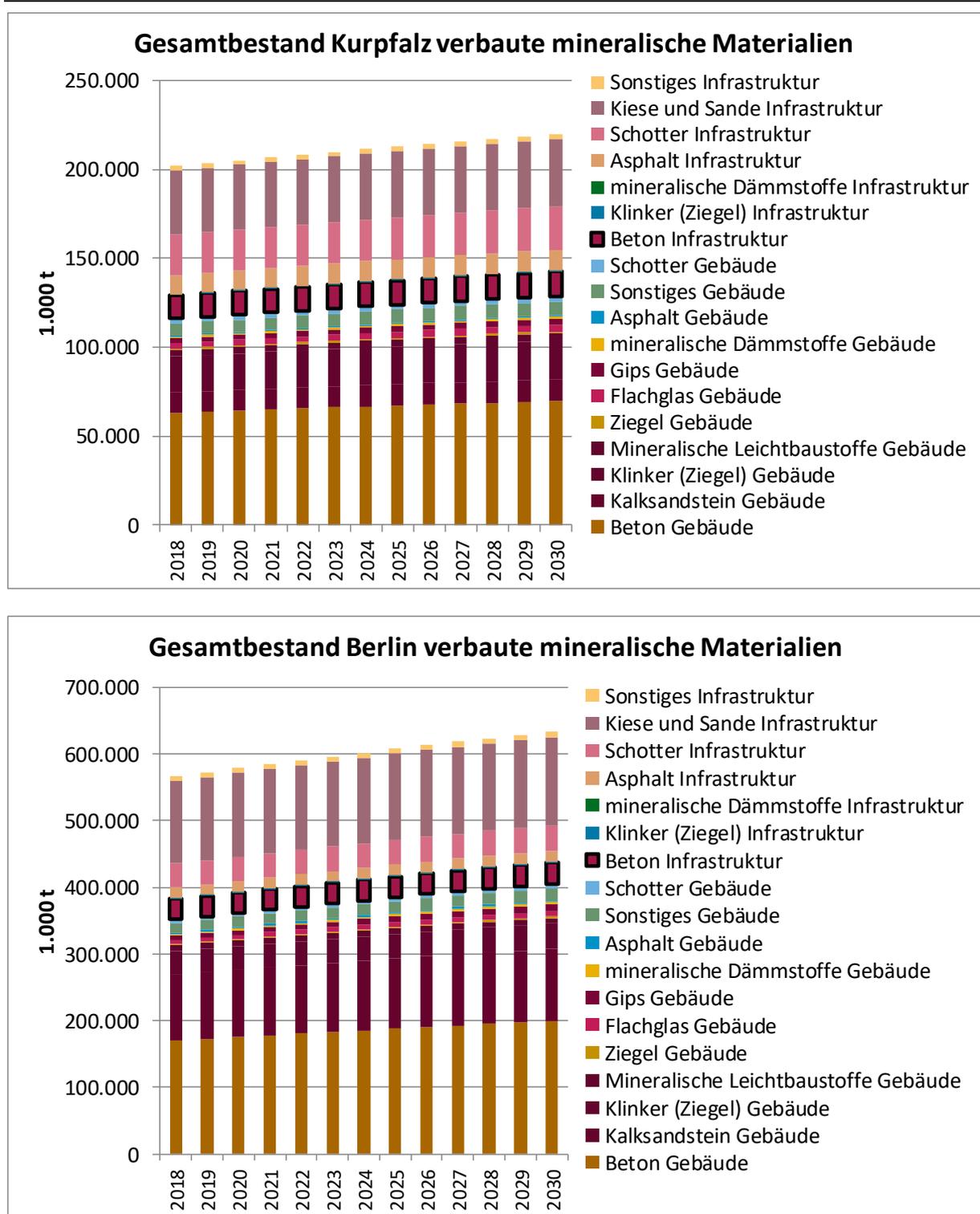


Quelle: eigene Darstellung, ifeu

3.4.2.3 Gesamtbestand Kurpfalz und Berlin

Die Infrastruktur verdoppelt die Materialmassen des Gebäudebestands in der Kurpfalz beinahe, in Berlin kommt relativ etwas weniger Materialmasse durch die Infrastruktur hinzu (Abbildung 18). Relativ gesehen ist die Bedeutung der Infrastruktur in der Kurpfalz dementsprechend etwas größer. Hier zeigt sich auch nochmals deutlich, dass in den Gebäuden v.a. Beton und Mauerwerk verbaut ist, wohingegen über die Infrastruktur relativ große Mengen an Schotter und insbesondere in Berlin Kiesen und Sanden dazukommen. Die Aufteilung der Mauerwerksbaustoffe in Kalksandstein, Klinker (Mauerziegel) und mineralische Leichtbaustoffe ist sehr unsicher und wird daher nicht differenziert dargestellt.

Abbildung 18: Entwicklung der im Gesamtbestand verbauten Materialmassen (Gebäude und Infrastruktur) in der Kurpfalz und in Berlin



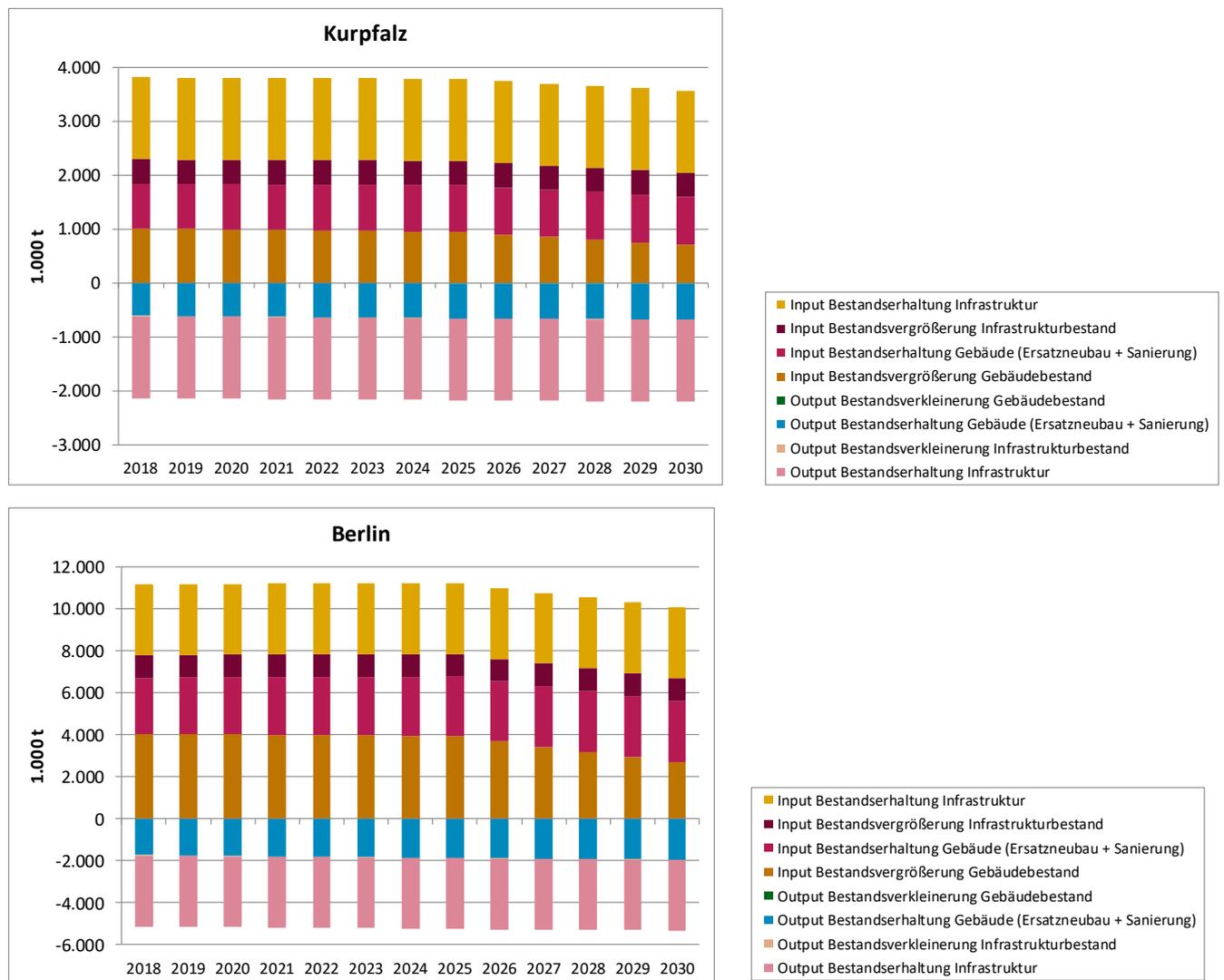
Quelle: eigene Darstellung, ifeu

In Abbildung 19 werden die In- und Outputmassenflüsse aus dem Gesamtbestand differenziert in Bestandsvergrößerung bzw. -verkleinerung durch Zubau bzw. Netto-Abriss (Veränderung des Bestands) und Bestandserhaltung (inklusive Ersatzneubau), jeweils für Gebäude und Infrastruktur. Es zeigt sich, dass in der Kurpfalz auf Inputseite die Bestandserhaltung der Infrastruktur den größten Einzelposten stellt und damit zu größeren Inputmassen führt auch als

die Bestandserhaltung von Gebäuden. In Berlin ist der größte Materialinput-Einzelposten zu Beginn des Prognosezeitraums hingegen die Bestandsvergrößerung im Gebäudebereich, dann überwiegt ebenso die Bestandserhaltung der Infrastruktur, wenn auch nur leicht vor der Bestandserhaltung der Gebäude. Die Bestandsvergrößerung bei Gebäuden ist v.a. zu Beginn des Prognosezeitraums mit deutlich größeren Materialinputmassen verbunden als die Bestandsvergrößerung der Infrastruktur. Mit nachlassender Bestandsvergrößerung in den daneben dargestellten Jahren 2025 und 2030 sinkt erstere Menge aber bei nahezu gleichbleibender Tätigkeit zur Bestandserhaltung von Gebäuden, so dass bis 2030 die Infrastruktur in Summe aus Bestandsvergrößerung und Bestandserhaltung in der Kurpfalz dann noch etwas größere Materialmasseinputs bedingt als die Gebäude, wohingegen in Berlin die Inputmassen in den Gebäudebereich immer noch leicht dominieren. Der Input geht in beiden Regionen mit der geringeren Bestandsvergrößerung im Gebäudebereich auch in Summe etwas zurück.

Beim Output dominiert in beiden Regionen die Bestandserhaltung der Infrastruktur, die wie im Input ohne Betrachtung der Bestandsvergrößerung Berlins mit den größten Materialmassen verbunden ist, von Anfang an.

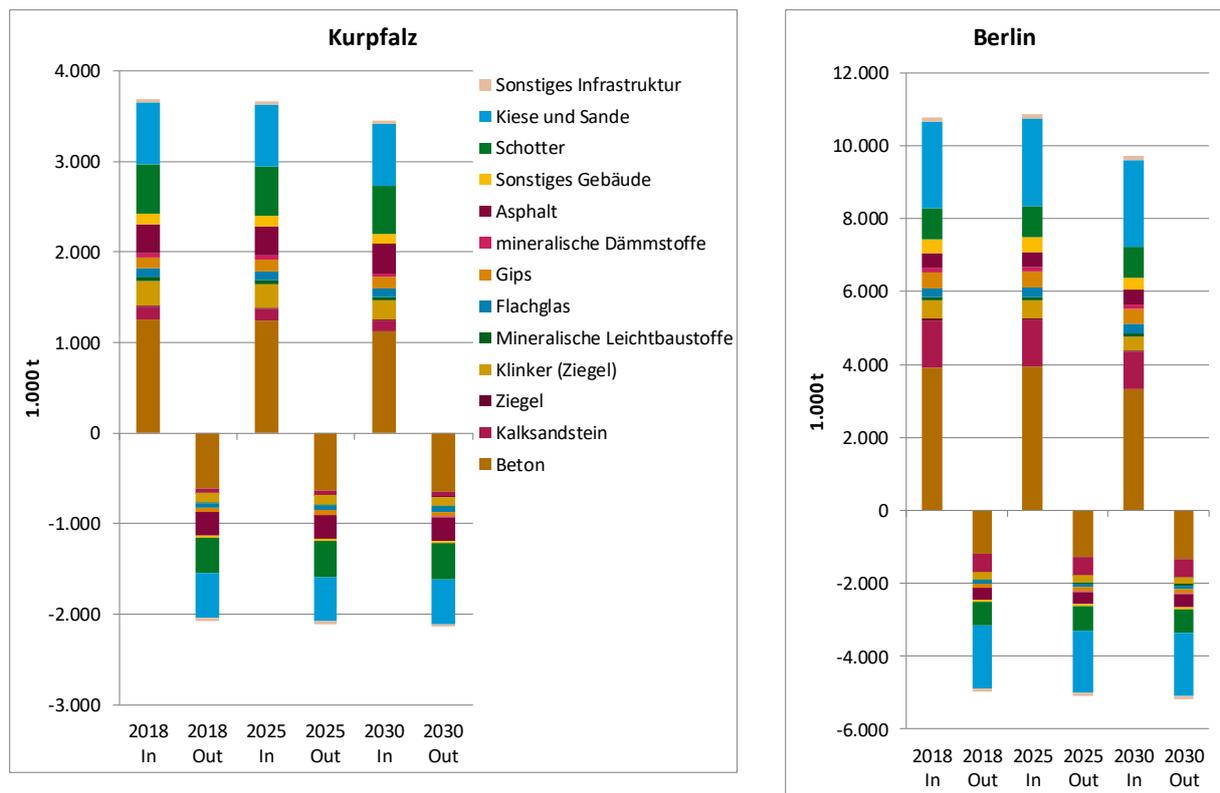
Abbildung 19: Prognostizierte Massenflüsse in (positiv) und aus (negativ) dem Gesamtbestand untergliedert nach Bestandsvergrößerung (Zubau) bzw. Bestandsverkleinerung (Netto-Abriss) und Bestandserhaltung von Gebäuden und Infrastruktur in der Kurpfalz und in Berlin



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Die steigende Bedeutung der Infrastruktur im Input mit der Zeit führt dazu, dass die nachgefragte Beton-, Klinker- und Kalksandsteinmenge mit der Zeit etwas abnimmt, wohingegen der Bedarf an Asphalt, Schotter sowie Kiesen und Sanden konstant bleibt (Abbildung 20). Im Output steigt die Betonmenge mit der Zeit etwas an. Die Aufteilung der Mauerwerksbaustoffe auf Kalksandstein, Klinker (Mauerziegel) und mineralische Leichtbaustoffe im Outputmassenstrom ist sehr unsicher.

Abbildung 20: Prognostizierte Materialflüsse in und aus dem Bestand für die Jahre 2018, 2025 und 2030 für die Summe aus Gebäuden und Infrastruktur in der Kurpfalz und in Berlin



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

3.4.2.4 Output RC-Baustoffe

Hier wird nun die Outputmenge an Recyclingbaustoffen untersucht, wie sie sich bei konventioneller bis hin zu perspektivischer Aufbereitung aus den prognostizierten anfallenden Outputmaterialströmen ergibt. Betrachtet werden die Verwertung von Beton, Kalksandstein, Mauerziegel, Dachziegel, Mineralwolle, Gips und Flachglas. Die jeweiligen Verwertungswege und die dabei erreichbare Aufteilung der jeweiligen Inputmassenströme auf die RC-Produkte können im Anhang A Abbildung 86 entnommen werden.

Ein nicht unerheblicher Anteil der beim Rückbau eines Gebäudes anfallenden mineralischen Bauabfallmassen wird auf den Grundstücken gebrochen und verbleibt dort. Dies ist nicht bei allen Grundstücken möglich. In den Stoffbilanzen ist ein Anteil von 10 % angesetzt. Da diese Massen statistisch nicht erfasst werden, können diese Mengenanteile auch (deutlich) höher liegen. Das Material wird genutzt zur Verfüllung der Kellerräume oder zur Aufschotterung etc. und dient weniger einer gezielten Nutzung, sondern der Einsparung von Entsorgungskosten. Das Substitutionspotential tendiert gegen „0“, nicht selten fallen diese Massen zeitversetzt als Boden-/Bauschuttgemisch und damit aber unter einem AVV-Schlüssel 1705 erneut zur Entsorgung an.

Wie aus der detaillierten Darstellung der Entsorgung der Bau- und Dämmstoffe entnommen werden kann, fallen diese im Status Quo in aller Regel ab Baustelle als Teil eines Gemisches an. Dies bedeutet, dass über die Aufbereitung dieser Massen in aller Regel ebenfalls nur die Verwertung als Teil eines Gemisches möglich ist. Klassisch sind hier die Erdbaustoffe oder auch die Baustoffe zu nennen, die ungebunden im Straßen- und Wegebau verwendet werden. Die Massenflüsse werden aber rechnerisch differenziert nach den einzelnen Bau- und Dämmstoffen vollzogen und dargelegt.

Der zu entsorgende Altbeton wird beim Bauschuttrecycler zu Gesteinskörnung aufbereitet. Mit konventioneller Aufbereitung wird der Altbeton v.a. für den Tiefbau idealerweise zu einem Baustoff für den Straßen- und Wegebau (FSS; STS) verarbeitet. Als Teil des gemischten Bauschutts gelangt auch der Kalksandstein zu etwa 70 % in diesen Verwertungsweg, der kleinere Anteil wird im Bereich Deponiebau und Verfüllung eingesetzt. Auch Mauerziegel fallen als Teil des gemischten Bauschutts an und werden als Erdbaustoff oder auch im Deponiebau und über Verfüllungen verwertet. Im klassischen Wegebau finden diese Materialien schlechte Akzeptanz. Dachziegel fallen in Sanierungsmaßnahmen getrennt zur Entsorgung an. Nahezu frei von Fremdstoffen und Anhaftungen eignen sie sich zur Produktion von Pflanzsubstraten, was auch heute schon überwiegend erfolgt. Fallen Dachziegel als Teil des gemischten Bauschutts zur Entsorgung an, werden auch sie überwiegend zu Erdbaustoffen verarbeitet oder sonstig verwertet. Mineralwolle wird derzeit ausschließlich auf Deponien beseitigt. Für Gips etabliert sich in Deutschland erst schrittweise ein Recycling, das bis dato nur eine geringe Mengenrelevanz hat. Gipsaltmassen werden überwiegend in untergeordnete Verwertungen (Verfüllung) verbraucht oder werden auf Deponien beseitigt. Gips ist aufgrund des „Umweltgefährdungsp“ möglichst nicht Teil des gemischten Bauschutts. Fällt Flachglas im Rahmen von Sanierungen an, wird es auch heute aufbereitet und stofflich zur Herstellung von Behälterglas oder Dämmstoffen verwendet. Im Rahmen von Abbruchmaßnahmen ist es in aller Regel Teil des gemischten Bauschutts, und wird nach dem Brecher in der Aufbereitung vor allem dem Feinmaterial zugeordnet und daher untergeordnet verwertet.

Perspektivisch ist der Umgang von der Umsetzung der Gewerbeabfallverordnung geprägt und dem Grundgedanken einer Circular Economy. Dies bedeutet zunächst vor allem, dass die einzelnen Bau- und Dämmstoffe ab Baustelle möglichst jeweils getrennt zur Entsorgung übergeben werden. Zweites Element einer zukünftigen Strategie ist eine Verwertung der Materialien, die möglichst umfassend die wertgebenden Eigenschaften der einzelnen Materialien nutzt.

Für Altbeton bedeutet dies, dass 40 % zu RC-Gesteinskörnung Typ I für die Betonindustrie aufbereitet werden. Dies steht auch Körnungen aus Kalksandstein und Mauerziegel offen. Die zugehörige RC-Gesteinskörnung Typ II wird jedoch bundesweit erst an einem Standort produziert. Es werden daher geringere Raten als für Altbeton angesetzt. Kalksandstein wird auch zukünftig vor allem zu einem Straßenbaustoff verarbeitet, Mauerziegel analog Dachziegel über eine Weiterverarbeitung auch zu Pflanzsubstraten. Bei Dachziegeln wird eine derartige Verwertung perspektivisch zu 90 % angenommen. Bei Mineralwolle kann perspektivisch 85 % in die Mineralwollproduktion rückgeführt werden (RC-Mineralwolle), Gips kann zu 80 % in die Gipsindustrie rückgeführt werden (RC-Gips). Flachglas kann ambitioniert in Richtung Flachglas (RC-Flachglas) und Behälterglas (RC-Behälterglas) verwertet werden

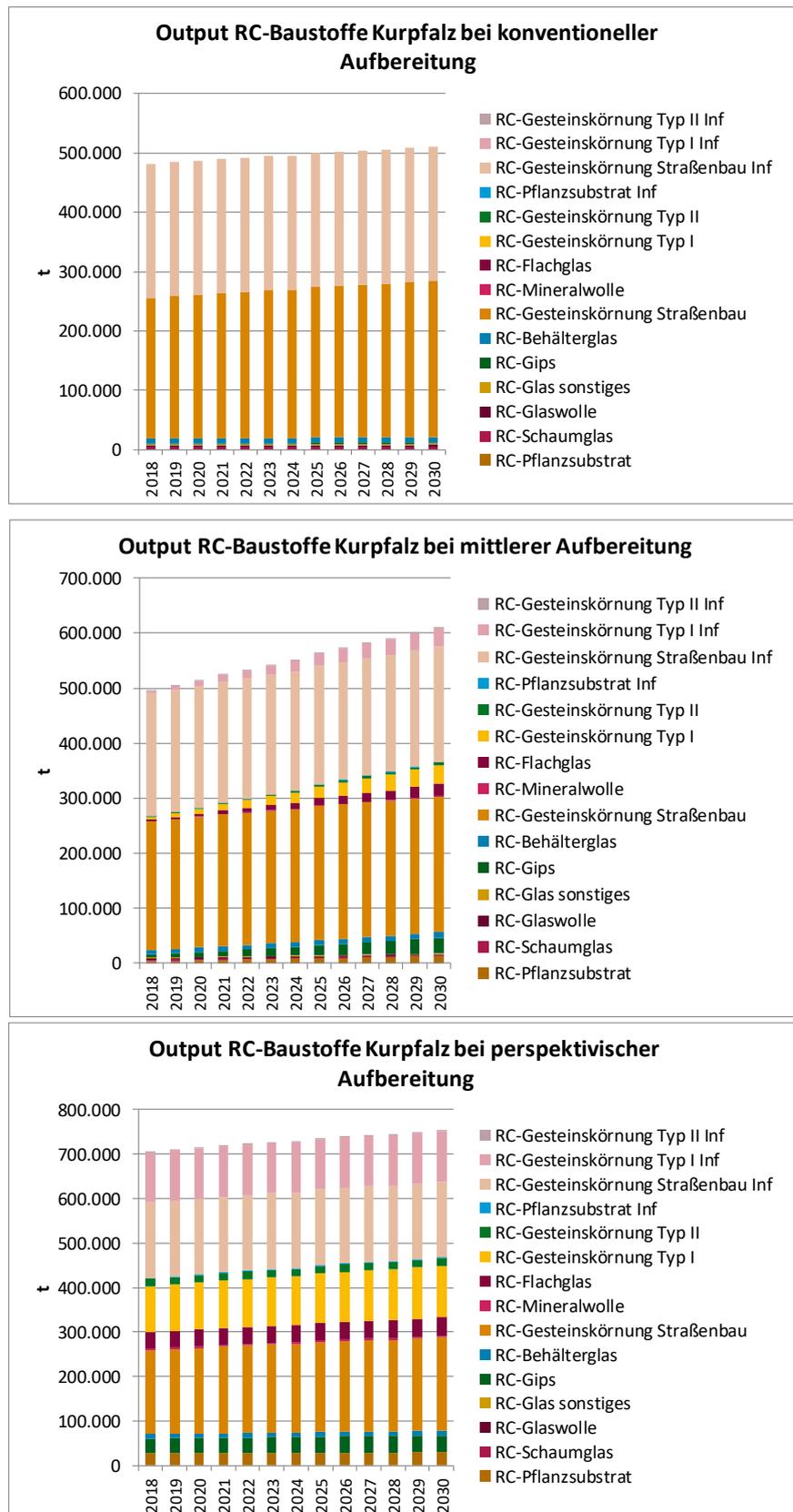
Weiterhin wird eine mittlere Variante betrachtet, bei welcher zu Beginn des Prognosezeitraums noch keine Verwertung des Altbetons in Richtung R-Beton erfolgt, aber bis 2030 der Anteil perspektivischer Verwertung 30 % erreicht, so dass 12 % des Altbetons abzüglich Verluste in eine Gesteinskörnung Richtung R-Beton gehen kann. Die mittlere Variante für die weiteren Baustoffe unterstellt, dass ab jetzt bis 2030 linear zunehmend folgende Anteile an ambitionierter Verwertung abzüglich Verluste erreicht werden: Kalksandstein 20 %, Mauerziegel 20 % (entsprechend 40 % Perspektive, 60 % Status Quo), Dachziegel 80 % (entsprechend 75 % Perspektive, 25 % Status Quo), Mineralwolle 50 % (entsprechend 59 % Perspektive, 41 % Status Quo), Gips 60 % (entsprechend 73 % Perspektive, 27 % Status Quo), Flachglas 50 %.

In Abbildung 21 bzw. Abbildung 22 werden die prognostizierten, im Zuge einer konventionellen, mittleren und perspektivischen Aufbereitung jeweils darstellbaren Outputs an RC-Baustoffen

aus den o. g. Materialien für Berlin bzw. die Kurpfalz dargestellt. Es wird unterschieden nach den verschiedenen Materialien jeweils aus dem Hoch- und Tiefbau. In der Kurpfalz ist die Masse an RC-Baustoffen, die aus dem Hochbau gewonnen werden, gegenüber derjenigen aus dem Tiefbau etwas größer, in Berlin deutlich größer. Es zeigt sich jeweils, dass mit einer Steigerung des Ambitionierungsgrades in der Aufbereitung massenmäßig in Summe mehr RC-Baustoffe erschlossen werden können. Dabei wird nur ein Teil der bislang als RC-Gesteinskörnung im Straßenbau (Sektor RC-Gesteinskörnung Straßenbau) abgesetzten Masse, die bislang den Hauptteil des Outputs darstellt, in Richtung RC-Gesteinskörnung für den Hochbau im R-Beton (Sektor RC-Gesteinskörnung Typ I/II) umgelenkt, weil im Gegenzug Materialien für den Einsatz u. a. im Straßen- und Wegebau erschlossen werden, die bislang über einfache Verfüllmaßnahmen und im Erdbau quasi entsorgt wurden. Zusätzlich können augenscheinlich mit ambitionierter Aufbereitung mehr RC-Flachglas, RC-Gips und RC-Pflanzsubstrat erschlossen werden. Im Anhang A in Tabelle 45 für die Kurpfalz bzw. Tabelle 47 für Berlin wird der gleiche Sachverhalt für die Jahre 2018, 2025 und 2030 in Zahlen ausgedrückt. Dem werden der prognostizierte Output der zugehörigen Materialien aus dem Bestandslager für die Jahre 2018, 2025 und 2030 in Tabelle 44 für die Kurpfalz bzw. Tabelle 46 für Berlin gegenübergestellt. Ebenso wird dort der prognostizierte Input und damit Bedarf an diesen Materialien in denselben Jahren dargestellt.

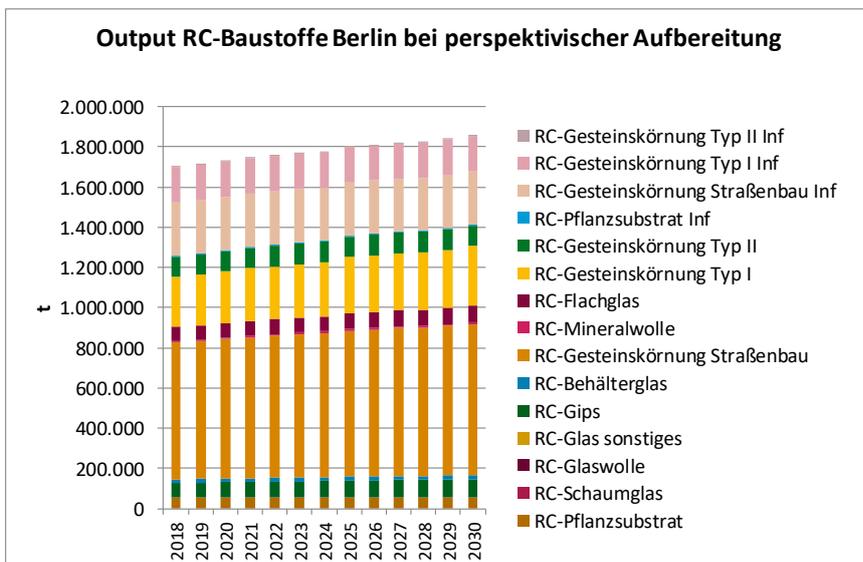
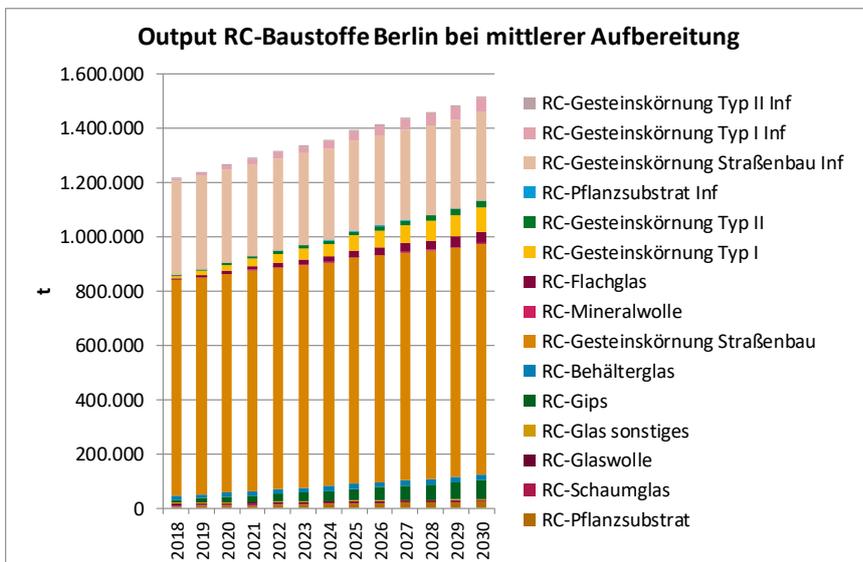
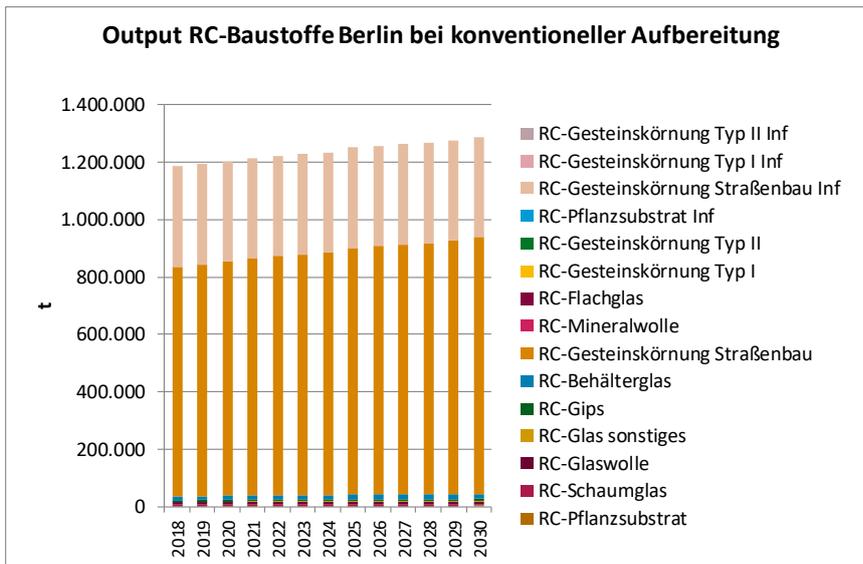
Es wird hier nur die Verwertung der oben aufgeführten Materialien berücksichtigt. Weitere größere Outputströme sind Schotter sowie Kiese und Sande aus der Infrastruktur, die sich bei entsprechender Aufbereitung als RC-Gesteinskörnung im Straßenbau verwerten lassen. Der entsprechende Bedarf im Input wird mit perspektivischer Verwertung auch dadurch gegeben, dass Material aus dem Hochbau als RC-Gesteinskörnung Typ I und II in den Hochbau zurückgeführt wird, so dass im Tiefbau Platz für die dort anfallenden Schotter- sowie Kies- und Sandströme geschaffen wird. Weiterhin wird auch der Altbeton aus dem Tiefbau mit der ambitionierten Verwertung teilweise als RC-Gesteinskörnung wieder in dort neu benötigten Beton überführt, so dass die RC-Gesteinskörnung aus dem Altbeton im Tiefbau nicht mit derjenigen aus dem Schotter sowie Kiesen und Sanden um den Einsatz im Straßen- und Wegebau konkurriert.

Abbildung 21: Output RC-Baustoffe aus dem Gesamtbestand der Kurpfalz (Gebäude und Infrastruktur (Inf)) mit konventioneller, mittlerer und perspektivischer Aufbereitung



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Abbildung 22: Output RC-Baustoffe aus dem Gesamtbestand Berlins (Gebäude und Infrastruktur (Inf)) mit konventioneller, mittlerer und perspektivischer Aufbereitung

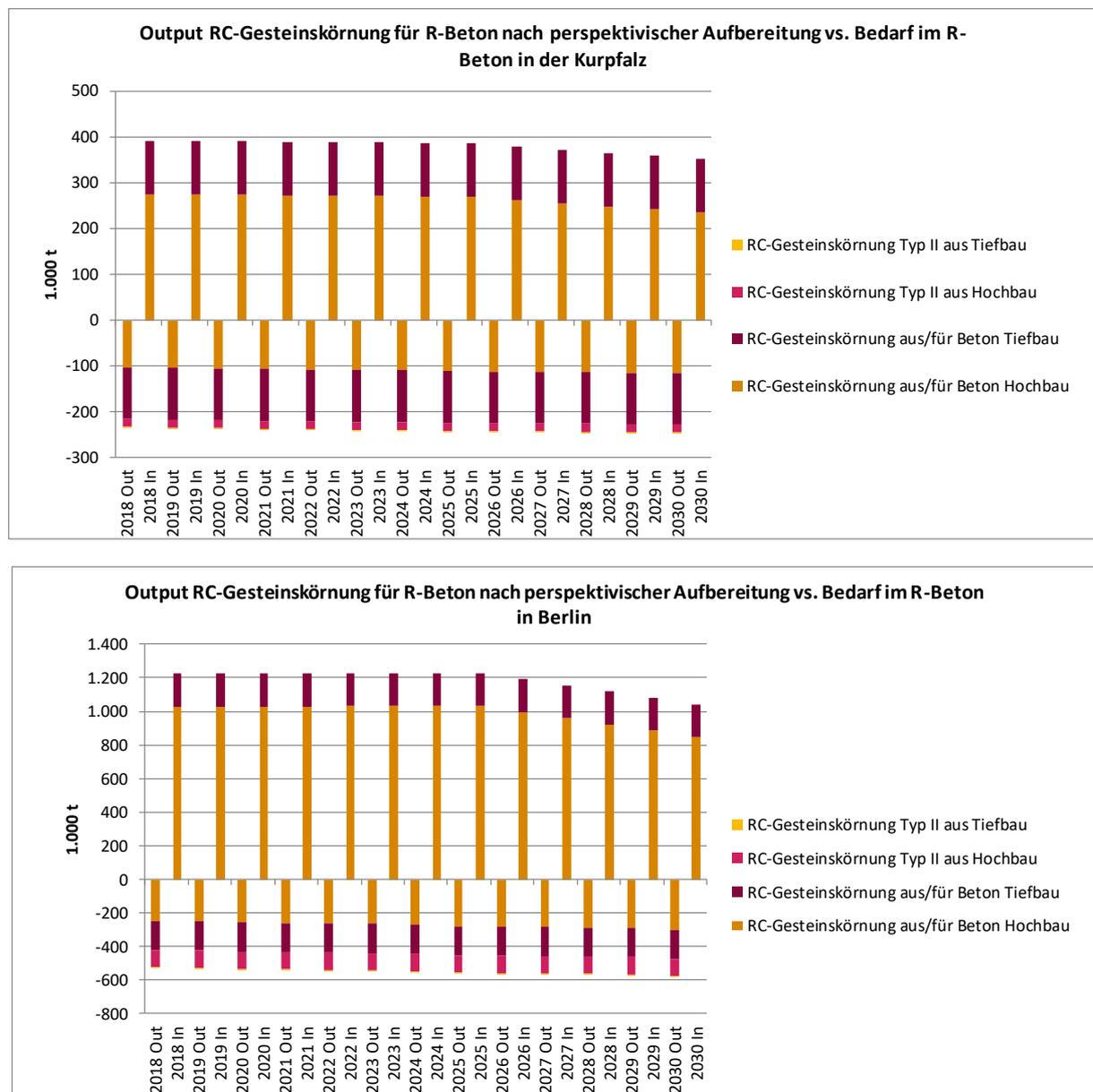


Quelle: eigene Darstellung, ifeu

In folgender Abbildung 23 ist der Output an Gesteinskörnung Typ I (aus Altbeton) und II (aus Mauerwerksbruch: Kalksandstein, Mauerziegel) sowohl aus dem Tief- als auch dem Hochbau, der mit perspektivischer Aufbereitung erzielt werden kann, für die Kurpfalz bzw. Berlin nach unten abgetragen. Nach oben ist der Bedarf an solcher Gesteinskörnung für den in der Kurpfalz bzw. Berlin benötigten Beton dargestellt, wenn dieser Beton komplett als R-Beton dargestellt würde. Im R-Beton können bis zu 45 % der gesamten Gesteinskörnung aus RC-Gesteinskörnung bestehen, hier sind 40 % angesetzt, die nach oben abgetragen sind.

Es zeigt sich, dass die RC-Gesteinskörnung aus dem Altbeton des Hochbaus in der Kurpfalz/Berlin derzeit 38 %/24 % der benötigten RC-Gesteinskörnung für den im Hochbau für diesen Fall neu gebauten R-Beton abdecken könnte, 2030 dann mit sinkender Zubautätigkeit und etwas steigendem Output 49 %/35 % (Output/Input Sektor RC-Gesteinskörnung aus/für Beton Hochbau). Die RC-Gesteinskörnung aus dem Altbeton des Tiefbaus könnte hingegen konstant 97 %/89 % der dort für die Ausführung des neu zu bauenden Betons als R-Beton benötigten RC-Gesteinskörnung abdecken (Output/Input Sektor RC-Gesteinskörnung aus/für Beton Tiefbau). Die gesamte Summe des Outputs an RC-Gesteinskörnung aus Altbeton und Mauerwerksbruch (Typ I und II) aus Hoch- und Tiefbau gegenüber dem gesamten Bedarf für die Ausführung des zu bauenden Betons als R-Beton im Hoch- und Tiefbau beträgt derzeit 60 %/43 % und steigt bis 2030 auf 70 %/55 % an (Summe alle Sektoren Output/Summe alle Sektoren Input). Damit zeigt sich, dass bei ambitionierter Aufbereitung der in den Regionen benötigte Beton in zunehmendem Maße als R-Beton unter Rückgriff auf die in der Region anfallende RC-Gesteinskörnung ausgeführt werden könnte. In Berlin ist das Verhältnis von Angebot zu Nachfrage aufgrund der größeren Nachfrage ungünstiger, hier wird daher auch 2030 trotz perspektivischer Aufbereitung nur gut die Hälfte des neu zu bauenden Betons als R-Beton mit RC-Gesteinskörnung aus der Region ausgeführt werden können. Dies gilt, wenn wie oben beschrieben im R-Beton 40 % der gesamten Gesteinskörnung aus RC-Gesteinskörnung besteht.

Abbildung 23: Output an RC-Gesteinskörnung für den Einsatz im R-Beton (Typ I, Typ II) jeweils aus dem Hoch- und Tiefbau der Kurpfalz und Berlins vs. Bedarf an solcher RC-Gesteinskörnung, um den zugebauten Beton als R-Beton ausführen zu können



Quelle: eigene Darstellung, ifeu

3.4.2.5 Zusammenfassung der Beispielregionen

Der Gebäudebestand in der Kurpfalz verfügt über einen größeren Anteil an Ein-/Zweifamilienhäusern und Nichtwohngebäuden als der Bestand in Berlin. In den Gebäuden sind v.a. Beton und die Mauerwerksbaustoffe Kalksandstein, Mauerwerksziegel (und mineralische Leichtbaustoffe) sowie Dachziegel und Gips verbaut. In der Kurpfalz werden im Mauerwerk in letzter Zeit mehr Ziegel eingesetzt, in Berlin mehr Kalksandstein, so dass auch in den Bestandsmengen dieser Baustoffe Unterschiede zwischen den Regionen zu erwarten sein dürften, die im Rahmen dieser Studie aber nicht sicher abschätzbar sind.

In beiden Regionen findet noch ein Wachstum des Gebäudebestands statt, der sich bis 2030 aber abschwächt, so dass die Maßnahmen zur Bestandserhaltung durch Ersatzneubau und Sanierung mit ihren Materialströmen auch im Materialinput gegenüber der Bestandsvergrößerung immer

wichtiger werden. Dadurch bekommen insbesondere in der Kurpfalz auch die Nichtwohngebäude, die generell einer höheren Ersatzneubautätigkeit als die Wohngebäude unterliegen, eine größere Bedeutung. In Berlin bleibt die Bestandsvergrößerung größer als in der Kurpfalz, aber auch hier sinkt der Materialinput in den Gebäudebereich. Der Materialoutput aus dem Gebäudebereich beschränkt sich bislang auf die Maßnahmen zur Bestandserhaltung, bestehend aus Ersatzneubau und Sanierung, so dass der Input in beiden Regionen den Output deutlich überwiegt, aber mit der Zeit deutlich abgeschwächt.

Der Infrastrukturbestand in der Kurpfalz besteht gegenüber Berlin zu einem größeren Anteil aus dem Bereich Verkehr mit Asphalt und Schotter, in Berlin ist der Bereich der Ver- und Entsorgungsnetze mit den v.a. dort verbauten Sanden und Kiesen etwas stärker vertreten, was sich auch an der Zusammensetzung der In- und Outputflüsse in und aus dem Bestand zeigt. In beiden Regionen überwiegen die Stoffflüsse aus den Maßnahmen zur Bestandserhaltung. Der Betonanteil ist geringer als im Gebäudebereich. In- und Output bleiben über die Zeit relativ konstant.

In Bezug auf den gesamten Materialbestand überwiegen auf Inputseite zu Beginn insbesondere in Berlin die hauptsächlich mit dem Gebäudebereich verbundenen Materialströme Beton und Mauerwerk. Die Infrastruktur mit Schotter, Asphalt, Kiesen und Sanden wird aber aufgrund ihres großen Bedarfs zur Bestandserhaltung und der abnehmenden Gebäudebestandsvergrößerung wichtiger. In der Kurpfalz stellt sie auf Inputseite bis 2030 dann noch etwas größere Materialströme, in Berlin immer noch etwas kleinere als der Gebäudebereich. Auf Outputseite sind die Materialströme aus der Infrastruktur am größten. Mit der Zeit trifft in beiden Regionen daher ein relativ konstanter Outputstrom, der zu einem größeren Anteil aus dem Infrastrukturbereich stammt, auf einen in der Kurpfalz auch etwas stärker abnehmenden Inputbedarf im Gebäudebereich. Dadurch vergrößert sich das Angebot an Sekundärrohstoffen. Eine weitere Vergrößerung ergibt sich, wenn der Output aus dem Gebäudebereich durch Bestandsverkleinerung steigt, was aber bis 2030 in beiden Regionen nicht zu erwarten ist. Die relative Vergrößerung des Outputs erfordert aber auch, dass hochwertige Verwertungswege erschlossen werden müssen, um die anfallenden Sekundärrohstoffe ihren wertgebenden Eigenschaften entsprechend zu nutzen.

In beiden Regionen können durch ambitionierte Aufbereitung mehr RC-Baustoffe bereitgestellt werden. Die hochwertige Verwertung führt nicht zu einer bloßen Verlagerung der mineralischen Abfälle in andere Bereiche, sondern schafft zusätzliche Aufnahmekapazitäten. In Berlin ist der Gebäudebereich mit seinen im Zuge der Bestandserhaltung (Ersatzneubau und Sanierung) anfallenden Outputmassen etwas stärker präsent als in der Kurpfalz. Gleichzeitig wird hier aber noch mehr Input für den Gebäudebereich benötigt. Wenn der Altbeton aus dem Gebäudebereich ambitioniert aufbereitet wird, so dass 40 % des Altbetons abzgl. Verluste als RC-Gesteinskörnung Typ I für den Einsatz im R-Beton zur Verfügung stehen, so könnten in der Kurpfalz/Berlin im Jahr 2030 schon 49 %/35 % des dort dann jeweils benötigten Betons als R-Beton mit einem RC-Gesteinskörnungsanteil an der gesamten Gesteinskörnung von 40 % bereitgestellt werden. Wenn der Altbetonoutput aus Gebäuden und Infrastruktur dem jeweiligen Gesamtbetonbedarf der Kurpfalz/Berlins gegenübergestellt wird, zeigt sich, dass 2030 70%/55 % davon unter vorgenannten Bedingungen als R-Beton ausgeführt werden könnten. Der relativ größere Bedarf im Zuge der Bestandsvergrößerung in Berlin führt dazu, dass hier im Jahr 2030 ein jeweils kleinerer Anteil der Baustoffe über RC-Baustoffe gedeckt werden kann als in der Kurpfalz. Da im Infrastrukturbereich weniger Bestand zugebaut wird, vergrößern sich diese Anteile, wenn die Summe aus Gebäuden und Infrastruktur statt nur des Gebäudebereichs allein betrachtet wird.

In noch weiterer Zukunft wird der Gebäudebestand nicht mehr weiterwachsen, sondern vielleicht sogar abnehmen, so dass es dann umso wichtiger wird, ambitionierte Aufbereitung zu betreiben, um das Angebot aus den alten Baustoffen zu nutzen. Dies wird in der Kurpfalz nach derzeitigem Trend früher der Fall sein.

3.4.3 Unsicherheiten und Plausibilisierung

Eine Plausibilisierung der über das Modell berechneten Inputs in den Bestand ist auf der Ebene der Flächen- oder BRI-Zugänge über die Bautätigkeitsstatistik möglich. Hier sind Baufertigstellungen in Form von Errichtung neuer Gebäude und Baumaßnahmen an einem bestehenden Gebäude ausgewiesen. Es wird im Folgenden angenommen, dass die Summe aus diesen beiden der Summe aus Zubau und Ersatzneubau im Modell ohne Sanierungen entspricht.

Damit ergeben sich für das Jahr 2016 die in Tabelle 13 bzw. Tabelle 14 aufgeführten Unterschiede für die Wohn- und Nichtwohngebäude in der Kurpfalz bzw. Berlin. Es zeigt sich, dass die Wohnflächeninputs nach der Bautätigkeitsstatistik knapp 70 % bzw. gut 60 % der durch das Modell prognostizierten Inputs betragen. Unsicherheiten in der Bautätigkeitsstatistik bestehen insbesondere bezüglich der Baumaßnahmen im Bestand. Bei den Nichtwohngebäuden beträgt der Nutzflächeninput nach der Bautätigkeitsstatistik 98 % bzw. gut 50 % der durch das Modell prognostizierten Inputs.

Tabelle 13: Input in den Wohngebäudebestand der Kurpfalz im Vergleich nach Modell und Bautätigkeitsstatistik im Jahr 2016

1.000 m ² Wohnfläche 2016	EFH/ZFH	MFH	Summe Wohngebäude	Nichtwohngebäude
Modell Bestandsvergrößerung	225	161	386	208
Modell Ersatzneubau	48	71	118	235
Modell Summe	272	232	504	443
Statistik Errichtung neuer Gebäude	154	131	285	354
Statistik Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden			65	80
Statistik Summe			350	434
Statistik Summe/Modell Summe			0,69	0,98

Tabelle 14: Input in den Wohngebäudebestand Berlins im Vergleich nach Modell und Bautätigkeitsstatistik im Jahr 2016

1.000 m ² Wohnfläche 2016	EFH/ZFH	MFH	Summe Wohngebäude	Nichtwohngebäude
Modell Bestandsvergrößerung	440	957	1.397	572
Modell Ersatzneubau	48	357	405	480
Modell Summe	489	1.314	1.802	1.052
Statistik Errichtung neuer Gebäude	247	663	909	540
Statistik Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden			231	25
Statistik Summe			1.140	565
Statistik Summe/Modell Summe			0,63	0,54

Eine Plausibilisierung der durch das Modell prognostizierten In- und Outputmassen lässt sich bedingt durchführen. So können die für 2018 prognostizierten Inputmassen mit Produktionsstatistiken der jeweiligen Baustoffe verglichen werden. Für Berlin wird mit dem Modell ein Betonbedarf von 3,9 Mio. t prognostiziert. In Deutschland wurden 2018 52,66 Mio. m³ Transportbeton produziert [BTB 2019]. Bei einer angenommenen Betondichte von 2,4 t/m³ entspricht das einer Betonmasse von 126 Mio. t. Entsprechend der Einwohnerzahl skaliert ergäbe sich eine für Berlin produzierte Betonmenge von 5,5 Mio. t. Hinzu kommt noch Beton, der in Form von Fertigteilen oder Waren ausgeführt ist, der nach [Stürmer et al. 2016] einen Marktanteil von ca. 30 % hat. Unklar ist, wie hoch die tatsächliche mittlere Betondichte ausfällt und wie Berlin im Verhältnis zu Deutschland diesbezüglich am besten zu skalieren ist.

Die für 2018 über das Modell prognostizierten Outputmassen lassen sich mit den in Berlin in Bauschutttaufbereitungs- und Asphaltmischanlagen behandelten Massen vergleichen. In Berlin wurden 2016 734.009 t Bau- und Abbruchabfälle aus dem eigenen Bundesland in Entsorgungsanlagen behandelt [Statistisches Amt Berlin-Brandenburg 2018]. Die Summe aller mineralischen Outputmassen beträgt nach dem Modell 2018 knapp 5 Mio. t, davon 1,2 Mio. t Beton und 2,4 Mio. t Schotter, Kiese und Sande aus der Infrastruktur. Ein Teil der Abfallmassen wird aber sicher über Behandlungsanlagen außerhalb der betrachteten Region entsorgt.

Methodisch bedingt große Unsicherheiten ergeben sich für den Bestand und den Output der einzelnen Mauerwerksbaustoffe Kalksandstein, Mauerziegel (Klinker) und mineralische Leichtbaustoffe, weil diese über die Bautätigkeitsstatistik der letzten fünf Jahre aus der Summe dieser Mauerwerksbaustoffe ermittelt wurden. Für den Input spiegelt dies die korrekten aktuellen Verhältnisse im Zubau und Ersatzneubau wider, für den Bestand mit seinen älteren Gebäuden und den daraus abgeleiteten Outputströmen sind diese Verhältnisse hingegen eher nicht zutreffend.

Weitere Unsicherheiten ergeben sich für die durch Sanierungen hervorgerufenen Materialströme. Für die Sanierungstätigkeiten wird sehr vereinfachend angesetzt, dass die

Verhältnisse der dabei anfallenden bzw. einzusetzenden Materialien denen eines Abrisses bzw. Neubaus gleichen. In der Praxis wird bspw. Mauerwerk im Zuge einer Sanierung weniger angetastet als der Innenbereich. Deshalb wird für Gips, Flachglas und mineralische Dämmstoffe abweichend dafür ein Input wie im Falle eines Neubaus unterstellt bzw. ein Output in Höhe von 75 % eines Abrisses für Gips, 100 % für Flachglas und 0 % für mineralische Dämmstoffe. Um hier die Praxis noch besser abbilden zu können, werden zusätzliche Gebäudesteckbriefe für die im Zuge einer Sanierung adressierten Materialien benötigt.

4 Metalle

Kapitel 4 besteht aus vier Unterkapiteln. Im ersten Unterkapitel wird ein Überblick über die im Projekt erstellten Factsheets gegeben. Der Aufbau und die einzelnen Abschnitte der Factsheets werden hierbei dargestellt und anhand von Beispielen erläutert. Im zweiten Unterkapitel werden die Arbeiten zur Verwertungsprognostik für die betrachteten Sektoren ausgeführt und die Ergebnisse gezeigt. Im dritten Unterkapitel wird eine zusammenfassende Gesamtübersicht über das Materiallager, die Outputströme und den Verbleib der einzelnen Metalle gegeben. Im vierten Unterkapitel werden die Hemmnisse und Lösungsansätze für das Metallrecycling in Deutschland gegliedert nach verschiedenen Themenfeldern dargestellt und erläutert.

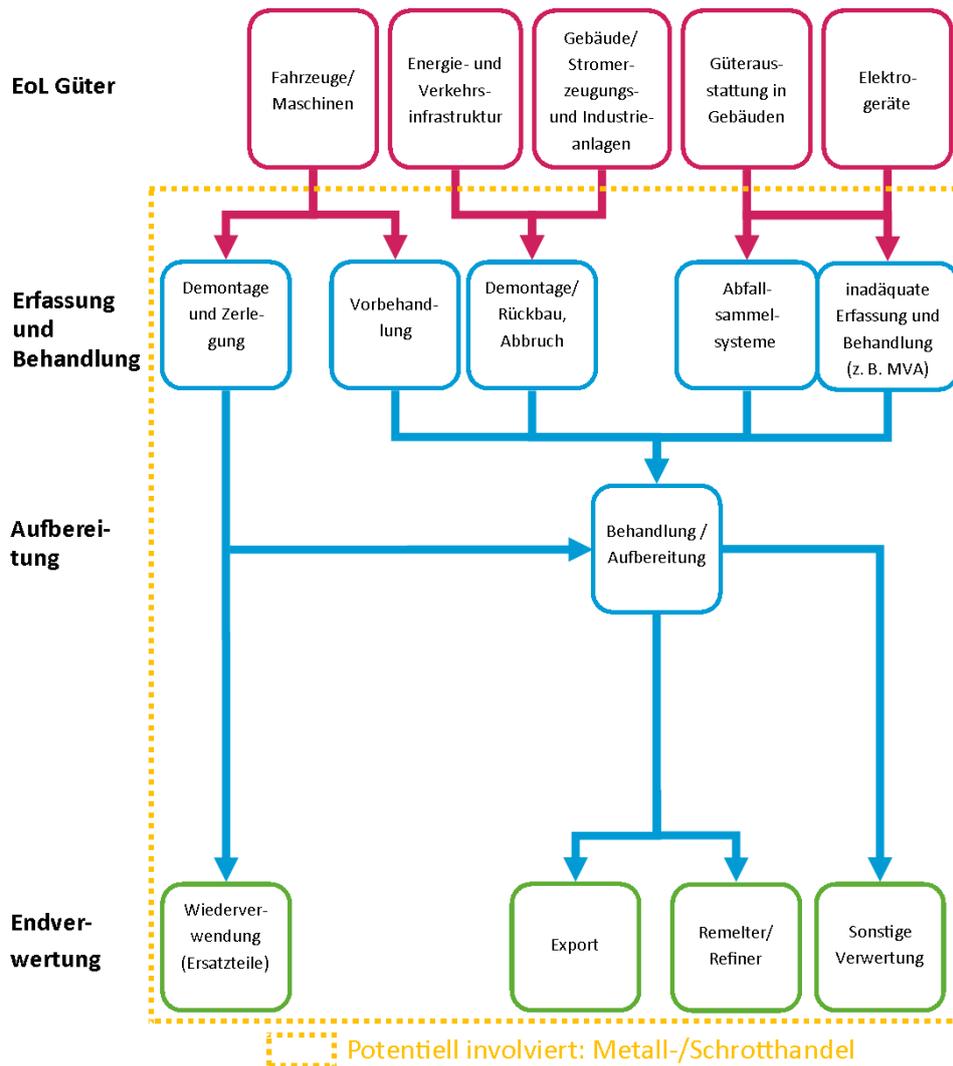
4.1 Metalle im Überblick – Eine Zusammenfassung der Factsheets

Die Kenntnis des Metalls bzw. der Legierung und deren Zusammensetzung, des Produktionsprozesses, der jeweiligen Hauptanwendung/Hauptprodukte und der spezifischen Recyclingeigenschaften der jeweiligen Produkte in den Anwendungsfeldern ist Voraussetzung, um Stoffströme der Metalle entlang ihres Lebenswegs zu modellieren und Recyclingperspektiven entwickeln zu können. Daher wurden sieben metallspezifische Factsheets erstellt, mit folgender einheitlicher Struktur:

- ▶ allgemeine Übersicht
- ▶ Mengenströme und Anwendungen
- ▶ relevante rechtliche Regelungen
- ▶ Recyclingsituation
- ▶ Recyclingperspektiven

Die Factsheets sind mit einem Verwertungsschema illustriert, in dem die aktuelle und perspektivische Recyclingsituation der Produkte in dem das jeweils betrachtete Metall / die betrachtete Legierung dargestellt ist. Abbildung 24 zeigt beispielhaft das für Aluminium entwickelte Schema.

Abbildung 24: Verwertungswege des Aluminiums in verschiedenen Produkten



Quelle: UBA 2019

Das Schema zeigt, in welchen Produkten Aluminium anfällt und über welche Verwertungswege das jeweilige Produkt recycelt wird. Im Gegensatz zu den Baustoffen ist das Metallrecycling bereits etabliert, weshalb hier nicht zwischen einem konventionellen und einem ambitionierten Weg unterschieden werden kann. Das Optimierungspotenzial liegt vielmehr in der Verbesserung der Erfassung und der Behandlung. Das Schema ist aufgeteilt in drei Schritte. Im ersten Schritt werden die jeweiligen Optionen für die Erfassung und Behandlung dargestellt (z. B. Demontage und Zerlegung von Altfahrzeugen). Im zweiten Schritt folgt die Aufbereitung bzw. Weiterbehandlung der Outputs der Erstbehandlung. Im dritten Schritt wird die Endverwertung und damit indirekt auch der Verbleib dargestellt.

Die Factsheets wurden Mitte 2019 veröffentlicht und sind auf der Internetseite des Umweltbundesamtes abrufbar¹². Eine Aktualisierung ist in unregelmäßigen Abständen vorgesehen.

Im Folgenden wird kurz auf die jeweiligen Kapitel der Factsheets eingegangen.

¹² <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining/das-anthropogene-lager>

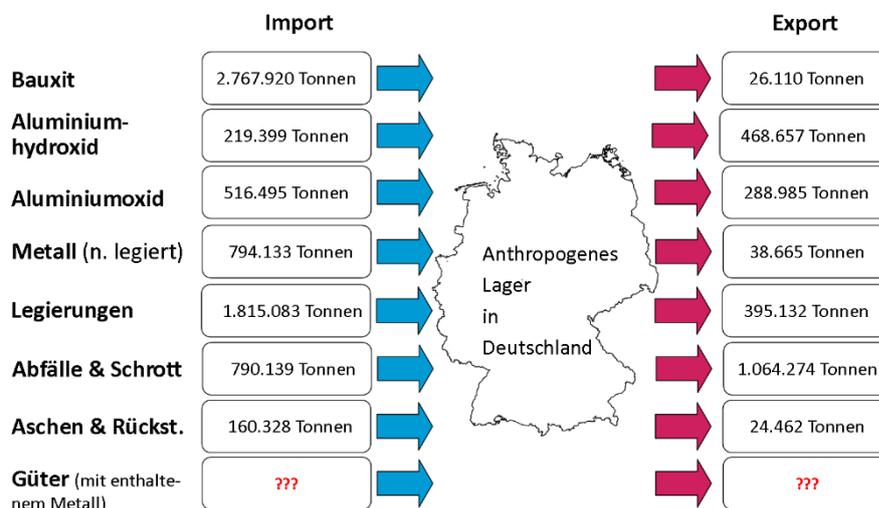
Allgemeine Übersicht

In der allgemeinen Übersicht wird kurz auf allgemeine Fakten wie beispielsweise die Eigenschaften des jeweiligen Metalls oder der Legierung und des Herstellungsprozesses eingegangen.

Mengenströme und Anwendungen

Im Abschnitt Mengenströme und Anwendungen werden einleitend die Hauptlieferländer des jeweiligen Metalls nach Europa und Deutschland genannt. Es folgt das Unterkapitel Produktion in dem auf die deutsche und globale Produktion eingegangen wird. Für Deutschland wird auch eine Abschätzung zur Anzahl der produzierenden Betriebe vorgenommen und die jeweiligen Interessensvertreter (Verbände) der Industrie benannt. Im nächsten Unterkapitel Im-/Export werden die metallhaltigen Ströme (Metalle in Gütern werden hierbei dargestellt, aber nicht quantifiziert) aus und nach Deutschland für das jeweils betrachtete Metall quantifiziert und dargestellt. In Abbildung 25 wird diese Darstellung für Aluminium beispielhaft gezeigt.

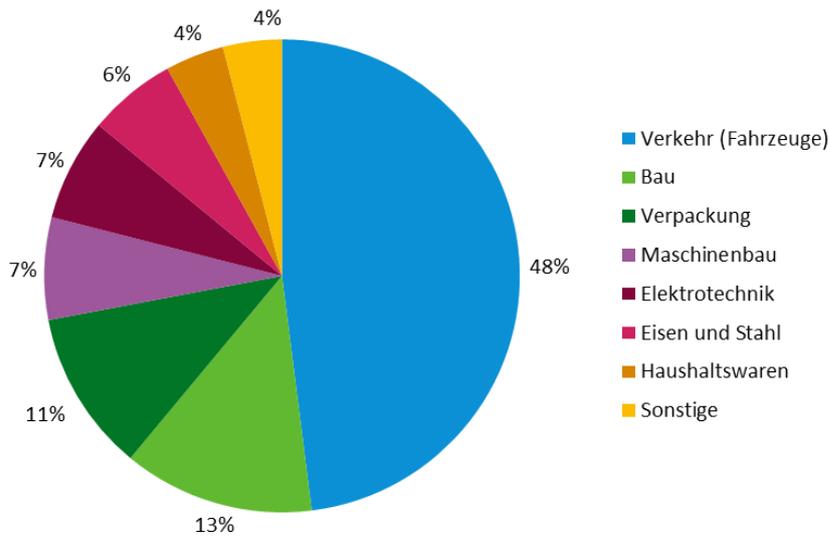
Abbildung 25: Im- und Export von aluminiumhaltigen Stoffen in 2015



Quelle: UBA 2019

Diese Zahlen werden zusammengefasst um für die Kategorien Rohstoffe, Metall sowie Schrotte und Aschen darzustellen, ob Deutschland hier Netto Im- oder -Exporteur ist. Im dritten Unterkapitel Anwendung werden die Hauptanwendungsfelder des jeweiligen Metalls/der Legierung aufgeführt sowie der Metallkreislauf illustriert. In Abbildung 26 sind beispielhaft die Hauptverwendungsgebiete von Aluminium gezeigt.

Abbildung 26: Hauptverwendungsgebiete des Aluminiums



Quelle: UBA 2019

Abschließend wird in diesem Kapitel noch auf Trends eingegangen, welche die Anwendungsfelder des jeweiligen Metalls/der Legierung beeinflussen, im Falle des Aluminiums beispielsweise die Elektromobilität, welche zu einer höheren Nachfrage auf Grund der Konstruktion der Fahrzeuge führen dürfte.

Relevante rechtliche Regelungen

Im Abschnitt relevante rechtliche Regelungen wird auf Gesetze und Verordnungen bezüglich Luft, Abwasser und Abfall eingegangen, welche die Produktion oder das Recycling der Metalle/der Legierungen regulieren. Diese sind über die verschiedenen betrachteten Stoffe hinweg relativ ähnlich, da beispielsweise die vierte Bundesimmissionschutzverordnung (4. BImSchV) Anlagen zur Herstellung von Nichteisenrohmetallen aus Erzen, Konzentraten oder sekundären Rohstoffen regelt. Neben dieser geben auch das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung sowie die TA Luft weitere relevante regulatorische Vorgaben bezogen auf die Luft vor. Bei Wasser sind es das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und die Abwasserverordnung, welche die Produktion beeinflussen. Für den Abfall hängt es direkt mit den jeweiligen Produkten, welche zu Abfall werden, zusammen. Hier sind übergeordnet das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG), sowie zahlreiche weitere Verordnungen zu bestimmten Abfallströmen (z. B. zu Altautos) relevant. Weitere Verordnungen, auch auf europäischer und internationaler Ebene, wenn grenzüberschreitend transportiert wird, wie z. B. die Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (GGVSEB) regeln den Transport und den damit verbundenen (administrativen) Aufwand.

Recyclingsituation

Im Abschnitt Recyclingsituation werden das Funktionieren des Recyclings und Recyclingraten als Indikator für dessen Quantifizierung thematisiert. Hier wird unterschieden zwischen dem Recycled Content (RC) und der End of Life (EoL)-Recyclingrate. Der Recycled Content betrachtet den Anteil an Sekundärmaterial der zur Herstellung des jeweils betrachteten Metalls eingesetzt wird und betrachtet nicht die Effizienz des Recyclingsystems. Letzteres ist bei der EoL-Recyclingrate gegeben, welche die Menge eines rückgewonnenen Materials zu der Menge des aus der Nutzung ausgeschiedenen Materials ins Verhältnis setzt. Soweit verfügbar werden hier

auch die jeweiligen Recyclingraten für das jeweilige Metall dargestellt. Zudem wird dargestellt welches die Hauptquellen für den jeweiligen Sekundärstoffstrom sind. Das bereits in Abbildung 24 beispielhaft dargestellte Schema zu den Verwertungswegen ist ebenfalls fester Bestandteil des Abschnitts Recyclingsituation. Es wird für das jeweilige Metall dargestellt und textlich erläutert, um einen umfassenden Überblick über die Herkünfte der jeweiligen Metallstoffströme, beginnend mit dem jeweils zu Abfall werdenden Produkt, und dessen weiteren Behandlungsweg zu geben. Es werden die jeweiligen Recyclingschritte beschrieben, um am Ende ein Sekundärmaterial zu erzeugen. Hierbei wird auch auf die Probleme eingegangen, um das Verbesserungspotenzial im Recycling des jeweiligen Metalls aufzuzeigen. Im Falle des Aluminiums ist eines der Probleme beispielsweise die Probleme bei der Sortierung unterschiedlicher Legierungen, was zu Verlusten beim Einschmelzen führt. Der letzte Teil des Abschnitts stellt die im ersten Dialogforum identifizierten Hemmnisse für ein Recycling in Deutschland für den jeweiligen Metallstoffstrom dar, welche zum Teil auch übergreifend für mehrere Ströme gelten.

Recyclingperspektiven

Im Abschnitt Recyclingperspektiven werden bei den Metallen, im Gegensatz zu den mineralischen Abfällen, keine stoffstromumlenkenden Strategien diskutiert, sondern Optimierungspotenziale dargestellt, welche sich aus dem Stand der Technik und den sich abzeichnenden Entwicklungen für den jeweiligen Metallstoffstrom ergeben. Hierbei wurden unter anderem die JRC-Dokumente zum jeweils aktuellen Stand der Technik betrachtet, um dort die jeweils aufgeführten technischen Lösungen (z. B. Nutzung bestimmter Ofenarten für bestimmte Schrottypen) für den jeweiligen Metallstoffstrom zu extrahieren.

4.2 Verwertungsprognostik (Verwertungswege, Datenquellen, Ergebnisse)

Die Verwertungsprognostik, welche Daten zum anthropogenen Lager, zum Aufkommen aus diesem Lager sowie zu den Verwertungswegen der Abfälle inkl. der zugehörigen Effizienzen benötigt, wird in diesem Kapitel behandelt. Betrachtet werden nach Leistungsbeschreibung des UBA Lager und Ströme für Aluminium, Edelstahl, Zink, Zinn, Messing, Magnesium und Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial. Um den Bestand und die Entwicklungen der im Fokus stehenden Nicht-Eisenmetalle und Legierungen in Deutschland beschreiben zu können, wurden insgesamt neun relevante Sektoren identifiziert und definiert, in denen jeweils die metallrelevanten Güter betrachtet wurden (siehe Tabelle 15). Die Sektoren wurden auf Basis verschiedener Quellen zur Verwendung der Metalle festgelegt. Folgende Quellen wurden hierbei verwendet [WV Metalle 2001-2017] für Aluminium, Zink und Kupfer (in Messing), [Leffler 1998] für Edelstahl, [IMA 2017] für Magnesium, [Wann 2012] für Messing, [BGR 2014] für Zinn und [Hoffmann 2016] für Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial, ergänzt um Einschätzungen von Experten aus der NE-Metallindustrie. Hierbei wurden aus den verschiedenen Quellen heraus die Hauptanwendungsfelder/-produkte identifiziert und zu Sektoren geclustert.

Die Stoffstrommodellierung besteht aus der Analyse des aktuellen Bestands, also der Frage, wieviel Material heute im anthropogenen Lager in Deutschland enthalten ist, sowie einer Abschätzung der zukünftigen Entwicklung wie zu erwartender technologischer Veränderungen (Beispiel Elektromobilität) und des damit verbundenen Materialeinsatzes. Über die Annahme von güterspezifischen Lebensdauern wurde weiterhin betrachtet, wann welche Materialien in welcher Menge das anthropogene Lager verlassen und welche Verwertungswege resultieren (z. B. Sammlung, Aufbereitung, Export, Wiederverwendung). Die genaue Methodik zu den Verwertungswegen wird in diesem Kapitel dargestellt.

Pro Gut wurde eine mittlere Materialzusammensetzung definiert (z. B. Kilogramm Metall pro Kilogramm Gut). Zum Teil sind in den Sektoren sehr vielfältige Güter enthalten (z. B. Sektor 9: Maschinen), welche auf Grund der Datenlage nur in Form eines generischen Gutes mit einer mittlerer Materialzusammensetzung abgebildet werden konnte. Aufgrund unterschiedlicher Datenverfügbarkeit und -qualität wurden die verschiedenen Sektoren entweder Top-down über statistische (Verbands-)Daten abgebildet (z. B. jährliche Einsatzmengen in Branchen) oder Bottom-up über Detailanalysen z. B. zum Infrastrukturbestand von Stromnetzen oder Verkehrsinfrastrukturen.

Die Kapitel der Verwertungsprognostik erläutern für jeden Sektor zuerst den Betrachtungsrahmen sowie die betrachteten funktionellen Einheiten. Die Grundlagen der Berechnung sowie die zugehörigen Quellen für die funktionellen Einheiten werden dargestellt. Es folgt die Abbildung der Entwicklung der funktionellen Einheiten. Die jeweils betrachteten Metalle/Legierungen werden anschließend aufgeführt und die Berechnung der Ausgangsdaten mit Nennung der verwendeten Quellen wird dargelegt. Darauf aufbauend werden die resultierenden Metallmengen im Stock (anthropogenes Lager) sowie die berechneten Outflows aus dem Stock in die Kreislaufwirtschaft gezeigt.

Tabelle 15: Sektorübersicht der Verwertungsprognostik

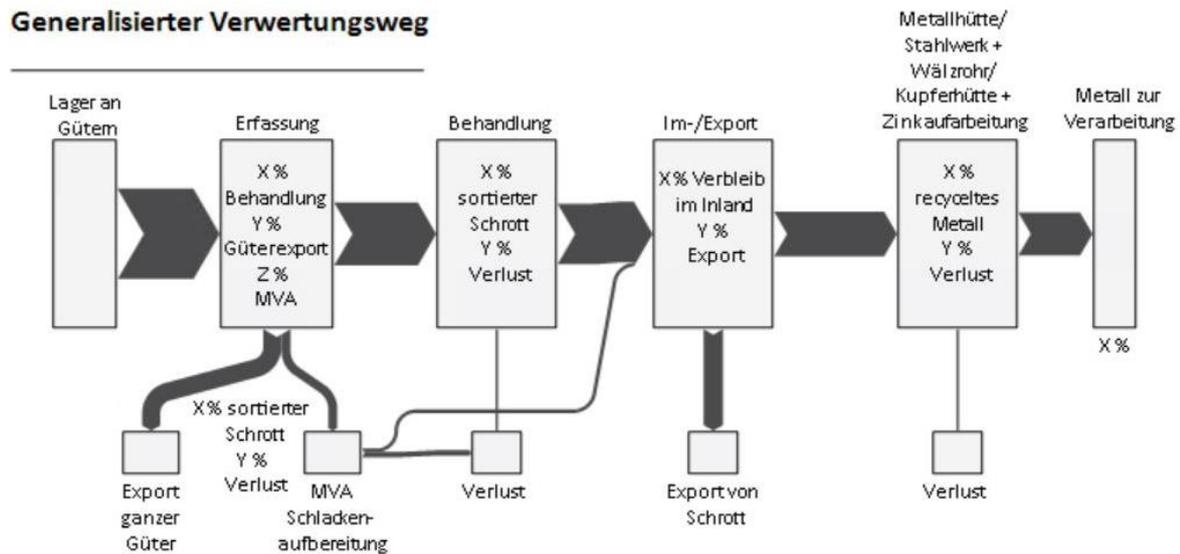
Sektor	Sektorbezeichnung	enthaltene Güter (Beispiele)	Aluminium Guss/Knet	Edelstahl	Zink	Zinn	Messing	Magnesium	Neodym- Eisen- Bor- Magnet- material
1	technische Güter im Hochbau (Wohnen und Nicht-Wohnen)	Fensterbänke, Dachrinnen, Fassaden, Lüftungsrohre, Armaturen Sanitärbereich, Fahrstühle, Handläufe etc.	✓	✓	✓		✓		
2	Mobile Güter in Gebäuden (ohne Elektrogeräte)	installierte Güter (insb. Küchen) und bewegliche Güter (Pfannen, Töpfe, Messer, Musikinstrumente, Koffer etc.)	✓	✓	✓		✓		
3	Mobile Güter in Gebäuden (Elektrogeräte)	Elektro- und Elektronikgeräte, wie Kühlschränke, Waschmaschinen, Computer etc.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	stromerzeugungsanlagen	fossile Kraftwerke (Stein- & Braunkohle, Nuklear, Gas), Kraftwerke erneuerbarer Energien (Windkraft, Photovoltaik, Kraftwärmekopplung, Biomasse, etc.)	✓	✓	✓	✓	✓		✓
5	Stromnetze	Leitungen und Masten der Übertragungs- und Verteilnetze	✓		✓				
6	Fahrzeuge	Zwei und vierrädrige Straßenfahrzeuge (PKW, LKW, LNF, Busse, Fahrräder, Pedelecs etc.), Schiffe, Schienenfahrzeuge	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
7	Verkehrsinfrastruktur	Schutzstreifen, Verkehrszeichen, Schilderbrücken, Ampeln	✓		✓				
8	Industrieanlagen	Reaktoren, Versorgungsleitungen, Rektifikationskolonnen etc.	✓	✓					
9	Maschinen	Baumaschinen, Werkzeugmaschinen, Fördermaschinen etc.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Verwertungswege

Die Verwertungswege für die verschiedenen Güter und der darin enthaltenen Metalle ist sehr unterschiedlich. Die einzelnen Zahlen zu den Transitionen können im Modell nachgeschlagen werden, hier wird nur auf die betrachteten Phasen und die Wertebereiche eingegangen. In Abbildung 27 sind alle betrachteten Transitionen dargestellt.

Abbildung 27: Generalisierter Verwertungsweg der Güter und Metalle



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Wie dargestellt beginnt der Verwertungsweg mit dem Abfluss aus dem Güterlager. Der erste Schritt ist die Erfassung des Stroms bei der eine Aufteilung Richtung Behandlung, Export und MVA stattfindet. In diesem Schritt finden diffuse Verluste zwischen 5 % (Gebäude, Infrastruktur) bis 20 % (Elektrogeräte) statt. Der Export ganzer Güter ist vor allem relevant für die Güter der Sektoren 6 und 9 (Fahrzeuge und Maschinen) und liegt zwischen 0 % (Gebäude, Infrastruktur) und 60 % (Fahrzeuge). Die Abfallverbrennung (MVA) ist relevant für Sektoren 2 und 3 (mobile Güter und Elektrogeräte). Die Effizienz der Schlackenaufbereitung liegt je nach Metall zwischen 0 % (Zinn) und 56 % (Al, Edelstahl, Messing). Bei der Behandlung findet eine Auftrennung der Güter in einzelne Metalle oder Metallgemische statt. Hier sind Zerkleinerungstechnologien relevant, die vor allem für Fahrzeuge und mobile Güter große Auswirkungen haben. Es kann zu Verlusten zwischen 1 % (Sn in WKA) und 75 % (Sn in Fahrzeugen) kommen. Der Export aufbereiteter Schrotte schwankt stark und liegt zwischen 0 % (Messing) und 95 % (Edelstahl). Metallspezifische Prozesse bzgl. Rückgewinnung wie die Kupferhütte für Messing, bei welcher Kupfer sowie Zinkverbindungen ausgebracht werden, dem Stahlwerk und Wälzrohr für verzinkte Güter oder der Rückgewinnung von Magnesium im Rahmen des Recyclings von Aluminiumlegierung, bei der die Legierung rückgewonnen wird und nicht das Metall separat, weisen eine Effizienz zwischen 65 % (Zinn) und 95 % (übrige Metalle) auf. Aus diesen Transitionen werden am Ende der folgenden Kapitel die Mengen an den drei Orten des Verbleibs der Metalle (Export, Recycling in Deutschland und Verluste) berechnet.

4.2.1 Sektor 1: Technische Güter im Hochbau

Als technische Güter im Hochbau werden alle projektrelevanten Metalle, die in Gebäuden verbaut sind, betrachtet. Hierzu gehören fest verbaute Bestandteile wie Fenster, Türen oder Fassaden aber auch die infrastrukturelle, zur Nutzung des Gebäudes notwendige Ausstattung

wie Pumpen, Belüftung und ähnliches. Letztere entsprechen weitgehend der Kostengruppe 400¹³ – Technische Anlagen- nach DIN 276. Nicht betrachtet werden die individuelle Ausstattung von beispielsweise Haushalten (z. B. Küchen, die in Sektor 2: Mobile Güter in Gebäuden (ohne Elektrogeräte) betrachtet werden) oder die Ausstattung von Betrieben (z. B. mit Maschinen, die in Sektor 9: Maschinen betrachtet werden).

Untersuchungsgegenstand und Modellansatz

Die funktionellen Einheiten in Sektor 1 sind die Wohn- bzw. Nutzfläche in Wohn- und Nichtwohngebäuden in Quadratmetern. Der erste Schritt in der Modellierung des Sektors ist die Quantifizierung der funktionellen Einheiten. Der Bestand an Wohn- und Nutzflächen in Deutschland für das Basisjahr 2015 sowie die Nettoflächenentwicklung bis 2040 werden über Bildung eines Mittelwertes der relevanten Daten aus den Studien [Bürger et al. 2016], [Öko-Institut und ISI 2015], [Pfluger et al. 2017] und [Gerbert et al. 2018] errechnet. Die Daten liegen in den Studien für verschiedene Stützjahre vor und werden interpoliert. Als Bestand für das Basisjahr 2015 wird eine Gesamtnutzfläche von 1 549 Mio. m² zugrunde gelegt. Die ausgewerteten Studien gehen von einer langfristigen Stagnation der Nutzflächenentwicklung bis 2040 aus. Für Wohnflächen liegt der Bestand 2015 bei 3 845 Mio. m². Entsprechend der verwendeten Quellen ist mit einem weiteren Zuwachs an Wohnflächen zu rechnen, allerdings gehen die Zuwachsraten bis 2040 kontinuierlich zurück. So sinken die Zuwachsraten von aktuell 0,4 % p. a. (2015) auf 0,35 % (2015-2020), 0,35 % (2020-2029), 0,26 % (2030-2039) sowie 0,15 % (2040).

Für die Berechnung des Materialbedarfs ist neben dem Nettoneubau von Wohn- und Nichtwohngebäuden auch die Bestandserneuerung (insb. durch Ersatzneubau, d. h. Abriss und Neubau an gleicher Stelle) relevant. Eine Differenzierung in Neubau und Bestandserneuerung lässt sich durch die amtliche Statistik des Statistischen Bundesamts [Statistisches Bundesamt 2019] nicht durchführen. Um die Bestandserneuerungsraten zu bestimmen wurde hilfsweise die Differenz aus statistischem Gesamtzubau im Jahr 2015 mit dem aus den oben genannten Quellen errechneten Nettozubau 2015 gebildet. Hieraus ergibt sich für Wohngebäude eine Bestandserneuerungsraten von 0,4 % des Bestandes. Für Nichtwohngebäude gehen die genutzten Quellen von einer Stagnation aus, deshalb entspricht der Zubau auch dem Abgang.

In der folgenden Tabelle finden sich die Metalle und Güter, welche in Sektor 1 abgebildet werden.

¹³ Kosten aller im Bauwerk eingebauten, daran angeschlossenen oder damit fest verbundenen technischen Anlagen oder Anlagenteile die einzelnen technischen Anlagen enthalten die zugehörigen Gestelle, Befestigungen, Armaturen, Wärme- und Kälte-dämmung, Schall- und Brandschutzvorkehrungen, Abdeckungen, Verkleidungen, Anstriche, Kennzeichnungen sowie Mess-, Steuer- und Regelanlagen

Tabelle 16: Übersicht Sektor 1 Technische Güter im Hochbau (Güter und enthaltene Materialien)

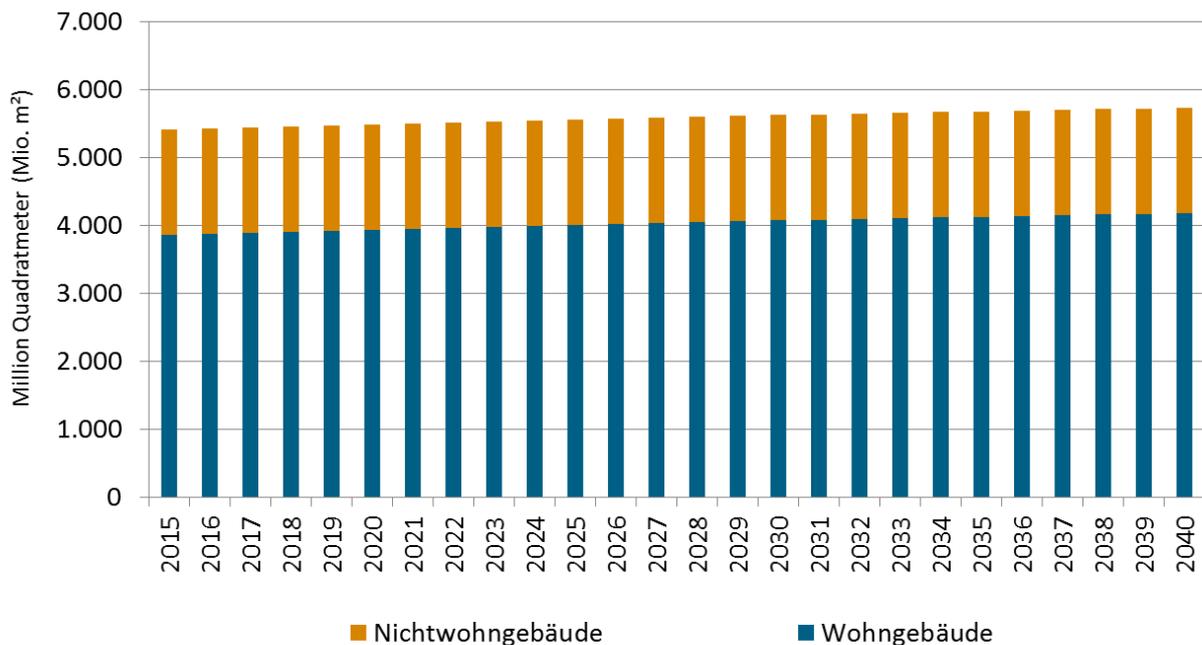
Gut	Aluminium Guss	Aluminium Knet	Edelstahl	Zink	Zink auf Stahl (Verzinkung)	Zinn	Messing	Magnesium	Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial	Quellen
Wohngebäude		✓	✓	✓	✓		✓			
Nichtwohngebäude		✓	✓	✓	✓		✓			

Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Datengrundlagen

Abbildung 28 zeigt den Anstieg der Wohnfläche und die Stagnation der Nutzflächen. Der Anstieg über die betrachteten 25 Jahre beträgt insgesamt 8,4 %, das entspricht einem mittleren jährlichen Zuwachs von 0,34 %.

Abbildung 28: Güterbestand Sektor 1 Technische Güter im Hochbau 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, ifeu

Die in diesem Sektor betrachteten Metalle/Legierungen sind Aluminium, Zink (Verzinkung und Zink homogen), Messing und Edelstahl. Für die übrigen im Projekt betrachteten Metalle lassen sich keine plausiblen Untersuchungen oder Statistiken finden, die Rückschlüsse über deren Verwendung in diesem Sektor zulassen. Für Aluminium, Messing und Zink werden die Statistiken von [Andreas Herzig et al. 2016] und [WV Metalle 2001-2017] für die Jahre 2000 bis 2015 genutzt um für jedes der genannten Jahre die Masse an Metall/Legierung, welches in den Bausektor fließt, zu ermitteln. Analog wird dies bei Edelstahl mit der Rohstoffsituation Deutschland als Quelle durchgeführt. Da die Sektorabgrenzung in den genannten Quellen weit gefasst und nicht deckungsgleich mit den hier definierten Sektoren sind, müssen weitere

Quellen und Annahmen verwendet werden, um die Metallmassen die in den Bausektor fließen zu berechnen. Bei Aluminium werden die Angaben aus den WV Metalle Statistiken als Basis genutzt und die Mengen aus den Sektoren 4 (Stromerzeugungsanlagen), 5 (Stromnetze) und 8 (Industrieanlagen) abgezogen. Nach dem Abzug der Mengen gehen von den ursprünglich in den Statistiken genannten 13 bis 18 % für den Bausektor nur noch 8 bis 11 % in Sektor 1, 6 % gehen in die übrigen drei Sektoren. Für Zink wird im Falle der Verzinkung davon ausgegangen, dass 50 % der Verzinkungsmenge im Bausektor verwendet wird (die übrigen 50 % finden im Fahrzeugsektor Anwendung). Für homogenes Zink wird die genannte Menge von Zink, Halbzeug (Bau), Zinkgusslegierung aus der Statistik der WV Metalle auf 52 % reduziert der Menge, welche laut Angaben von [IZA 2019] in den Bausektor fließt. Für [Leffler 1998] Messing werden die 150 000 t, welche laut [Wann 2012] in den Sanitärbereich fließen, als Anteil veranschlagt und mit den Messingzahlen von 2012 verknüpft. Hieraus ergibt sich ein Anteil von 38 % der Gesamtmenge an Messing, welche im Bausektor eingesetzt wird. Für Edelstahl gibt [Leffler 1998] einen Anteil von 5 % an, der in den Bausektor fließt.

Im nächsten Schritt werden die berechneten Metallinputmengen auf Wohn- und Nichtwohngebäude aufgeteilt. Die Aufteilung mit Begründung ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 17: Verteilung zwischen Wohn- und Nichtwohngebäude (basierend auf begründeten Annahmen)

	Wohngebäude	Nichtwohngebäude	Begründung
Metallverteilung Aluminium	20 %	80 %	Größere Ausstattung bei Nichtwohngebäuden, bei Wohngebäuden eigentlich nur Fensterbänke
Metallverteilung Messing	80 %	20 %	Vor allem im Wohngebäudebereich sind mehr Armaturen pro m ² während es weniger Sanitärbereiche pro m ² in Nichtwohngebäuden gibt
Metallverteilung Verzinkung	50 %	50 %	Belüftungsanlagen und günstige Anwendungen wie Handläufe in Wohngebäudebereich halten sich die Waage
Metallverteilung Zink	80 %	20 %	Dachrinnen in Wohngebäuden haben sehr hohen Anteil
Metallverteilung Edelstahl	40 %	60 %	Edelstahl wird im Fassadenbau von NWG genutzt, im hochwertigen Wohngebäudebau wird auch Edelstahl genutzt

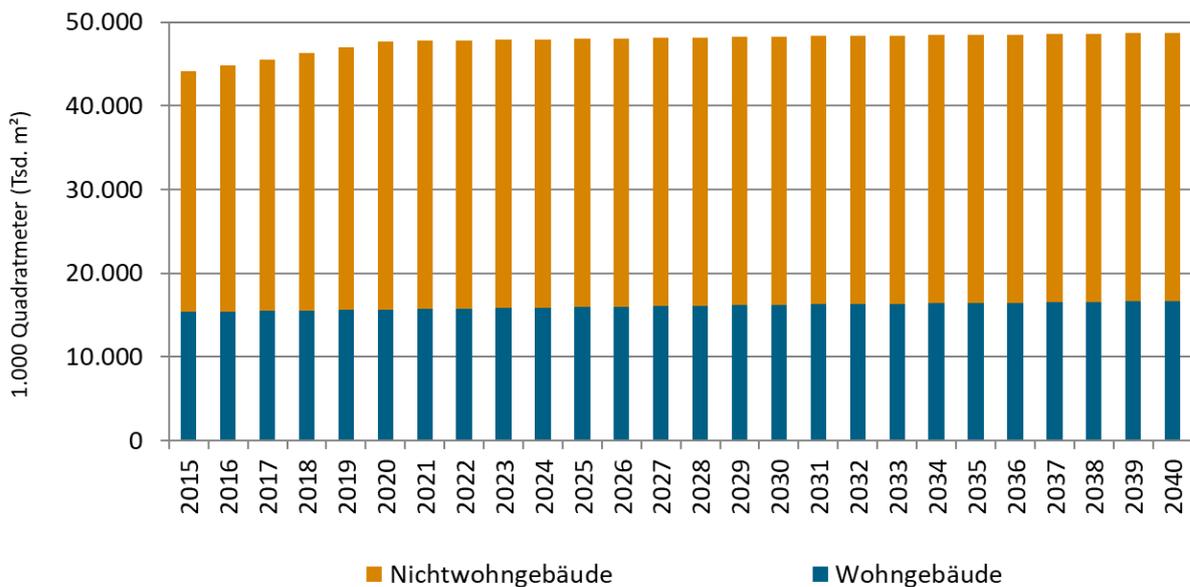
Die aus dieser Berechnung resultierenden Metallinputmengen für Wohn- sowie Nutzflächen werden für die verschiedenen Jahre anschließend auf die Zubauf Flächen von Wohn- und Nichtwohngebäuden des jeweiligen Jahres verteilt. Anschließend wird jeweils ein Mittelwert

dieser Metallmengen pro Quadratmeter für Wohn- bzw. Nutzfläche gebildet. Diese Mittelwerte bilden die Materialkoeffizienten für den Flächeninput.

Für den Bestand kann davon ausgegangen werden, dass ältere Gebäude einen geringeren Metallgehalt aufweisen als Neubauten. Nach Sichtung von verschiedenen Gebäudesteckbriefen [IÖR 2019] konnten keine direkten Schlüsse gezogen werden, wieviel Metall ältere Gebäude enthalten, da die Gebäudesteckbriefe Metalle als Summenparameter ausweisen und Stahl enthalten, der die Gesamtmenge dominiert. Aus diesem Grund müssen Annahmen getroffen werden, um den Metallgehalt des Bestandes abzubilden. Für Wohngebäude wird davon ausgegangen, dass diese 2015 33 % der Metallmenge heutiger Gebäude aufweisen. Dieser Anteil stagniert zwischen 2015 und 2020 und steigt ab dann 5 % pro Dekade an. 2040 hat der Bestand somit einen Anteil von 43 % der Metallkoeffizienten heutiger Gebäude. Bei Nichtwohngebäuden wird zwischen 2015 und 2020 von einem Anteil von 50 % ausgegangen, der pro Dekade um 10 % steigt und 2040 bei 70 % liegt. Die höheren Werte für Nichtwohngebäude kommen auf Grund der kürzeren Lebensdauer dieser Gebäude zu Stande.

In Abbildung 29 ist die Entnahme von Gütern über den Betrachtungszeitraum dargestellt. Wie zu erkennen ist, steigt die Entnahme von rund 44 Mio. m² im Jahr 2015 auf rund 49 Mio. m² im Jahr 2040, was einem Anstieg von fast 5 Millionen m² bzw. rund 10 % entspricht.

Abbildung 29: Güterentnahme Sektor 1 Technische Güter im Hochbau 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, ifeu

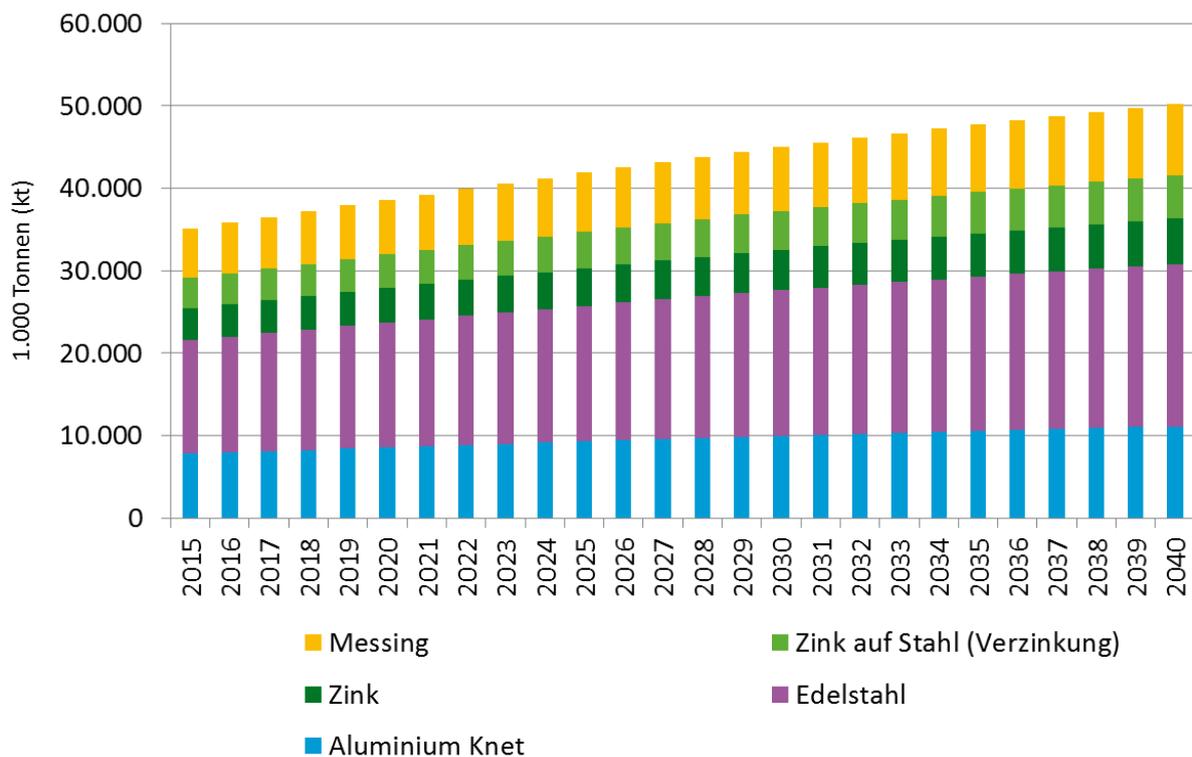
Berechnungsergebnisse

Auf Basis der dargestellten Entwicklungen was In- und Output betrifft sowie der hinterlegten Materialkoeffizienten, ergibt sich der in Abbildung 30 dargestellte Materialbestand sowie die in Abbildung 31 dargestellte Materialentnahme.

Nach Abbildung 30 beläuft sich der Materialbestand 2015 in Sektor 1 auf 35,1 Millionen Tonnen, dominiert von 13,8 Millionen Tonnen Edelstahl, 7,8 Millionen Tonnen Aluminium und 6,0 Millionen Tonnen Messing. Der Materialbestand wird sich bis 2040 auf 50,2 Millionen Tonnen erhöhen (+42,9 %).

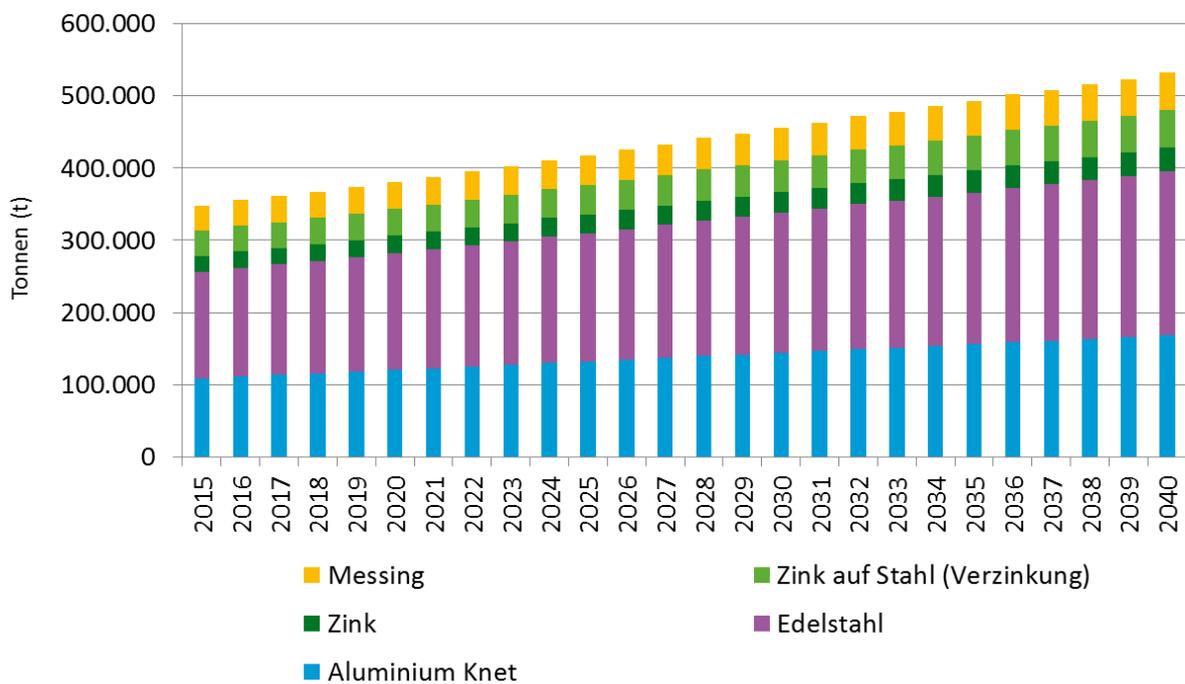
Die großen Materialmengen, die in Gebäuden vorhanden sind, sowie der große Bestand sorgen auch bei einer geringen Austauschrate zu einer Materialentnahme von rund 350.000 Tonnen im Jahr 2015. Dominiert wird die Entnahme von Edelstahl (rund 150.000 t) und Aluminiumknetlegierung (rund 110.000 t). Die Materialentnahme nimmt bis zum Jahr 2040 zu und beläuft sich dann auf rund 530.000 Tonnen (+52,9 %). Tabelle 18 zeigt die berechneten Materialentnahmen zu den Stützjahren 2015, 2020, 2030 und 2040.

Abbildung 30: Materialbestand Sektor 1 Technische Güter im Hochbau 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 31: Materialentnahme Sektor 1 Technische Güter im Hochbau 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Tabelle 18: Übersicht Sektor 1: Materialentnahme aus dem anthropogenen Lager (in t)

Material	Output 2015	Output 2020	Output 2030	Output 2040	Summe 2015 - 2040
Aluminium Knet	108.834	120.670	144.339	168.798	3.600.808
Edelstahl	147.458	161.970	193.614	226.317	4.834.393
Zink	22.284	23.659	28.213	32.921	706.807
Zink auf Stahl (Verzinkung)	34.293	37.444	44.740	52.281	1.117.775
Messing	35.018	37.172	44.326	51.722	1.110.492

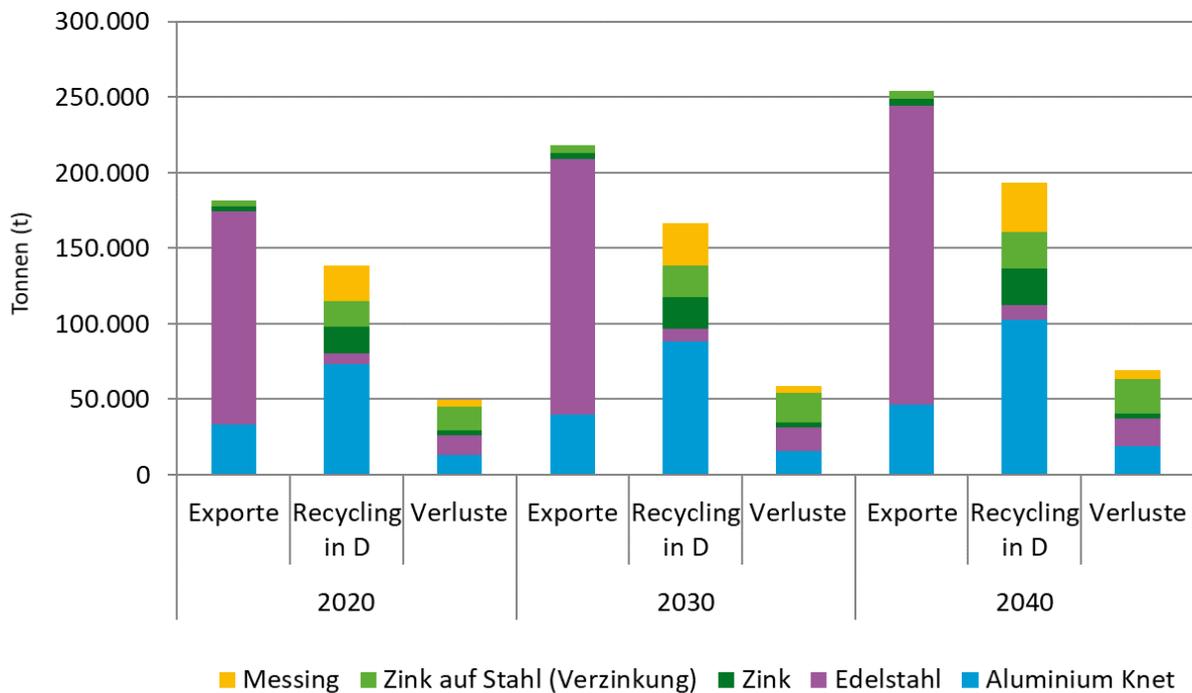
Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 32 zeigt den Verbleib der Metalle aus Sektor 1 nach Durchlauf der Verwertung für die Stützjahre 2020, 2030 und 2040. Es wird deutlich, dass die größten Mengen exportiert werden, was über die hohe Exportquote von Edelstahl zum Recycling im Ausland zu erklären ist. Dies resultiert aus Entwicklungen im Edelstahlsektor in den vergangenen Jahren, die vor allem Verlagerungen von Anlagenkapazitäten aus Deutschland aufweisen. Die entsprechenden Verarbeitungskapazitäten für Edelstahl aus dem anthropogenen Lager Deutschland liegen inzwischen ganz überwiegend außerhalb des Landes. Dagegen wird Messing im Ausgangsjahr innerhalb Deutschlands recycelt. Dies wird auch für die Zukunft so erwartet.

Aluminium hat den größten Anteil an den recycelten Metallen in Deutschland aus dem Sektor 1, während die Verluste sich gleichmäßig auf Zink auf Stahl, Edelstahl und Aluminium verteilen. Die Verluste umfassen Sammel-, Aufbereitungs- und Prozessverluste in Deutschland. Perspektiv werden in Deutschland die Verwertungsmengen aus diesem Sektor absolut vor allem bei

Aluminium und Messing anwachsen. Insgesamt sind die Verlustmengen im Vergleich zu den Mengen in den Export und dem Recycling in Deutschland in untergeordneter Größenordnung.

Abbildung 32: Materialverbleib Sektor 1 Technische Güter im Hochbau 2020 – 2030 - 2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

4.2.2 Sektor 2: Mobile Güter in Gebäuden (ohne Elektrogeräte)

Unter mobilen Gütern (ohne Elektrogeräte) in Gebäuden sind alle Gegenstände in Haushalten zu verstehen, welche Metalle enthalten. Sei es Küchenausstattung aus Edelstahl wie Besteck oder Edelstahlschränke, Musikinstrumente aus Messing, Koffer aus Aluminium oder Spielzeugautos aus Zink, all diese Gegenstände werden in Sektor 2 betrachtet. Die Mengen sind im Vergleich zu anderen Sektoren geringer, dennoch sind sie nicht zu vernachlässigen und werden berücksichtigt.

Untersuchungsgegenstand und Modellansatz

Auch ohne Elektrogeräte sind die metallhaltigen Gegenstände in Haushalten sehr vielfältig. Eine Quantifizierung vorzunehmen ist hierbei schwierig, da zwar die Anzahl der Haushalte in Deutschland bekannt ist, aber der Metallgehalt der Gegenstände in diesen nicht bekannt ist. Ein Bottom-up-Ansatz wäre eine Möglichkeit die Gegenstände zu bilanzieren, jedoch sind hierfür keine verlässlichen Statistiken verfügbar, welche quantifizieren wieviel Musikinstrumente oder Töpfe in einem Haushalt vorhanden sind. Aus diesem Grund wird ein Top-down-Ansatz gewählt. Die funktionellen Einheiten in Sektor 2 sind die Haushaltsausstattung (beweglich) und die Haushaltsausstattung (installiert) pro Haushalt, die für den Top-down-Ansatz in diesem Sektor als Ausgangspunkt dienen. Die installierte Haushaltsausstattung umfasst hierbei nur den Edelstahlanteil in Küchen, während die bewegliche Haushaltsausstattung alle anderen Güter (auch Messer, Töpfe und weitere Küchenutensilien) abbildet.

Der erste Schritt in der Modellierung des Sektors ist die Quantifizierung der funktionellen Einheiten. Hierfür werden die Statistiken der WV Metalle [WV Metalle 2001-2017] sowie der BGR [BGR 2001-2016] zusammen mit dem Anteil an Edelstahl in Küchen sowie Töpfen und

Messern aus [Leffler 1998] zusammengetragen. Bei Messing wird von 7 % der Gesamtproduktionsmenge ausgegangen (Differenzrechnung über die anderen Sektoren). Bei Zink finden 12 % der Mengen [IZA 2019], die in den Druckguss (15 % der Gesamtzinkmenge) gehen, den Weg in die Haushalte, was 1,8 % der Gesamtzinkmenge entspricht. Das Wachstum für diesen Sektor, also die Entwicklung der Anzahl der Haushalte, wird aus der Prognose des Bundesamtes für Statistik entnommen und ab 2035 linear fortgeschrieben [Destatis 2018]. Für die Lebensdauern der beiden funktionellen Einheiten werden Annahmen getroffen: 10 Jahre für bewegliche Haushaltsausstattung und 20 Jahre für installierte Haushaltsausstattung.

Um das deutsche Lager abzubilden wird eine Retromodellierung vorgenommen, welche im Jahr 1990 startet. Die Inputs von 1990 werden auf Basis der Daten des Bundesamtes für Statistik berechnet. Die Entwicklung bis 2015 erfolgt über das Modell mit einer linearen Interpolation. Mittels der Verweilzeitverteilung stellt sich hierdurch ein Gleichgewicht bis 2015 ein. Hierdurch ist eine Berechnung der Zukunft ohne große Sprünge oder unrealistische Zuwächse möglich.

In der folgenden Tabelle finden sich die Metalle, welche in Sektor 2 Mobile Güter in Gebäuden (ohne Elektrogeräte) in den Gütern Haushaltsausstattung (beweglich) und Haushaltsausstattung (installiert) abgebildet werden.

Tabelle 19: Übersicht Sektor 2 Mobile Güter in Gebäuden (ohne Elektrogeräte) (Güter und enthaltene Materialien)

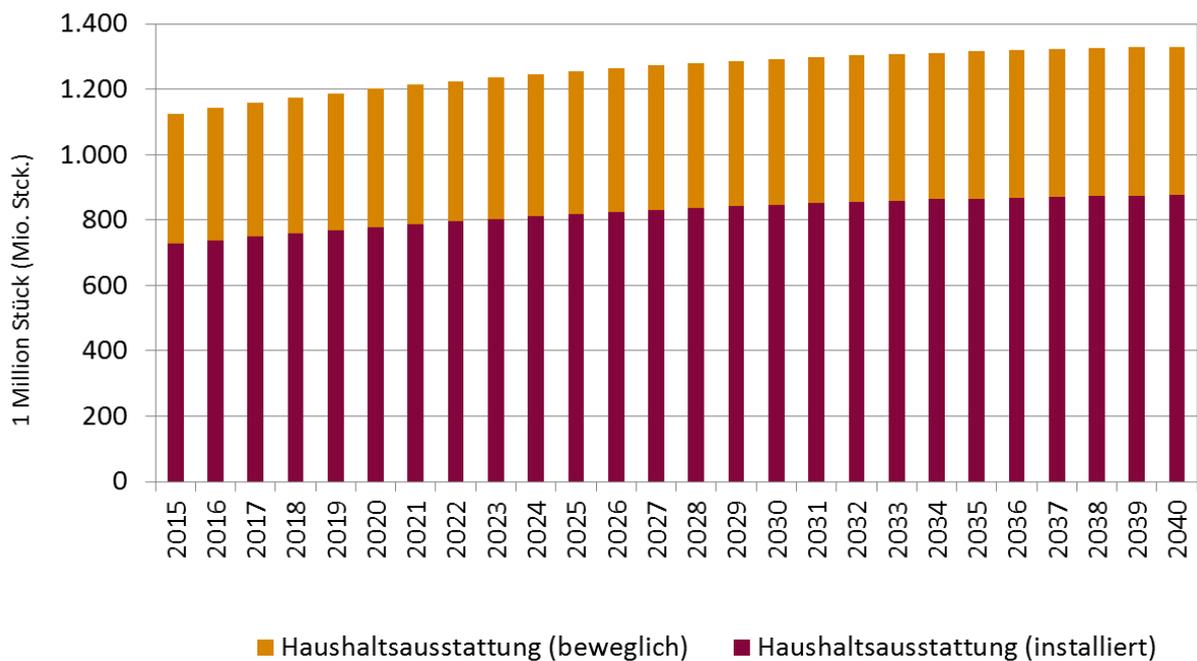
Gut	Aluminium Guss	Aluminium Knet	Edelstahl	Zink	Zink auf Stahl (Verzinkung)	Zinn	Messing	Magnesium	Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial
Haushaltsausstattung (beweglich)	✓	✓	✓	✓			✓		
Haushaltsausstattung (installiert)			✓						

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Datengrundlagen

In Abbildung 33 ist die Entwicklung des Güterbestandes in Sektor 2 dargestellt. Wie oben dargestellt wird vom Startbestand von rund 1,1 Milliarden Stück ausgehend eine Fortschreibung gemäß der Prognose des Statistischen Bundesamtes. Dies führt zu einem Endbestand von rund 1,3 Milliarden in 2040, was einem Wachstum von rund 200 Millionen bzw. 18 % entspricht.

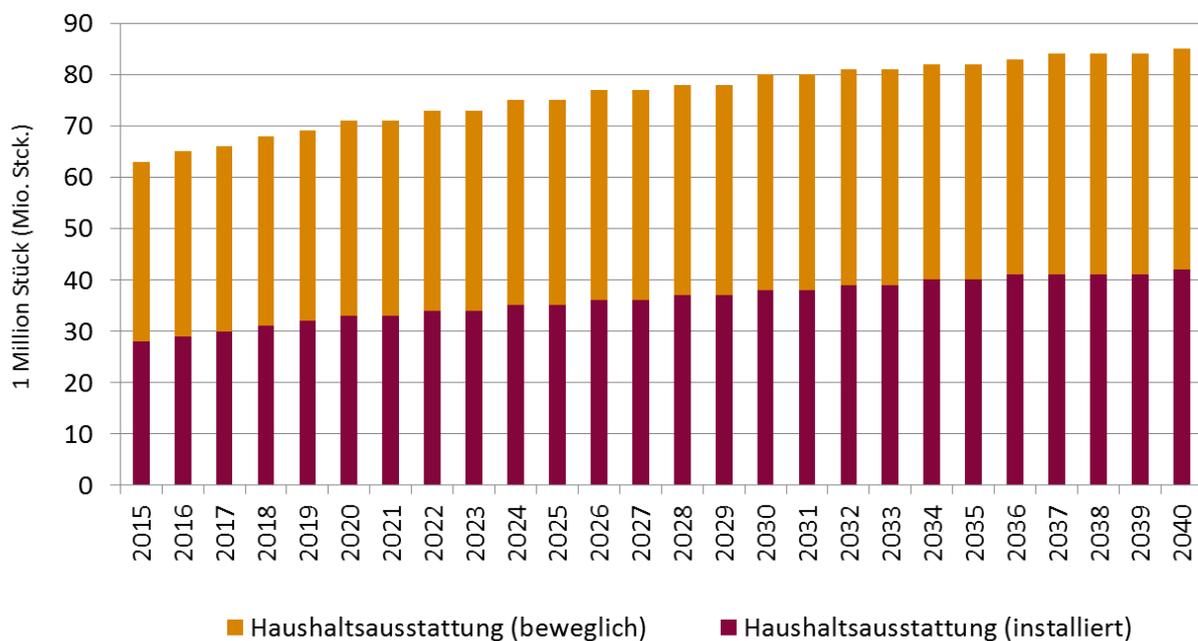
Abbildung 33: Güterbestand Sektor 2 Mobile Güter in Gebäuden (ohne Elektrogeräte) 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

In Abbildung 34 ist die Entnahme von Gütern über den Betrachtungszeitraum dargestellt. Wie zu erkennen ist, steigt die Entnahme von 63 Millionen im Jahr 2015 auf rund 84 Millionen im Jahr 2040, was einem Anstieg von 21 Millionen bzw. 33 % entspricht.

Abbildung 34: Güterentnahme Sektor 2 Mobile Güter in Gebäuden (ohne Elektrogeräte) 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

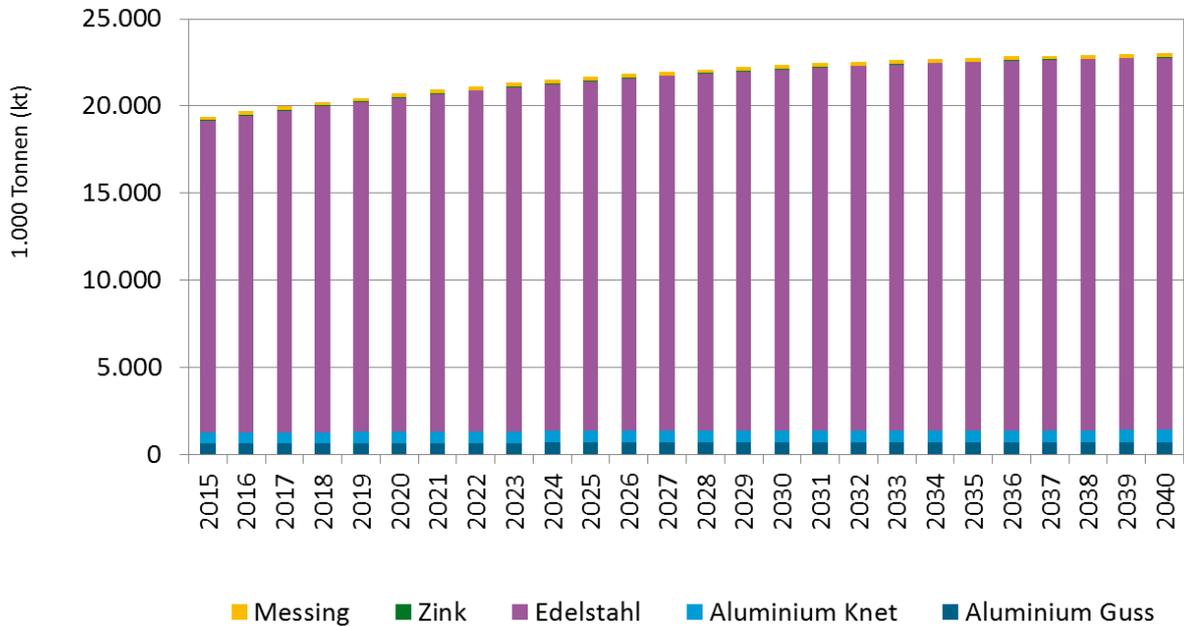
Berechnungsergebnisse

Auf Basis der dargestellten Entwicklungen was In- und Output betrifft sowie der hinterlegten Materialkoeffizienten, ergibt sich der in Abbildung 35 dargestellte Materialbestand sowie die in Abbildung 36 dargestellte Materialentnahme.

Nach Abbildung 35 beläuft sich der Materialbestand 2015 in Sektor 2 auf 19,4 Millionen Tonnen, dominiert von 17,9 Millionen Tonnen Edelstahl. Der Materialbestand wird sich bis 2040 auf 23 Millionen Tonnen erhöhen (+18,8 %).

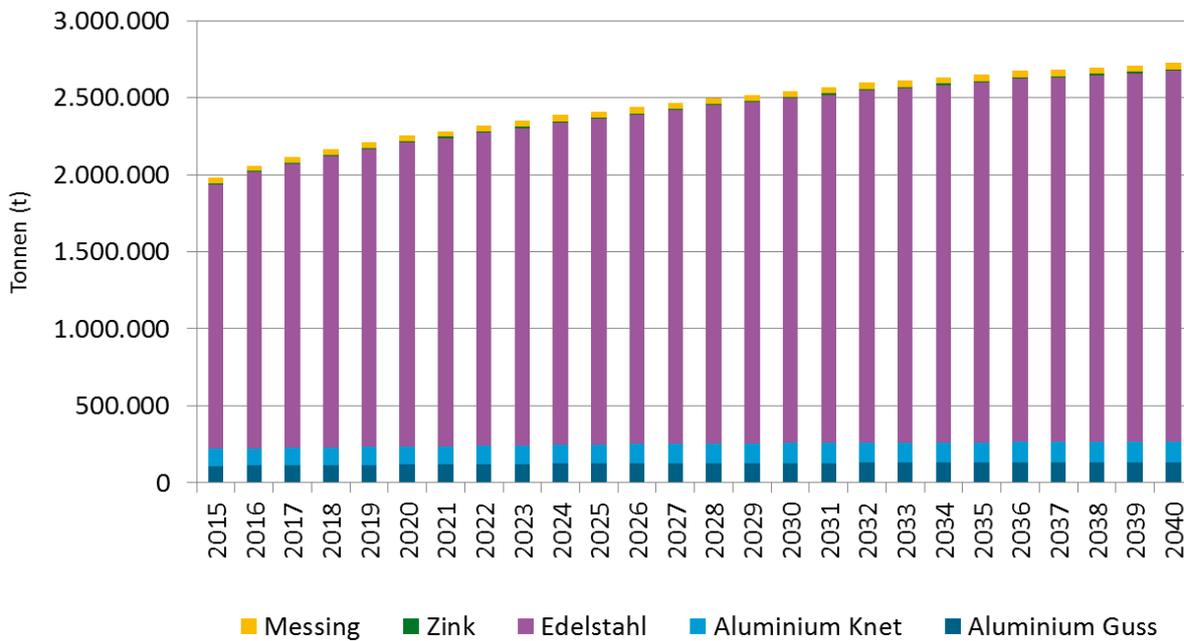
Renovationen, Abriss, Neubau sowie Austausch gebrauchter Haushaltsausstattung führt zu einer Materialentnahme von rund 2 Millionen Tonnen im Jahr 2015 und wird vor allem durch den Edelstahlbedarf in Höhe von rund 1,7 Millionen Tonnen dominiert. Die Materialentnahme nimmt bis zum Jahr 2040 zu und beläuft sich dann auf rund 2,7 Millionen Tonnen (+37,8 %). Tabelle 20 zeigt die berechneten Materialentnahmen zu den Stützjahren 2015, 2020, 2030 und 2040.

Abbildung 35: Materialbestand Sektor 2 Mobile Güter in Gebäuden (ohne Elektrogeräte) 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 36: Materialentnahme Sektor 2 Mobile Güter in Gebäuden (ohne Elektrogeräte) 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

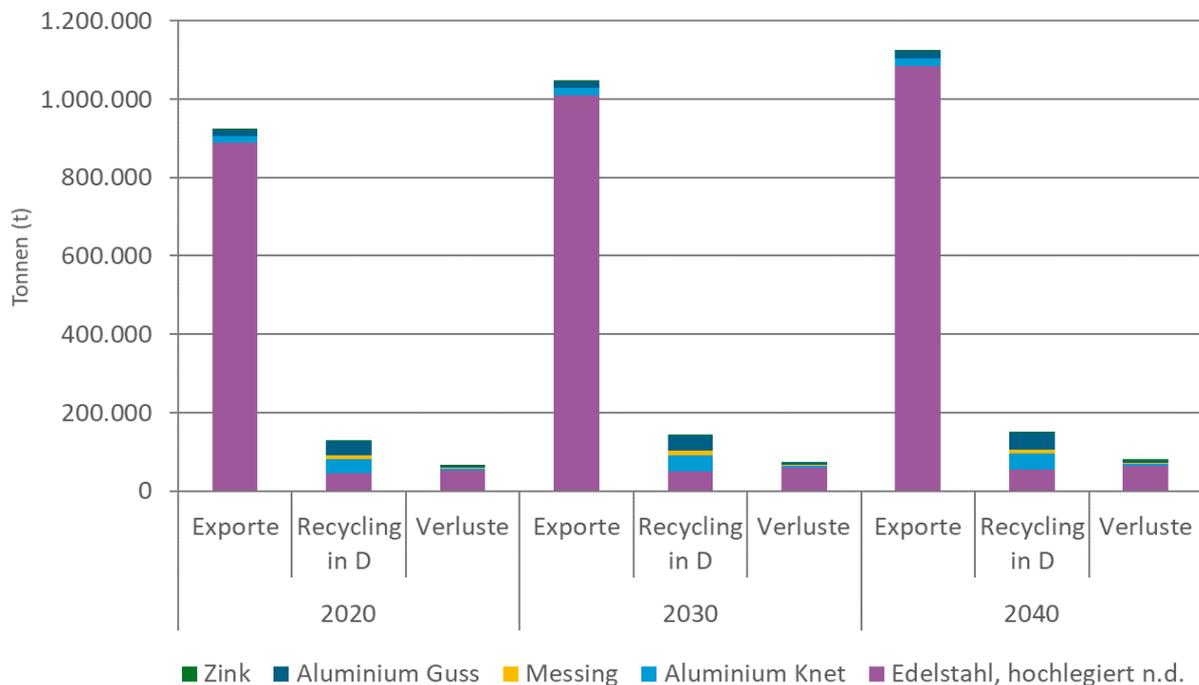
Tabelle 20: Übersicht Sektor 2: Materialentnahme aus dem anthropogenen Lager (in t)

Material	Output 2015	Output 2020	Output 2030	Output 2040	Summe 2015 – 2040
Aluminium Guss	109.731	117.743	128.726	132.824	3.238.866
Aluminium Knet	109.731	117.743	128.726	132.824	3.238.866
Edelstahl	1.719.279	1.974.528	2.238.473	2.411.195	55.849.894
Zink	6.275	6.733	7.361	7.596	185.217
Messing	34.908	37.457	40.951	42.255	1.030.374

Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 37 zeigt den Verbleib der Metalle aus Sektor 2 nach Durchlauf der Verwertung für die Stützjahre 2020, 2030 und 2040. Es wird deutlich, dass von den anfallenden Mengen der ganz überwiegende Teil exportiert wird, was durch die hohe Exportquote des diesen Sektor dominierenden Edelstahls zu erklären ist. Aluminium, sowohl Knet- als auch Gusslegierung, hat zusammen mit Edelstahl den größten Anteil an den recycelten Metallen in Deutschland. Die Verluste werden vor allem vom Edelstahl dominiert; allerdings ist die Größenordnung der Verluste insgesamt sehr gering.

Abbildung 37: Materialverbleib Sektor 2 Mobile Güter in Gebäuden (ohne Elektrogeräte) 2020 – 2030 - 2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

4.2.3 Sektor 3: Mobile Güter in Gebäuden (Elektrogeräte)

Elektrogeräte sind im täglichen Leben überall zu finden. Vom Handy bis zum Kühlschrank hat jeder deutsche Haushalt ein Lager an Metallen in seinen Elektrogeräten zu Hause. Vor allem bei

Zinn findet sich ein großer Teil des deutschen Lagers in Elektrogeräten. Insgesamt sind alle betrachteten Metalle in den verschiedenen Elektrogerätetypen vertreten, seien es Aluminium, Edelstahl und Magnesium in Gehäusen, Messing in Wärmetauschern oder Schrauben, Zinn im Lötzinn, Zink in Druckgussteilen oder Magnetwerkstoffe in kleinen Elektromotoren. Diese Vielfalt und auch die Bedeutung für die Anwendung von Zinn machen Sektor 3 wichtig für die Betrachtung.

Untersuchungsgegenstand und Modellansatz

Die Elektrogeräte in Haushalten sind sehr unterschiedlich und reichen vom 100 g Handy bis zum 100 kg Kühlschrank. Es existieren verschiedene Sammelgruppen für Elektrogeräte, jedoch sind auch innerhalb dieser Sammelgruppen die Unterschiede groß (z. B. Staubsauger und Toaster). Aus diesem Grund werden alle Elektronikprodukte für die Bilanzierung in diesem Vorhaben in einem generischen Elektronikprodukt zusammengefasst. Die funktionelle Einheit in Sektor 3 ist also die Anzahl eines generischen Elektronikproduktes.

Der erste Schritt in der Modellierung des Sektors ist die Quantifizierung der funktionellen Einheit. Hierfür werden die Ergebnisse des Projekts ProSUM auf der Urban Mine Plattform [Urban Mine Plattform 2019] genutzt. Dort sind die Metallmengen, welche in Elektrogeräten, die auf den deutschen Markt gebracht werden, dargestellt. Da die Auflösung der einzelnen Sammelkategorien zu keiner nennenswerten Verbesserung der Daten führt, werden die Daten integriert und auf die Gesamtmenge an Elektronikprodukten bezogen, um ein generisches Elektronikprodukt zu generieren, welches als funktionelle Einheit fungiert. Die Lebensdauern für Produkte aus den verschiedenen Sammelkategorien aus der Studie von [WRAP 2015] werden mit der Anzahl der einzelnen Kategorien der Urban Mine Plattform kombiniert. Dies ergibt eine mittlere Lebensdauer von 8,6 Jahren. Um das Wachstum des Sektors zu ermitteln, wird die Entwicklung der Anzahl der Elektronikprodukte, die auf den Markt gebracht werden, im Zeitraum zwischen 2000 und 2015 analysiert. Hier wird auch auf Daten der Urban Mine Plattform zurückgegriffen. Es ergibt sich ein Wachstum von 1,7 % pro Jahr. Es handelt sich hierbei um einen Bottom-up-Ansatz.

Um das deutsche Lager abzubilden wird eine Retromodellierung vorgenommen, welche im Jahr 2000 startet. Die Inputs von 2000 bis 2014 werden analog zur Modellierung der Zukunft mit der Wachstumsrate von 1,7 % rückgerechnet. Mittels der Verweilzeitverteilung stellt sich hierdurch ein Gleichgewicht bis 2015 ein. Hierdurch ist eine Berechnung der Zukunft ohne große Sprünge oder unrealistische Zuwächse möglich.

In der folgenden Tabelle finden sich die Metalle, welche in Sektor 3 im Gut des generischen Elektronikproduktes abgebildet werden.

Tabelle 21: Übersicht Sektor 3 Mobile Güter in Gebäuden (Elektrogeräte) (Güter und enthaltene Materialien)

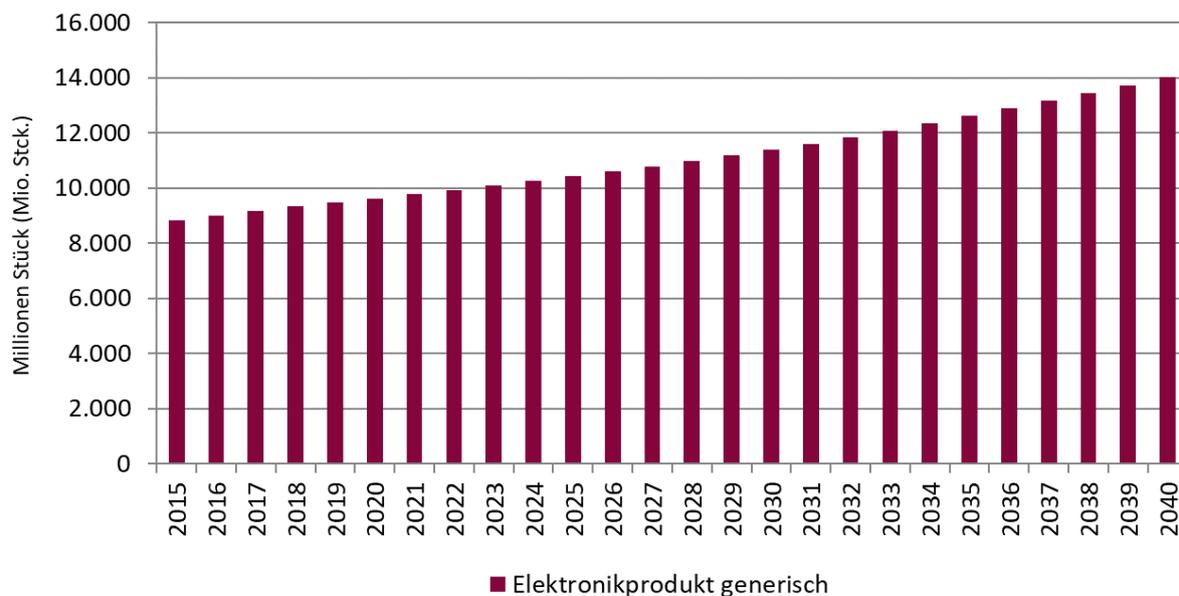
Gut	Aluminium Guss	Aluminium Knet	Edelstahl	Zink	Zink auf Stahl (Verzinkung)	Zinn	Messing	Magnesium	Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial
Elektronikprodukt generisch	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Datengrundlagen

In Abbildung 38 ist die Entwicklung des Güterbestandes in Sektor 3 dargestellt. Wie oben dargestellt wird ausgehend vom Startbestand von fast neun Milliarden Elektrogeräten eine Fortschreibung mit einer Wachstumsrate von 1,7 % durchgeführt. Dies führt zu einem Endbestand von rund 14 Milliarden in 2040, was einem Wachstum von über fünf Milliarden zwischen 2015 und 2040 bzw. fast 60 % entspricht.

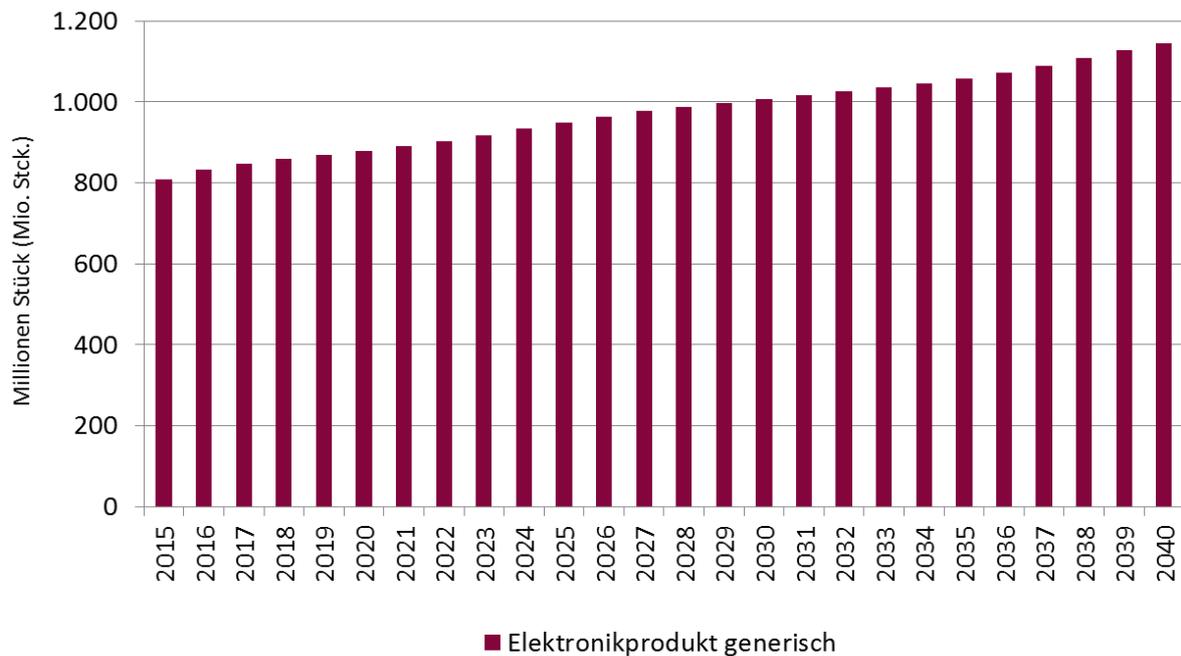
Abbildung 38: Güterbestand Sektor 3 Mobile Güter in Gebäuden (Elektrogeräte) 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

In Abbildung 39 ist die Entnahme von Gütern über den Betrachtungszeitraum dargestellt. Wie zu erkennen ist, steigt die Entnahme von rund 0,8 Milliarden im Jahr 2015 auf rund 1,1 Milliarden im Jahr 2040, was einem Anstieg von fast 350 Millionen bzw. rund 30 % entspricht.

Abbildung 39: Güterentnahme Sektor 3 Mobile Güter in Gebäuden (Elektrogeräte) 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Berechnungsergebnisse

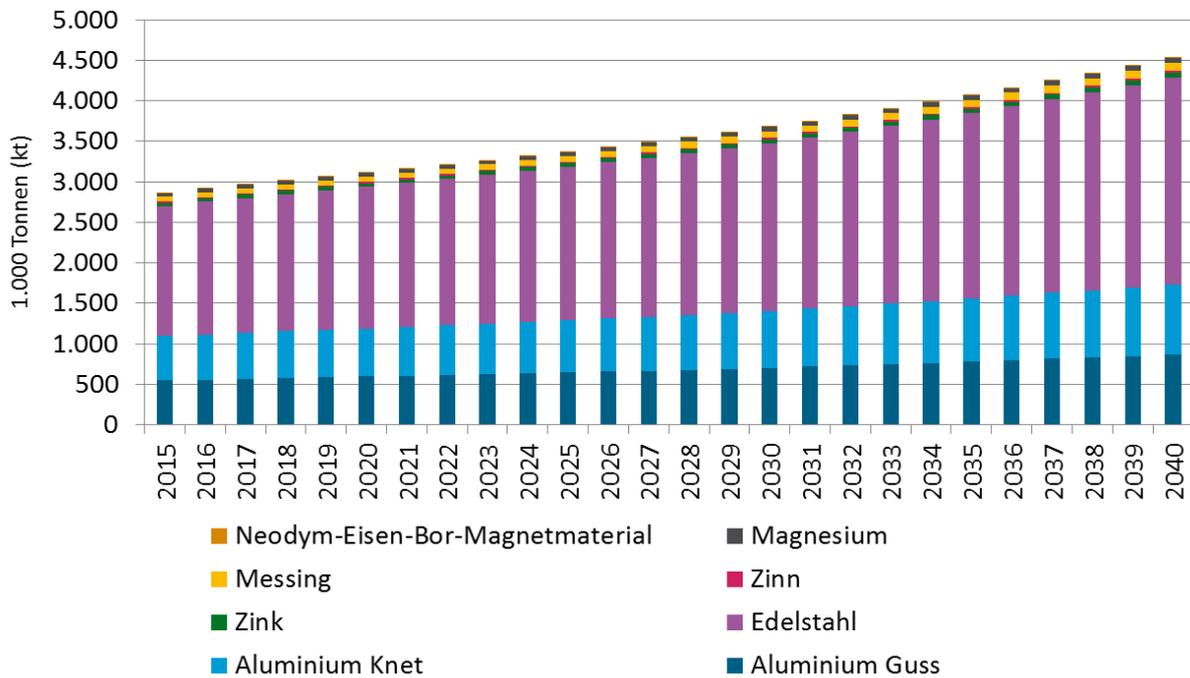
Auf Basis der dargestellten Entwicklungen hinsichtlich In- und Output sowie der hinterlegten Materialkoeffizienten, ergibt sich der in Abbildung 40 dargestellte Materialbestand sowie die in Abbildung 41 dargestellte Materialentnahme.

Nach Abbildung 40 beläuft sich der Materialbestand 2015 in Sektor 3: Mobile Güter in Gebäuden (ohne Elektrogeräte) auf 2,9 Millionen Tonnen, dominiert von 1,6 Millionen Tonnen Edelstahl und 0,6 Millionen Tonnen Aluminium. Der Materialbestand wird sich bis 2040 auf 4,5 Millionen Tonnen erhöhen (+58,8 %).

Der kontinuierliche Austausch von Elektrogeräten bewirkt eine Materialentnahme von rund 260.000 Tonnen im Jahr 2015 und wird vor allem durch den Edelstahlbedarf in Höhe von rund 150.000 Tonnen dominiert. Die Materialentnahme nimmt bis zum Jahr 2040 zu und beläuft sich dann insgesamt auf rund 370.000 Tonnen (+29,3 %).

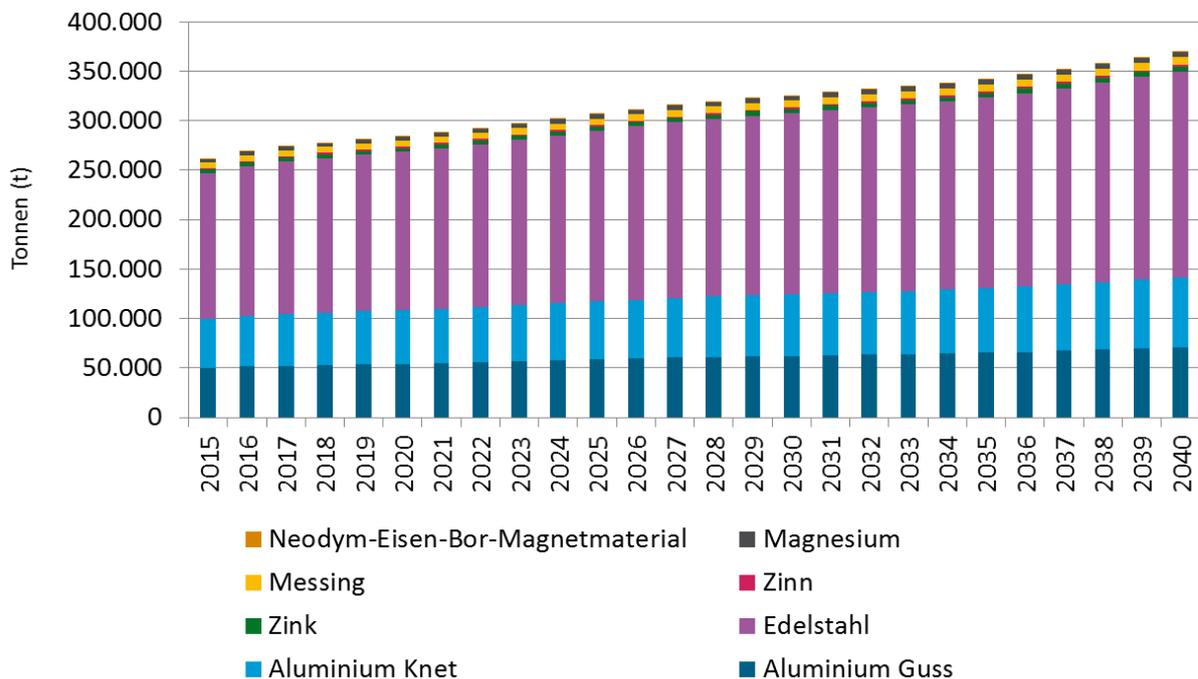
Tabelle 20 zeigt die berechneten Materialentnahmen zu den Stützjahren 2015, 2020, 2030 und 2040.

Abbildung 40: Materialbestand Sektor 3 Mobile Güter in Gebäuden (Elektrogeräte) 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 41: Materialentnahme Sektor 3 Mobile Güter in Gebäuden (Elektrogeräte) 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

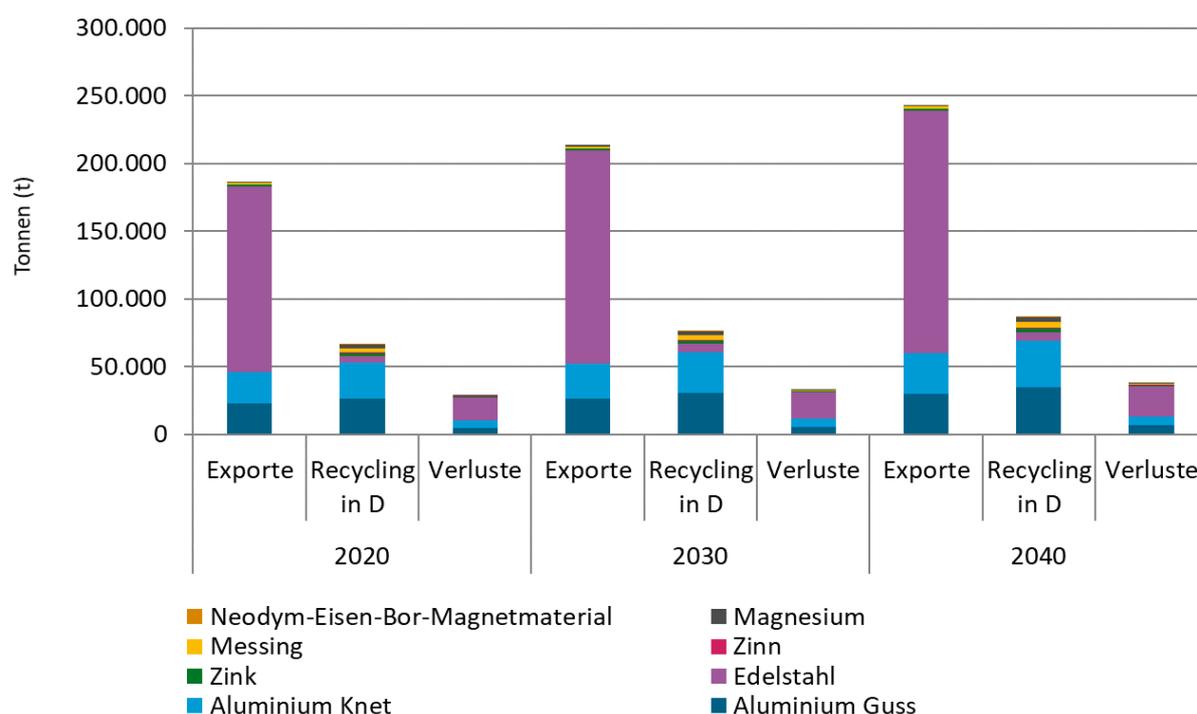
Tabelle 22: Übersicht Sektor 3: Materialentnahme aus dem anthropogenen Lager (in t)

Material	Output 2015	Output 2020	Output 2030	Output 2040	Summe 2015 - 2040
Aluminium Guss	49.937	54.268	62.111	70.720	1.565.036
Aluminium Knet	49.937	54.268	62.111	70.720	1.565.036
Edelstahl	147.099	159.859	182.962	208.321	4.610.165
Zink	3.493	3.796	4.345	4.947	109.475
Zinn	1.311	1.425	1.631	1.857	41.089
Messing	5.650	6.140	7.027	8.001	177.070
Magnesium	3.571	3.881	4.442	5.058	111.932
Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial	618	671	768	875	19.356

Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 42 zeigt den Verbleib der Metalle aus Sektor 3 nach Durchlauf der Verwertung für die Stützjahre 2020, 2030 und 2040. Es wird deutlich, dass die größten Mengen exportiert werden, was über die hohe Exportquote von Edelstahl zu erklären ist. Aluminium, sowohl Knet- als auch Gusslegierung, hat den größten Anteil an den recycelten Metallen in Deutschland. Die Verluste werden vor allem vom Edelstahl dominiert – sind aber insgesamt in untergeordneter Größenordnung.

Abbildung 42: Materialverbleib Sektor 3 Mobile Güter in Gebäuden (Elektrogeräte) 2020 – 2030 - 2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

4.2.4 Sektor 4: Stromerzeugungsanlagen

Ob als konstruktives Bauteil, Gehäuseblock oder als Bestandteil von Steuerungselementen; Metalle erfüllen unterschiedlichste Funktionen im Bereich der Stromerzeugungsanlagen. Durch den Umbau und die Dekarbonisierung des Energiesektors wird sich die Zusammensetzung der Stromerzeugungsanlagen in Deutschland bis 2050 deutlich verändern. Nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz [BMJV 2017] sollen 80 % des Bruttostromverbrauchs aus erneuerbaren Energien stammen. Weiterhin bewirkt der politisch beschlossene Atomausstieg eine zeitlich gestaffelte Abschaltung der Atomkraftwerke in Deutschland bis 2022. Weiterhin wurde von der Bundesregierung die schrittweise Abschaltung der deutschen Kohlekraftwerke bis zum Jahr 2038 beschlossen. Der Wandel im Energiesektor betrifft damit nicht nur die genutzten Energieträger bzw. -quellen, sondern bedeutet auch eine Umstellung von zentralen Großkraftwerken hin zu eher dezentralen Einheiten mit geringerer Leistung pro Objekt. Hinzu kommt ein – im Vergleich zu konventionellen Stromerzeugungsanlagen – deutlich veränderte Materialeinsatz bei EE-Anlagen. Sektor 4 ist daher für die Betrachtung der zukünftigen Inputs und Output Mengenströme des anthropogenen Materiallagers von großer Bedeutung.

Untersuchungsgegenstand und Modellansatz

Betrachtet wird der zur Stromproduktion genutzte Kraftwerkspark in Deutschland. Dieser umfasst einerseits Kraftwerke mit fossilen Brennstoffen wie Braun-, Steinkohle- und Gaskraftwerke sowie Atomkraftwerke. Andererseits werden Kraftwerke auf Basis erneuerbarer Energien wie Windkraftanlagen, Photovoltaik, Geothermie etc. betrachtet.

Da sowohl die amtliche Statistik als auch Untersuchungen und Szenarien zum Bestand und Entwicklung des Kraftwerksparks als Bezugsgröße 1 Megawattstunde (MW) installierte Leistung anlegen, wird diese Einheit als Funktionale Einheit (FU) für die Modellierung verwendet.

Der Modellierungsansatz erfolgt Bottom-up, d. h. es werden Materialkennwerte für die in Tabelle 23 dargestellten Güter (Stromerzeugungsanlagen) ermittelt. Hauptdatenquelle hierfür ist die Ökobilanzdatenbank ecoinvent in der Version 3.5, ergänzende Angaben zum Materialeinsatz pro MW installierter Leistung sind weiteren Literaturquellen entnommen [Büttner et al. 2016; Wetzel 2015; Wetzel 2019; BDEW 2018]. Tabelle 23 zeigt eine Übersicht aller in der Modellierung berücksichtigten Güter (d. h. Kraftwerke) sowie die darin enthaltenen Metalle, die Untersuchungsgegenstand des vorliegenden Berichts sind.

Tabelle 23: Übersicht Sektor 4 Stromerzeugungsanlagen (Güter und enthaltene Materialien)

Gut	Aluminium Guss	Aluminium Knet	Edelstahl	Zink	Zink auf Stahl (Verzinkung)	Zinn	Messing	Magnesium	Neodym- Eisen- Bor- Magnet- material
Atomkraftwerke	✓	✓	✓						
Braunkohlekraftwerke	✓	✓	✓	✓	✓		✓		
Steinkohlekraftwerke	✓	✓	✓	✓	✓		✓		
Gaskraftwerke	✓	✓	✓	✓			✓		
WEA Onshore mit perm. Generator	✓	✓	✓		✓	✓			✓
WEA Onshore mit Getriebe oder fremderregtem Generator	✓	✓	✓		✓	✓			✓
WEA Offshore mit perm. Generator	✓	✓	✓		✓	✓			✓
WEA Offshore mit Getriebe oder fremderregtem Generator	✓	✓	✓		✓	✓			✓
PV-Anlagen		✓	✓		✓				
Biomasseanlagen	✓	✓	✓						
Geothermiekraftwerke			✓						

Quelle: eigene Darstellung

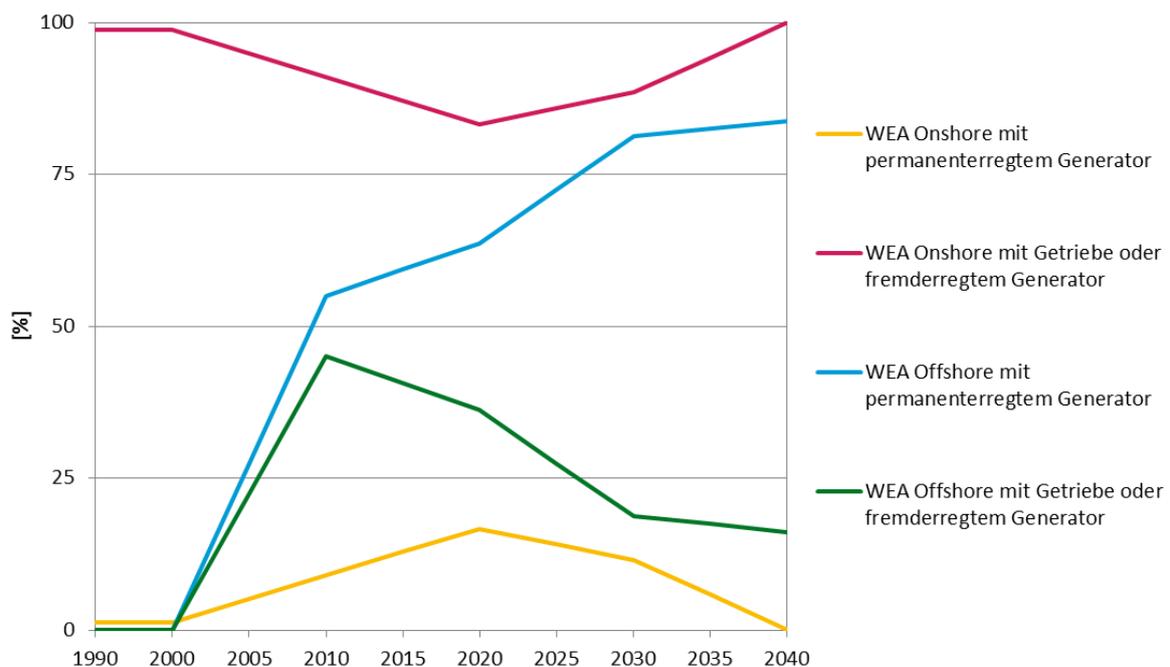
Aufbauend auf der offiziellen Statistik zur installierten Leistung aus erneuerbaren Energien [BMWI und AGEE-Stat 2019] wurden einzelne Anlagentypen zusammenfasst. Dies betrifft vor allem die unterschiedlichen Technologien zur Nutzung von Biomasse (Biogas, Biomethan, Klärgas, biogene Brennstoffe etc.). Stellvertretend für diese Anlagentypen werden die Materialkennwerte einer Biogasanlage und eines mittelgroßen Blockheizkraftwerks zu einer generischen Biogasanlage in der Modellierung berücksichtigt.

Für den Bereich der Windenergieanlagen (WEA) wird zwischen Anlagen an Land (Onshore) und Anlagen auf See (Offshore) unterschieden. Diese Differenzierung findet sich sowohl in der Statistik zur Entwicklung des Anlagenausbaus als auch bezüglich der Zielformulierung zum weiteren Ausbau [EEG 2017]. Weiterhin wird die Besonderheit berücksichtigt, dass in WEA mit permanenterregtem Generator relevante Mengen an Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial zum Einsatz kommen (650 kg/MW, siehe [Welzel 2019]). Daher werden die unterschiedlichen Antriebstechnologien in die beiden Gruppen „mit Getriebe oder fremderregtem Generator“ und „mit permanenterregtem Generator“ differenziert.

Da sich die Marktanteile der unterschiedlichen Antriebsformen in der Vergangenheit verändert haben und anzunehmen ist, dass sich dies auch in der Zukunft fortsetzt, wurde die in Abbildung 43 dargestellten Marktanteile für die Modellierung in den jeweiligen 5-Jahres Perioden genutzt. Die Abbildung zeigt, dass im Onshore-Bereich Anlagen mit Getriebe oder fremderregtem

Generator in der Vergangenheit klar dominierten aber bis zum Jahr 2020 Marktanteile an Anlagen mit permanentem Generator verlieren. Mittelfristig ist zu erwarten, dass die Anteile von Antrieben mit Getriebe oder fremderregtem Generator wieder zurückgehen. Im Offshore-Bereich sind Anlagen mit permanenterregtem Generator deutlich häufiger anzutreffen. Es wird erwartet, dass sich diese Antriebstechnologie bis 2040 immer stärker durchsetzen wird und dann Marktanteile von über 75 % erreicht.

Abbildung 43: Marktanteile verschiedener Antriebstechnologien in neu installierten Windenergieanlagen nach Jahren in %



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von [Welzel 2019]

Um die Vielzahl unterschiedlicher Photovoltaikmodule abzubilden, wird ein generischer Datensatz auf Basis von Ökobilanz-Datensätzen gebildet, der monokristallinen Siliziumzellen beschreibt und vor allem bezüglich des Aluminium Rahmen relevant ist. Hauptquelle für die Materialkennwerte ist ecoinvent. Neben dem Datensatz für das PV Panels, wurden die Datensätze zur Montage/Befestigung (flach auf dem Dach, Dachaufsteller und Freifläche) jeweils zu 1/3 berücksichtigt.

Wasserkraftanlagen werden nicht berücksichtigt. Grund hierfür ist, dass sich die installierten Leistungen in den zurückliegenden Jahren kaum verändert haben und keine signifikante Steigerung der installierten Leistungen erwartet wird.

Weiterhin nicht betrachtet werden reine Wärmekraftwerke, die keine gekoppelte Stromproduktion beinhalten. Kraftwerke dieser Kategorie dienen der Bereitstellung lokaler, netzgebundener Wärme und nutzen unterschiedliche Kraftstoffe, insbesondere Erd- und Raffineriegas. Es wird davon ausgegangen, dass deren abgegebene Wärmemenge aufgrund der sinkender Fernwärmenachfrage des Gebäudesektors zunächst abnimmt, langfristig aber wieder steigen wird [Öko-Institut und ISI 2015]. Eine kurze Recherche zur Datenverfügbarkeit bzgl. der Materialzusammensetzung reiner Wärmekraftwerke ergab, dass keine relevanten Mengen der im Projekt fokussierten Metalle enthalten sind.

Das Vorgehen zur Modellierung der zu erwartenden Entnahmen aus dem anthropogenen Lager (Outflows) mittels DyMAS ist zwischen EE-Anlagen und konventionellen Stromerzeugungsanlagen grundsätzlich verschieden.

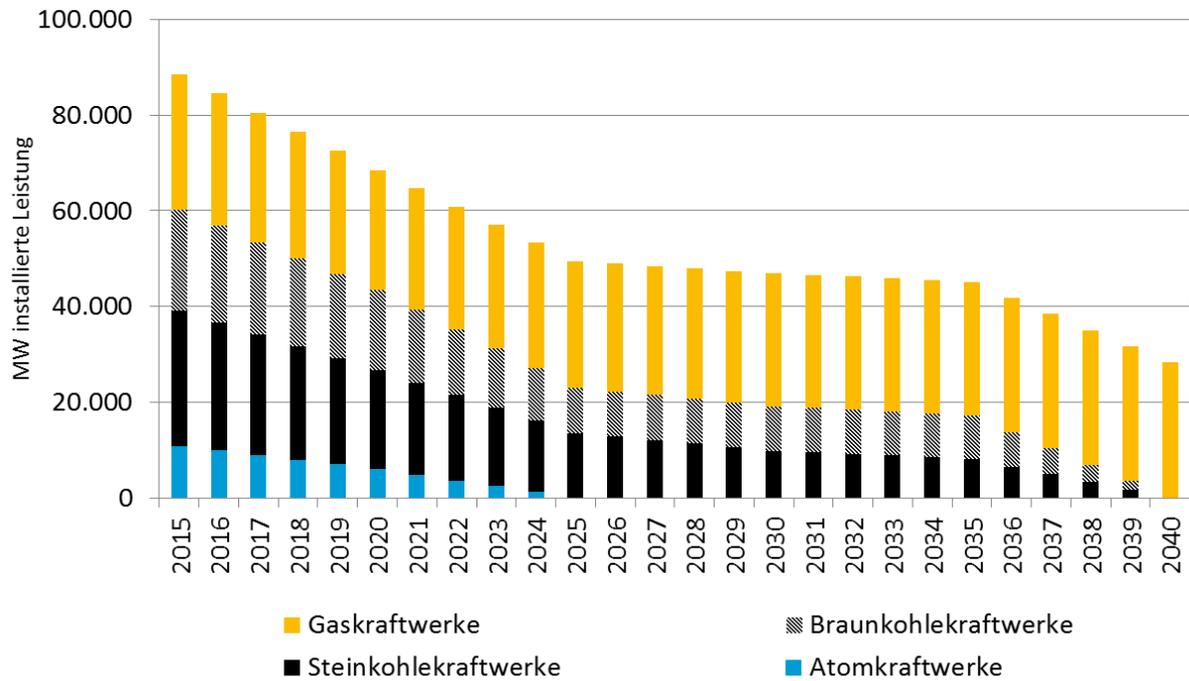
Für EE-Anlagen existiert eine gute Datenbasis, die den Anlagenbestand seit 1990 wiedergibt [BMWI und AGEE-Stat 2019]. Die zurückliegende Entwicklung, bestehend aus den jährlich zugebauten Erzeugungskapazitäten ist in der DyMAS Datenbank abgebildet. Die Entnahme von EE-Anlagen aus dem anthropogenen Lager wird vom DyMAS System errechnet und basiert auf Annahmen zur Lebensdauer, die für jedes Gut hinterlegt sind. Mittels Weibull-Funktion und der dazugehörigen Skalen- und Formparameter ergeben sich Werte für die jährliche Entnahme der Güter und der darin enthaltenen Materialien. Inputseitig wird unterschieden zwischen Netto-Zubau und Ersatzbedarf unterschieden. Der Netto-Zubau drückt aus, wieviel Megawatt Erzeugungskapazität pro Jahr und Anlagenart errichtet werden muss, um die politisch vereinbarten Ziele im Bereich der EE-Anlagen zu erreichen. EE-Anlagen haben im Gegensatz zu konventionellen Kraftwerken mit rund 20 Jahren eine vergleichbar kurze Lebensdauer. Das hat zur Folge, dass im Betrachtungszeitraum bis 2040 viele Anlagen ihr Lebensende erreichen und als Outflow aus dem anthropogenen Lager frei werden. Damit das politische Ausbauziel nicht verfehlt wird, müssen diese Kapazitäten in selben Umfang ersetzt werden. Ein solches Repowering bedeutet in der Praxis, dass z. B. alte Windenergieanlagen durch neue, leistungsfähigere Anlagen ersetzt werden. Zum Teil kann ein Repowering aufgrund rechtlicher Restriktionen nicht durchgeführt werden, wenn z. B. Standorte ungeeignet für den Bau leistungsstärkerer und damit höherer Anlagen sind [Quentin et al. 2018]. Für die hier durchgeführte Modellierung wurden solche Fälle nicht berücksichtigt und vereinfacht angenommen, dass alle Anlagen, die im Betrachtungszeitraum aus dem anthropogenen Lager entnommen werden, 1:1 in derselben 5-Jahres Periode ersetzt werden.

Für alle fossilen Kraftwerke wird auf die dynamische Berechnung des Outputs durch DyMAS verzichtet. Hintergrund ist, dass es politisch beschlossen ist Atomkraftwerke bis 2022 sowie Stein- und Braunkohlekraftwerke bis 2038 abzuschalten und anschließend rückzubauen, für konventionelle Kraftwerke werden daher keine Materialien für Bau oder Instandhaltung benötigt. Bilanztechnisch ist nur der Output relevant, also das Freiwerden von Materialien aus dem Bestand. Dieser Outflow wird auf Basis der Szenarien des Netzentwicklungsplans Stroms [50Hertz Transmission et al. 2019] sowie Berechnungen des Öko-Instituts [Öko-Institut und ISI 2015] für jede 5-Jahres Periode berechnet und in DyMAS hinterlegt. Entsprechend der genannten Quellen wird für Gaskraftwerke angenommen, dass die installierten Kraftwerksleistungen zunächst leicht zurückgehen, bis 2040 aber insgesamt ansteigen.

Entwicklung des Anlagenbestands konventioneller Kraftwerke 2015-2040

Auf Basis des beschriebenen Vorgehens ergibt die in Abbildung 44 dargestellte Bestandsentwicklung des konventionellen Kraftwerkspark in Deutschland zwischen 2015 und 2040. Zu erkennen ist, wie sich die politisch vereinbarte Abschaltung aller Atomkraftwerke bis 2022 durch einen sukzessiven Rückgang der Anlagenkapazitäten darstellt. Die installierten Leistungen von Stein- und Braunkohlekraftwerken gehen bis 2030 deutlich zurück, bleiben zwischen 2030 und 2035 konstant und gehen bis 2040 ebenfalls auf null zurück. Die installierte Leistung von Gaskraftwerken steigt, nach einem Rückgang zwischen 2015 und 2020, bis 2040 wieder an und liegt 2040 auf ungefähr dem Niveau von 2015.

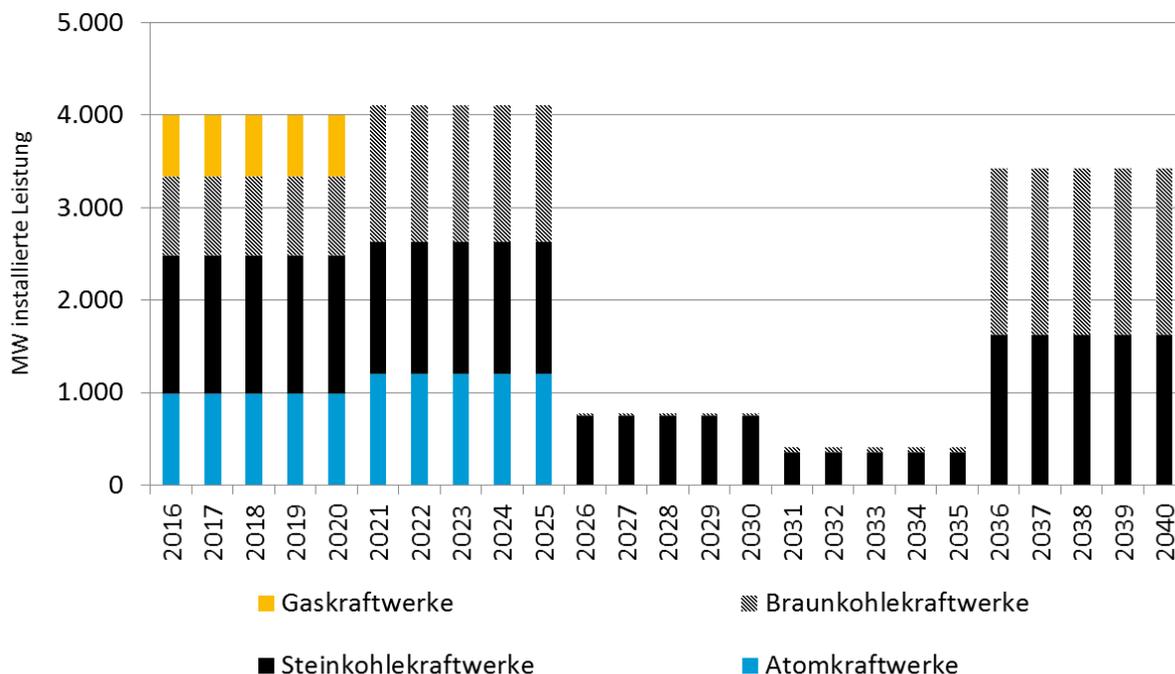
Abbildung 44: Güterbestand Sektor 4 Stromerzeugungsanlagen: konventionelle Kraftwerke 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Die folgende Abbildung 45 zeigt den Umfang installierter Kraftwerksleistung, der jährlich durch Abschaltung und Rückbau zwischen 2015 und 2040 vom Netz geht.

Abbildung 45: Güterentnahme Sektor 4 Stromerzeugungsanlagen: konventionelle Anlagen 2015-2040



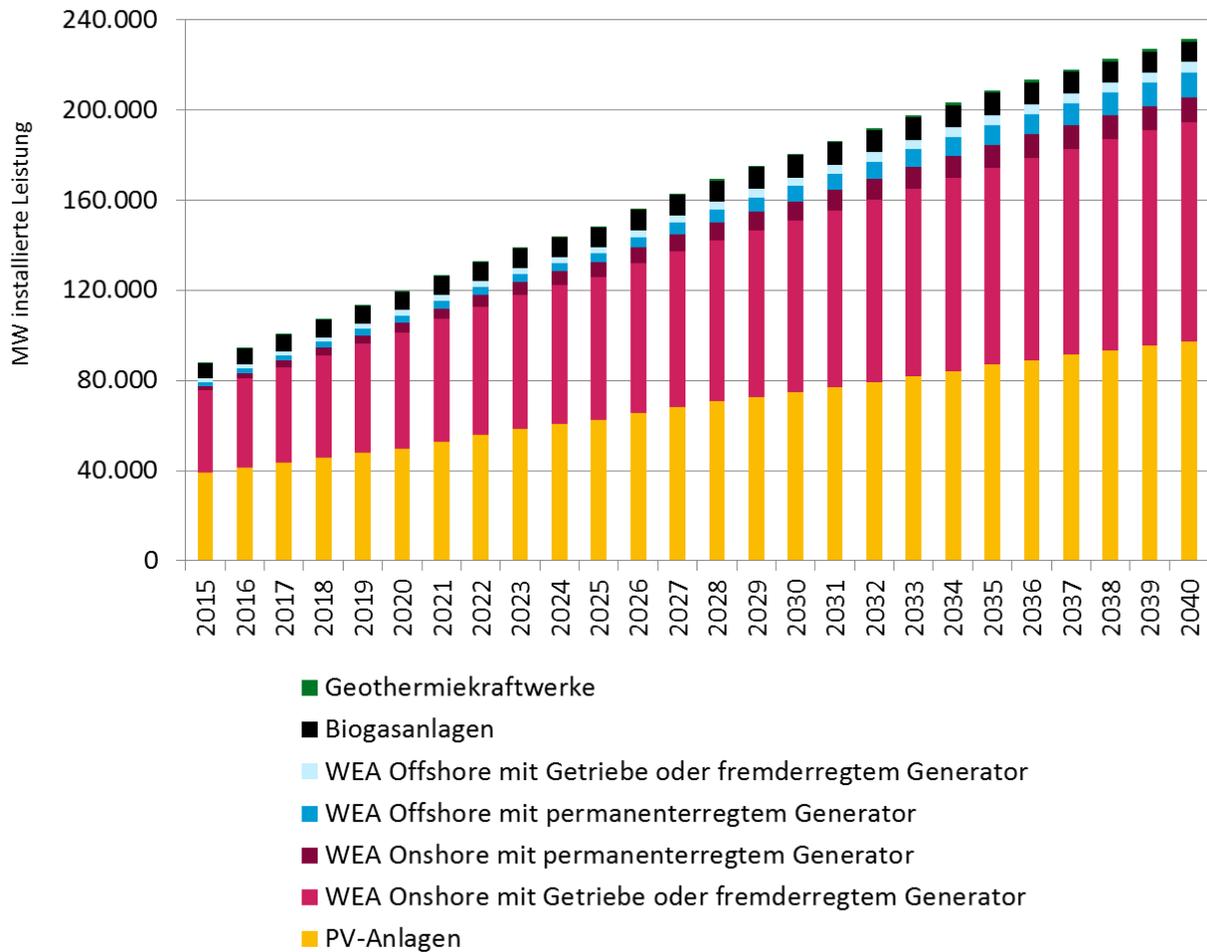
Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Entwicklung des Anlagenbestands EE-Anlagen 2015-2040

Die Entwicklung des Anlagenbestands für EE-Anlagen basiert im Wesentlichen auf dem Erneuerbare-Energien-Gesetz formulierten Ausbaupfad (§4). Darin wird für Windenergieanlagen das Ziel formuliert: einen jährlichen Brutto-Zubau von Windenergieanlagen an Land mit einer installierten Leistung von a) 2 800 Megawatt in den Jahren 2017 bis 2019 und b) 2 900 Megawatt ab dem Jahr 2020 zu erreichen. Weiterhin soll erreicht werden: eine Steigerung der installierten Leistung von Windenergieanlagen auf See auf a) 6 500 Megawatt im Jahr 2020 und b) 15 000 Megawatt im Jahr 2030. Für Solaranlagen soll ein jährlicher Brutto-Zubau mit einer installierten Leistung von 2 500 Megawatt und ein jährlicher Brutto-Zubau von Biomasseanlagen mit einer installierten Leistung von a) 150 Megawatt in den Jahren 2017 bis 2019 und b) 200 Megawatt in den Jahren 2020 bis 2022 erreicht werden.

Für die weitere Entwicklung der installierten Leistungen 2030-2040 wurde auf das Klimaschutzszenario des Öko-Instituts zurückgegriffen [Öko-Institut und ISI 2015].

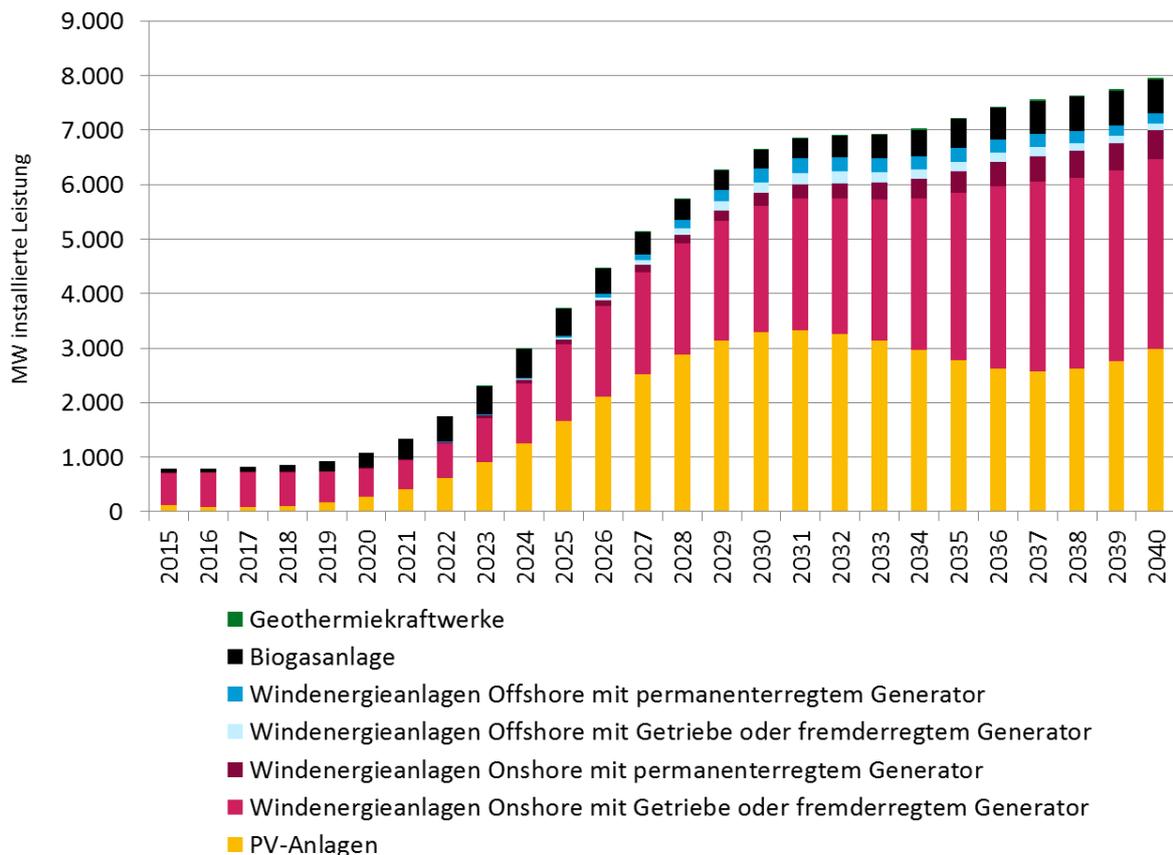
Abbildung 46: Güterbestand Sektor 4 Stromerzeugungsanlagen: EE- Anlagen 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

In Sektor 4 kommt als Besonderheit zum Tragen, dass für die meisten EE-Anlagen eine Lebensdauer von 20 Jahren anzunehmen ist und dies zur Folge hat, dass bereits im Betrachtungszeitraum ein signifikanter Anteil von heutigen Bestandsanlagen den End-of-Life erreicht hat und aus dem anthropogenen Lager freigesetzt wird. Um die Ausbauziele zu erreichen, müssen diese Anlagen ersetzt werden und gehen als zusätzlicher Input ins System ein. Die entsprechenden Outputs, die daraus resultieren, sind in Abbildung 47 dargestellt.

Abbildung 47: Güterentnahme Sektor 4 Stromerzeugungsanlagen: EE-Anlagen 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

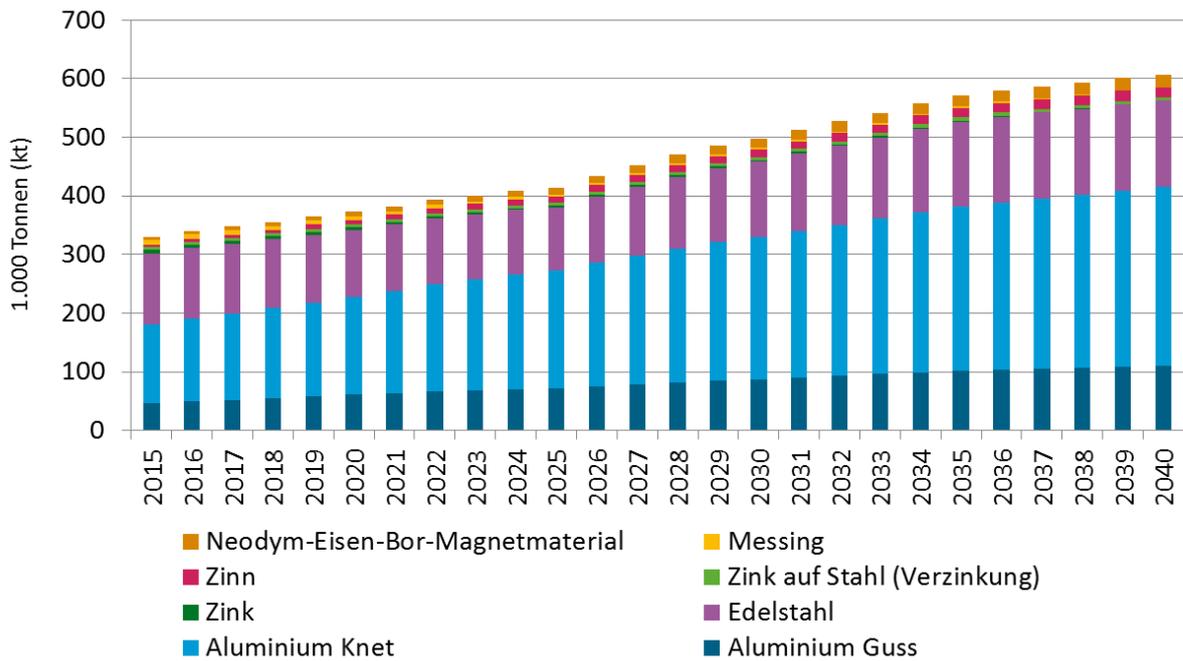
Berechnungsergebnisse

Auf Basis der dargestellten Entwicklungen zum Kraftwerksausbau, des rechnerischen Materialinputs aufgrund von Ersatzbedarfen sowie der hinterlegten Materialkoeffizienten ergibt sich der in Abbildung 48 dargestellte Materialbestand sowie die in Abbildung 49 dargestellte Materialentnahme aus dem anthropogenen Lager.

Nach Abbildung 48 beläuft sich der Materialbestand 2015 in Sektor 4 auf 330.000 Tonnen, dominiert von rund 130.000 Tonnen Aluminium (Knetlegierung) und rund 120.000 Tonnen Edelstahl. Der Materialbestand wird sich bis 2040 auf rund 600.000 Tonnen erhöhen (+83,9 %).

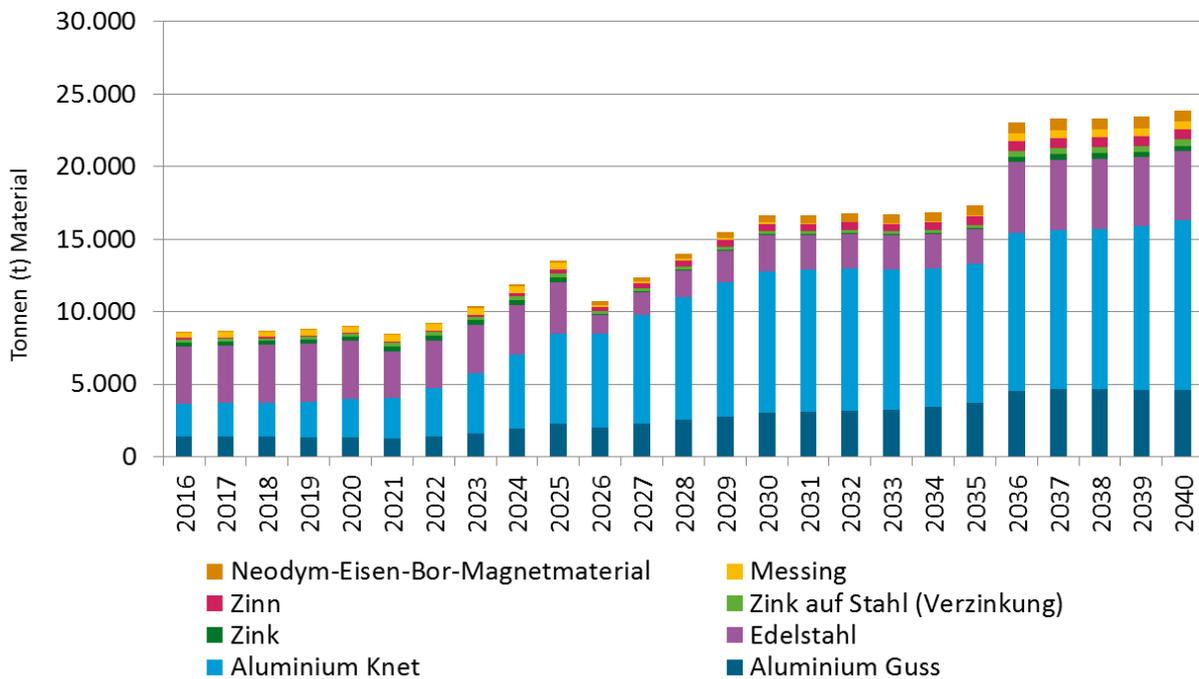
Durch den sanierungsbedingten Ersatzbedarf sowie den Umbau des Kraftwerksparks wird eine unterschiedliche hohe Materialentnahme bewirkt. Diese beläuft sich im Jahr 2015 auf rund 8.600 Tonnen und wird vor allem durch den Ersatzbedarf von Edelstahl in Höhe von rund 4.000 Tonnen und von Aluminium (Knetlegierung) in Höhe von 2.300 Tonnen dominiert. Die Materialentnahme nimmt bis zum Jahr 2040 zu und beläuft sich dann auf rund 24.000 Tonnen (+177 %). Tabelle 24 zeigt die berechneten Materialentnahmen zu den Stützjahren 2015, 2020, 2030 und 2040.

Abbildung 48: Materialbestand Sektor 4 Stromerzeugungsanlagen: konventionelle und EE-Anlagen 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 49: Materialentnahme Sektor 4 Stromerzeugungsanlagen: konventionelle und EE-Anlagen 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

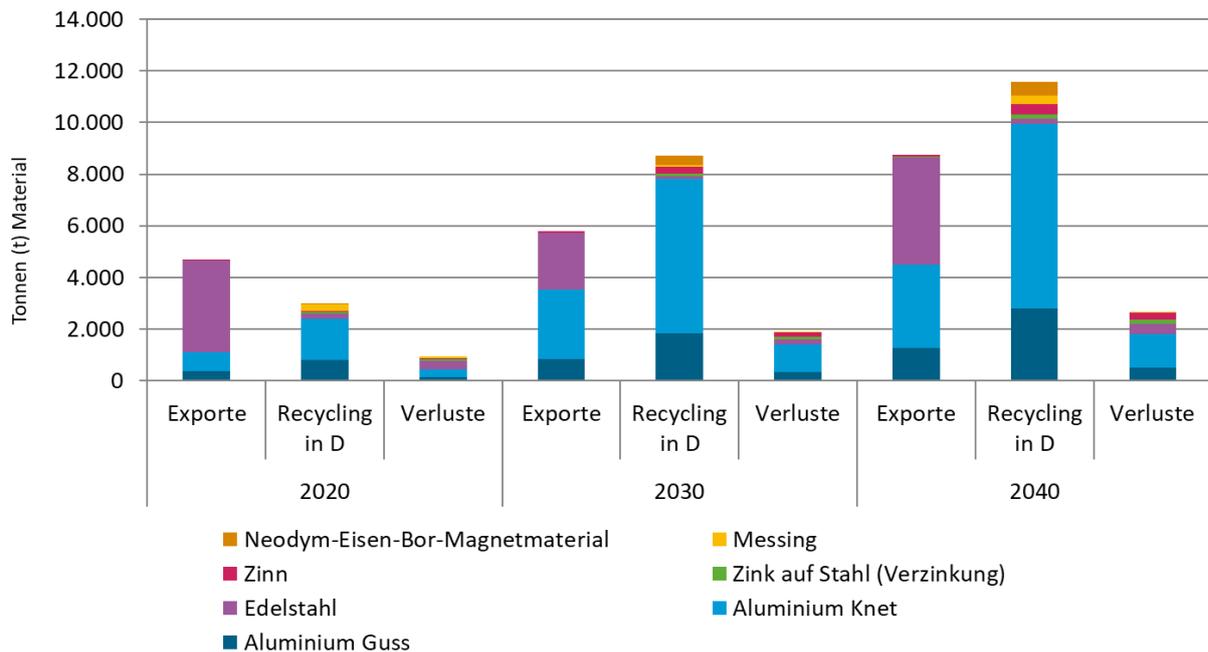
Tabelle 24: Übersicht Sektor 4: Materialentnahme aus dem anthropogenen Lager (in t)

Material	Output 2015	Output 2020	Output 2030	Output 2040	Summe 2015 - 2040
Aluminium Guss	1.383	1.318	3.008	4.604	67.617
Aluminium Knet	2.287	2.637	9.736	11.699	179.344
Edelstahl	3.949	4.069	2.503	4.743	82.089
Zink	269	271	87	386	5.600
Zink auf Stahl (Verzinkung)	181	184	213	418	6.107
Zinn	101	84	473	680	9.278
Messing	389	389	122	547	7.937
Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial	56	51	529	768	9.700

Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 50 zeigt den Verbleib der Metalle aus Sektor 4 nach Durchlauf der Verwertung für die Stützjahre 2020, 2030 und 2040. Es wird deutlich, dass die größten Mengen exportiert werden, was über die hohe Exportquote von Edelstahl zu erklären ist. Aluminium, sowohl Knet- als auch Gusslegierung, hat den größten Anteil an den recycelten Metallen in Deutschland. Da die Outputströme an Aluminium (sowohl Knet- als auch Gusslegierung) aus dem anthropogenen Lager des Sektors 4 bis 2040 deutlich zunehmen, steigen damit auch absolut die Mengen an recycelten Metallen aus dem Sektor 4 signifikant an. Die Verluste werden vor allem vom Edelstahl, aber auch den beiden Aluminiumlegierungen dominiert. Insgesamt sind die Verluste aber im Vergleich zum Export und dem Recycling in Deutschland von untergeordneter Bedeutung.

Abbildung 50: Materialverbleib Sektor 4 Stromerzeugungsanlagen: konventionelle und EE-Anlagen 2020 – 2030 - 2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

4.2.5 Sektor 5: Stromnetze

Untersuchungsgegenstand und Modellansatz

Sektor 5 umfasst die zentralen Komponenten des deutschen Netzwerks zur Übertragung und Verteilung elektrischer Energie. Dies umfasst alle Spannungsebenen aus Hoch- und Höchstspannung, Mittelspannung und Niederspannung.

Im Rahmen eines Bottom-up-Ansatzes sind Materialkoeffizienten der betrachteten KartAL III Metalle für die einzelnen Komponenten des Sektors abgeleitet. Anhand von Angaben zu dem Stromkreislängen der einzelnen Spannungsebenen wird der Metallgehalt des Gesamtsystems errechnet.

Unterschieden wird zwischen den Spannungsebenen, dass bedeutet Höchst- und Hochspannungsebene (HS) als das übergeordnete Übertragungsnetz einerseits sowie Mittel- und Niederspannungsebene (MS und NS) als regionales und lokales Verteilnetz andererseits. Innerhalb der Spannungsebenen wird weiter unterschieden, ob die Leitungskabel als Freileitungen oder als Erdkabel errichtet sind. Die Unterscheidung ist erforderlich, da auf Ebene der Hoch- und Höchstspannung das Leiterkabel bei Freileitungen aus Aluminium und in Erdkabeln das Leitermaterial aus Kupfer gefertigt ist (vgl. [Jorge et al. 2012], [TenneT 2016]). Auf Ebene der Mittel- und Niederspannung sind die Stromleiter beider Ausbauvarianten entweder aus Kupfer oder Aluminium gefertigt. Daher wird hier jeweils das gesamte Leitungsnetz aus Freileitung und Erdkabel berücksichtigt, die geringeren Leitungsquerschnitte und die Verwendung von Kupfer als Leitermaterial sind durch geringere Materialkoeffizienten berücksichtigt.

Neben den Leitungskabeln sind auch die zur Aufhängung von Freileitungen genutzten Stahlmasten von Interesse, da diese zum Teil verzinkt sind. Während HS-Leitungen zu 95 % als Freileitungen ausgebaut sind, steigt der Anteil der in der Erde verlegten Leitungen auf der Verteilnetzebene deutlich an. Mittelspannungsleitungen sind zu 23 % an Masten aufgehängt,

Niederspannungsleitungen zu 11 % [Heuck et al. 2013]. Um diese Güter abzubilden, sind die als Freileitungen errichteten Netzstrecken berücksichtigt und weiterhin die pauschalen Annahmen getroffen, dass 30 % der Freileitungen an verzinkten Stahlmasten aufgehängt sind.

Weiterhin sind Bahn-Oberleitungen zu diesem Sektor gezählt und damit sind sie nicht Teil von Sektor 8: Verkehrsinfrastrukturen. Umspannwerke und sonstige Übergabestellen sind nicht berücksichtigt, da keine Untersuchungen zum Anteil der betrachteten KartAL III Metallen bekannt sind.

Als Funktionale Einheit (FU) wird 1 Kilometer Leitungsnetz definiert. Die Materialkoeffizienten für HS Leitungen und Stahlmasten sind [Jorge et al. 2012] entnommen und liegen bei 16,4 Tonnen Aluminium pro Kilometer Freileitung und 1,95 Tonnen Zink (Verzinkung) pro Leitungskilometer mit Aufhängung an Stahlmasten. Die Materialkoeffizienten für das Mittel- und Niederspannungsnetz ist aus dem UBA Vorhaben „RELIS – ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastruktur“ [Trapp et al. 2017] entnommen. Pro Kilometer Leitungskabel (Freileitung oder Erdkabel) wird für MS-Leitungen ein Al-Anteil von 0,39 t/km und für NS-Leitungen von 0,19 t/km festgelegt.

Die in Tabelle 25 dargestellten Netzlängen und Ausbauweisen bilden das Mengengerüst für die Modellierung der Stoffstrommengen 2015-2040.

Tabelle 25: Sektor 5: Status Quo Netzlängen (in km) und Ausbauweisen für unterschiedliche Spannungsebenen

Spannungsebene	Anteil Freileitungen	Stromkreislänge 2015 gesamt (km)	davon als Freileitungen (km)	davon als Erdkabel (km)
Hoch- und Höchstspannung	95 %	125.000	118.750	6.250
Mittelspannung	23 %	516.000	118.680	397.320
Niederspannung	11 %	1.181.000	129.910	1.051.090

Quelle: eigene Darstellung auf Basis [Heuck et al. 2013; BDEW 2019]

Tabelle 26: Übersicht Sektor 5 Stromnetze (Güter und enthaltene Materialien)

Gut	Aluminium Guss	Aluminium Knet	Edelstahl	Zink	Zink auf Stahl (Verzinkung)	Zinn	Messing	Magnesium	Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial
Hochspannungsfreileitungen		✓							
Stahlmasten Hochspannungsfreileitungen					✓				
Mittelspannungsleitungen		✓							
Stahlmasten Mittelspannungsfreileitungen					✓				
Niederspannungsleitungen		✓							

Gut	Aluminium Guss	Aluminium Knet	Edelstahl	Zink	Zink auf Stahl (Verzinkung)	Zinn	Messing	Magnesium	Neodym- Eisen- Bor- Magnet- material
Stahlmasten Niederspannungsfreileitungen					✓				
Oberleitung (Bahn)		✓			✓				

Quelle: eigene Darstellung

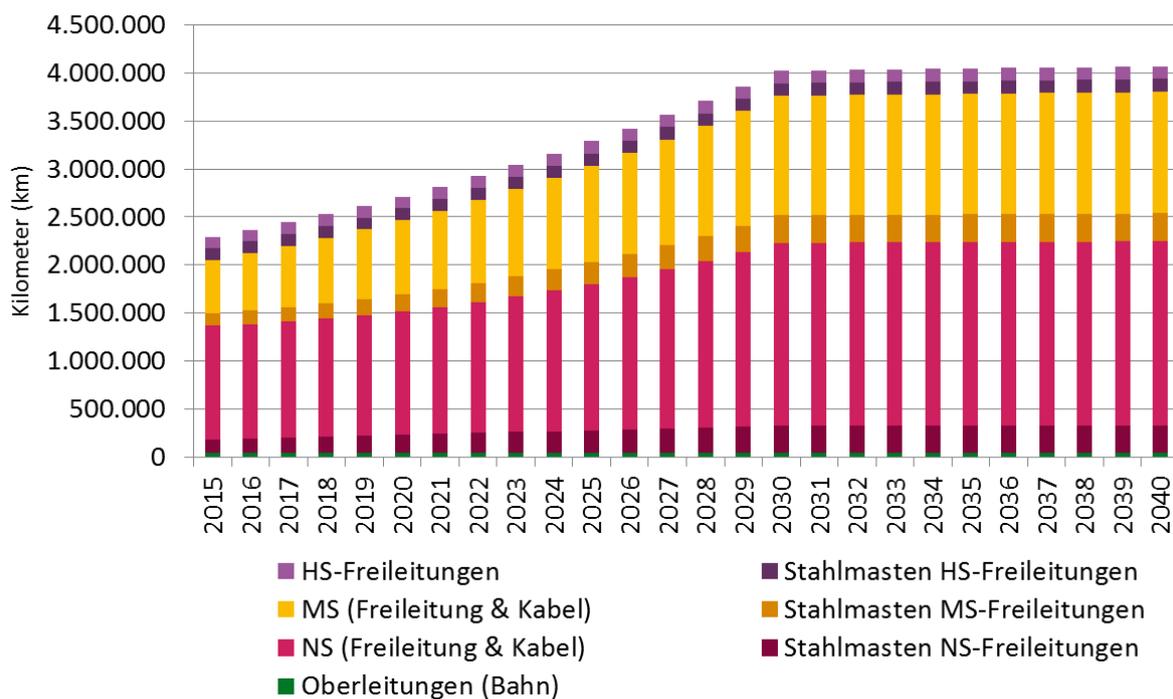
Datengrundlagen

Durch die Dekarbonisierung der Stromerzeugung und damit dem veränderten Kraftwerkspark ist auch ein Umbau des Stromnetzes auf allen Spannungsebenen erforderlich. Die für die Vorausschau zukünftiger Entwicklungen herangezogenen Studien sind Netzentwicklungsplan [50Hertz Transmission et al. 2019], der von den deutschen Übertragungsnetzbetreibern herausgegeben wird und in der aktuellen Version 2019 vorliegt. Hierin ist der Ausbau des HS-Netzes mit +11.500 km bis 2030 angegeben. Für die Mittel- und Niederspannung wird die von der deutschen Energieagentur dena in Auftrag gegebene Verteilnetzstudie 2012 herangezogen [Dena 2012]. Daraus abgeleitet ist ein Ausbau des MS-Netzes von 20 Prozent und Ausbau des NS-Netzes von 5 % für die Berechnung.

Der Ausbau von Bahn Oberleitungen wurde auf Basis von [Bergmann et. al 2015] mit +4.091 km bis 2030 durch Gleiserweiterung und Elektrifizierung angesetzt. Bezogen auf das Ausgangsnetz von rund 47.000km bedeutet dies eine Zunahme von 8,7 %.

Für den Zeitraum von 2030-2040 liegen keine Untersuchungen zu dem zu erwartenden Netzausbau vor. Hier ist pauschal angenommen, dass der Umbau des Stromnetzes weitgehend abgeschlossen ist und sich der weitere Ausbau auf 1/3 des jährlichen Ausbaus zwischen 2015-2030 reduziert.

Abbildung 51: Güterbestand Sektor 5 Stromnetze 2015-2040



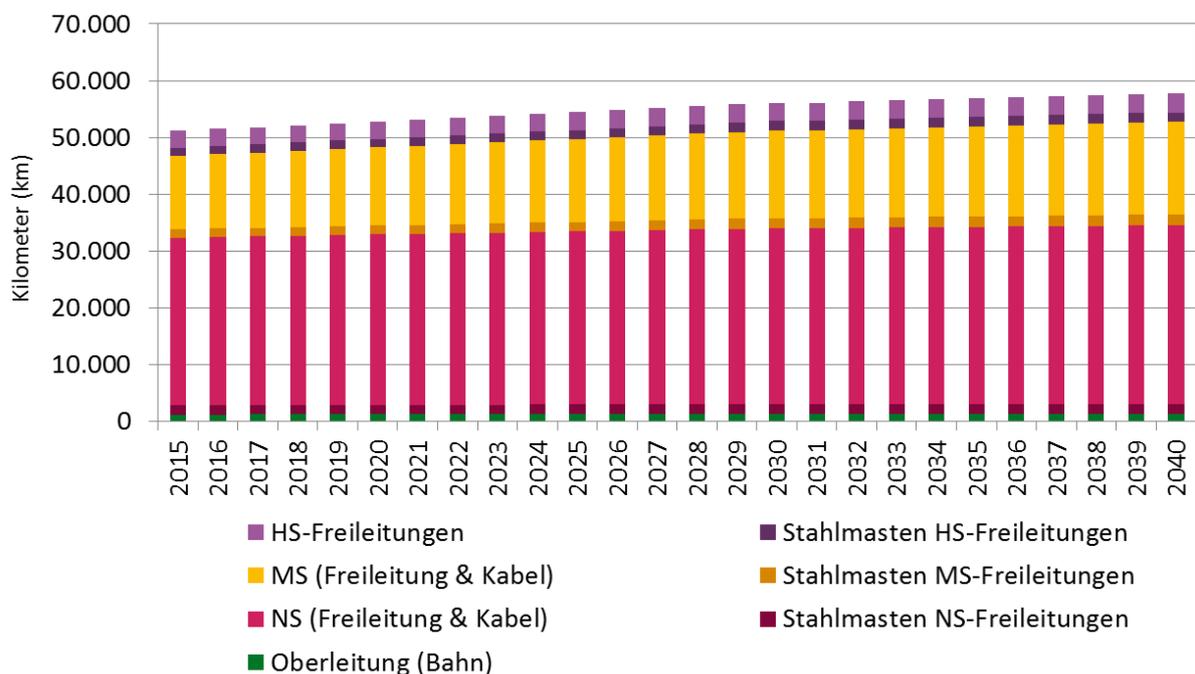
Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 51 zeigt den Bestand der für den Sektor 5 hinterlegten Güter und deren Entwicklung von 2015-2040. Insgesamt beläuft sich die Netzlänge (für die KartAL III relevante Materialien identifiziert wurden) auf rund 2,29 Millionen Kilometer. Aufgrund des erwarteten Netzausbaus werden sich die Netzlängen bis 2040 auf 4 Millionen Kilometer erhöhen. Die Abbildung zeigt deutlich die unterschiedlichen Ausbauraten 2015-2030 für verschiedenen Spannungsebenen (+9,2 % HS; +20 % MS und +5 % NS) und die anschließende Stabilisierung zwischen 2030 und 2040.

Für die Stoffstrommodellierung ist neben der Bestandsentwicklung insbesondere auch der Outflow, das heißt, die Entnahme von Gütern aus dem anthropogenen Lager von Interesse. Der Outflow ergibt sich (trotz kontinuierlicher Netzerweiterung) durch den Ersatzbedarf an Teilen des Bestandsnetzes, der sich durch altersbedingte Sanierungen ergibt. Hierfür wurden den einzelnen Gütern Lebensdauern hinterlegt und eine jährliche Outflowgröße in der Form $1/\text{Lebensdauer} \times \text{Bestandsmenge}$ angelegt. Dieser Ansatz entspricht dem gängigen Vorgehen zur Berücksichtigung der Sanierungstätigkeit bei Infrastruktursystemen, vgl. [Bergmann et. al 2015; Trapp et al. 2017]. Für Leitungskabel wurde eine Lebensdauer von 40 Jahren angenommen, für Stahlmasten eine Lebensdauer von 80 Jahren. Für die Modellierung des anthropogenen Lagers bedeutet ein sanierungsbedingter Outflow stets einen Materialinput im selben Jahr und selben Umfang.

Abbildung 52 zeigt die Güterentnahme aus dem anthropogenen Lager 2015-2040. Demnach wird im Jahr 2015 aufgrund von Sanierungsmaßnahmen rund 51.000 km des Stromnetzes saniert (Leitungskilometer und Strecken mit Stahlmasten). Dieser jährliche Ersatzbedarf steigt bis 2040 auf 57.700 km an (+12 %).

Abbildung 52: Güterentnahme Sektor 5 Stromnetze 2015-2040



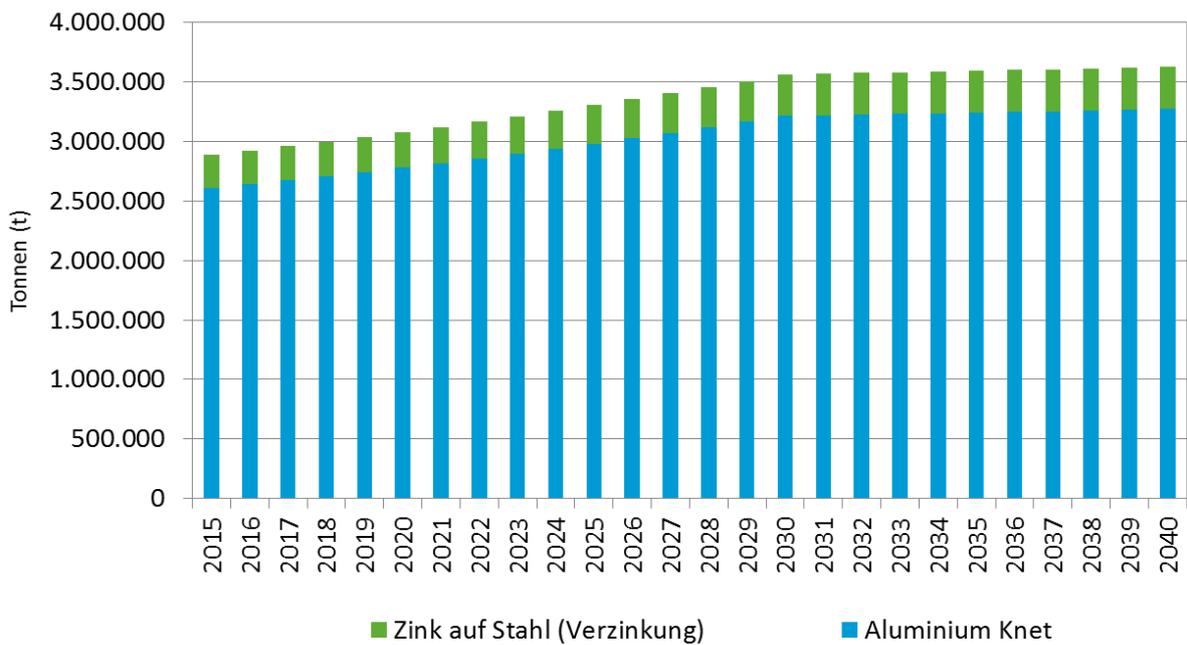
Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Berechnungsergebnisse

Auf Basis der dargestellten Entwicklungen zum Netzausbau, des rechnerischen Materialinputs aufgrund von sanierungsbedingten Ersatzbedarfen sowie der hinterlegten Materialkoeffizienten, ergibt sich der in Abbildung 53 dargestellte Materialbestand sowie die in Abbildung 54 dargestellte Materialentnahme.

Nach Abbildung 53 beläuft sich der Materialbestand 2015 in Sektor 5 auf 2,8 Millionen Tonnen, zusammengesetzt aus 2,6 Millionen Tonnen Aluminium und 276.800 Tonnen Zink (auf Stahl). Der Materialbestand wird sich bis 2040 auf 3,6 Millionen Tonnen erhöhen (+25 %).

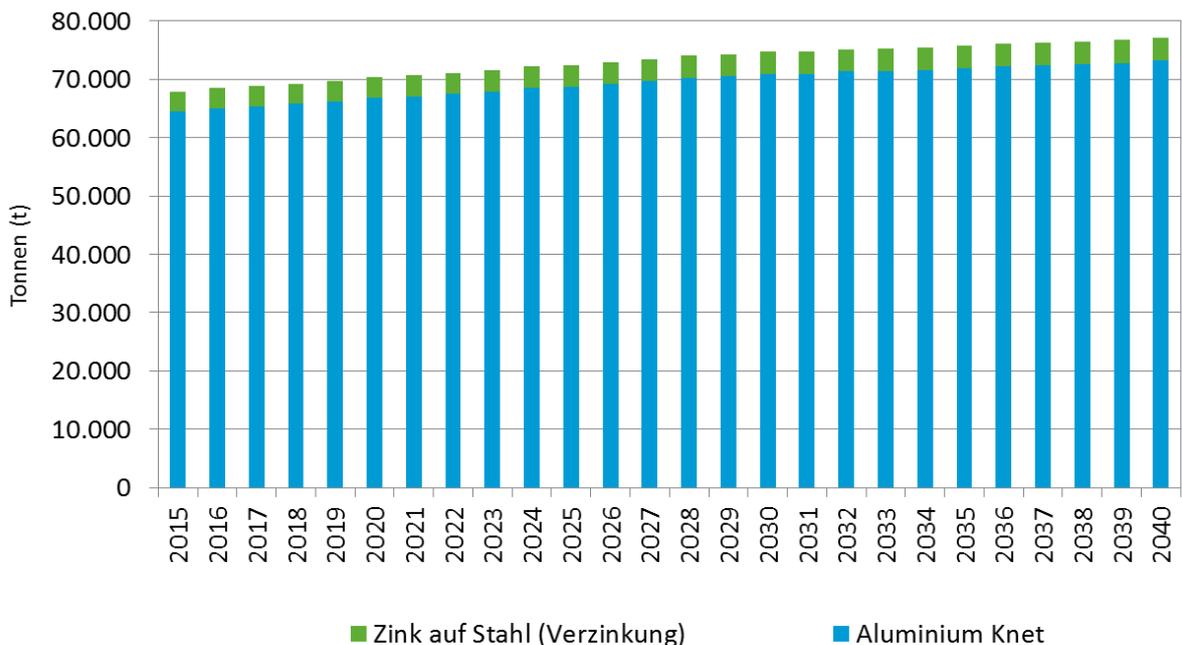
Abbildung 53: Materialbestand Sektor 5 Stromnetze 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Die durch den sanierungsbedingten Ersatzbedarf bewirkte Materialentnahme beläuft sich im Jahr 2015 auf rund 68.000 Tonnen und wird vor allem durch den Ersatzbedarf von Aluminium in Höhe von rund 64.400 dominiert. Der Bedarf von rund 3.400 Tonnen Zink (auf Stahl) ist untergeordnet. Die Materialentnahme nimmt bis zum Jahr 2040 zu und beläuft sich dann auf rund 77.200 Tonnen (+13,6 %). Tabelle 27 zeigt die berechneten Materialentnahmen zu den Stützjahren 2015, 2020, 2030 und 2040.

Abbildung 54: Materialentnahme Sektor 5 Stromnetze 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

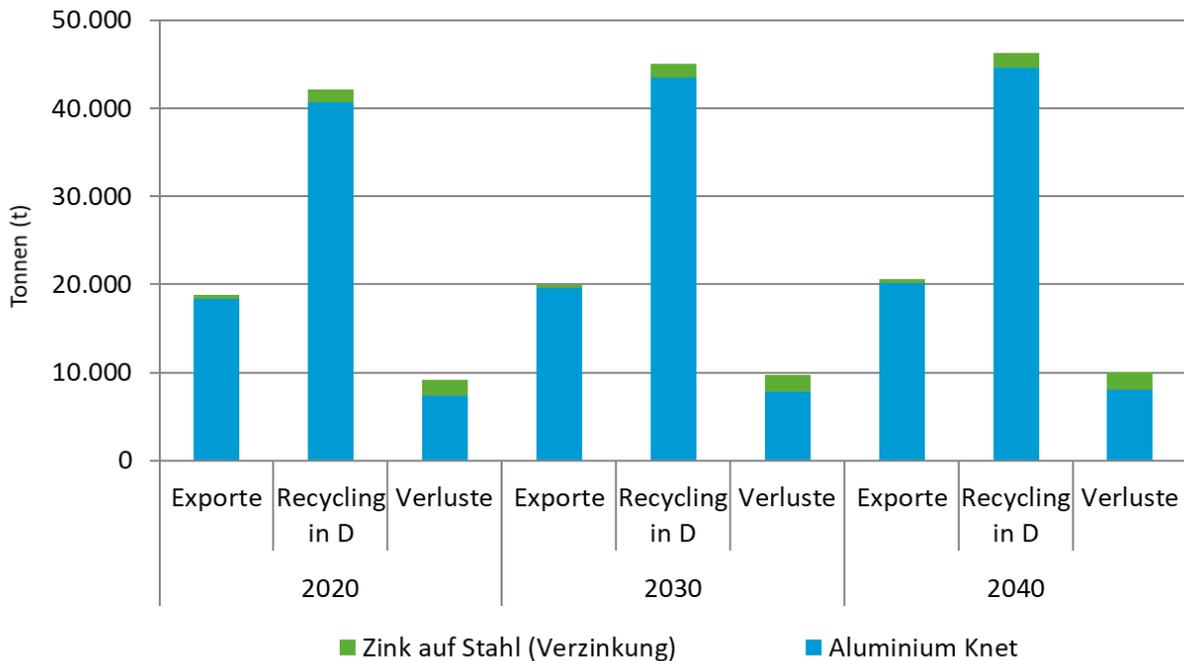
Tabelle 27: Übersicht Sektor 5: Materialentnahme aus dem anthropogenen Lager (in t)

Material	Output 2015	Output 2020	Output 2030	Output 2040	Summe 2015 - 2040
Aluminium Knet	64.484	66.816	70.932	73.259	67.927
Zink auf Stahl (Verzinkung)	3.443	3.575	3.808	3.939	77.198

Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 55 zeigt den Verbleib der Metalle aus Sektor 5 nach Durchlauf der Verwertung für die Stützjahre 2020, 2030 und 2040. Es wird deutlich, dass die größten Mengen in Deutschland recycelt werden, was über die vergleichsweise geringe Exportquote von Aluminium zu erklären ist. Aluminium (Knetlegierung) dominiert hier alle drei Verbleibskategorien, weil in diesem Sektor nur Aluminium und Zink auf Stahl enthalten sind, und letzterer in nur vergleichsweise geringer Menge.

Abbildung 55: Materialverbleib Sektor 5 Stromnetze 2020 – 2030 - 2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

4.2.6 Sektor 6: Fahrzeuge

Fahrzeuge und die zugehörige Industrie nutzen sehr viele Metalle, allen voran Aluminium. Dies führt zu einer starken Lagerbildung in Form dieser Fahrzeuge. In Deutschland sind vor allem die PKW ein wichtiger Faktor, denn die fast 50 Millionen Fahrzeuge führen zu einem konstanten Zu- und Abfluss von Metallen, wenn diese Autos verschrottet und wieder ersetzt werden. Die übrigen Kraftfahrzeuge machen rund 10 Millionen Fahrzeuge aus, doch auch Fahrräder, Schienenfahrzeuge sowie Schiffe tragen zum deutschen Metalllager in Sektor 6 bei. Durch seinen im Gegensatz zu Sektor 1: Technische Güter im Hochbau sehr hohen Durchsatz wegen der geringeren Lebensdauern, ist Sektor 6 zentral für die Gesamtbetrachtung der Metallflüsse in Deutschland. Aus diesem Grund ist der Sektor sehr differenziert modelliert. Es kann hier auf eine gute Datenbasis zurückgegriffen werden.

Untersuchungsgegenstand und Modellansatz

Der Fahrzeugsektor ist sehr wichtig hinsichtlich Metalle im anthropogenen Lager. Da für die unterschiedlichen Fahrzeuge in verschiedenen Quellen statistische Daten verfügbar sind, allen voran die Veröffentlichungen des Kraftfahrtbundesamtes (KBA), ist es in diesem wichtigen Sektor möglich einen Bottom-up-Ansatz zu nutzen, um den Sektor verlässlich abzubilden.

Der erste Schritt in der Modellierung des Sektors ist die Quantifizierung der funktionellen Einheit. Hierfür werden je nach Fahrzeug verschiedene Quellen herangezogen. Während viele der motorisierten Fahrzeuge über die Statistiken des KBA abgedeckt werden können [KBA 2019a], finden sich Daten zu Schienenfahrzeugen in [Destatis 2017] und Daten zu Schiffen in [GDWS 2016]. Weitere Daten zum Bestand anderer Fahrzeuge finden sich in Destatis 2019 [Destatis 2019] und [KBA 2019b]. Die Entwicklung des zukünftigen Bestandes sowie die Lebensdauer der Fahrzeuge kann folgenden Quellen entnommen bzw. über Kombination der dort enthaltenen Daten berechnet werden: [KBA 2019c], [BMVI 2017], [Leuenberger 2010], [Manager Magazin 2018], [ZIV 2016], [Treeze 2016], [Agora Verkehrswende 2017]. Die Gehalte an Metall in den einzelnen Produkten kann folgenden Quellen entnommen werden: [Argonne 2012], [EPA DK 2015], [Hoffmann 2016], [Henderson 2018], [Chemie am Auto 2014], [ecoinvent 2017], [Leuenberger 2010], [Elmorel 2017].

Um das deutsche Lager abzubilden, wird der Bestand anhand der Literatur für jedes Gut festgelegt und mittels Verweilzeitverteilung abgeführt.

In der folgenden Tabelle finden sich die Güter und Metalle, welche in Sektor 6: Fahrzeuge abgebildet werden.

Tabelle 28: Übersicht Sektor 6 Fahrzeuge (Güter und enthaltene Materialien)

Gut	Aluminium Guss	Aluminium Knet	Edelstahl	Zink	Zink auf Stahl (Verzinkung)	Zinn	Messing	Magnesium	Neodym- Eisen- Bor- Magnet- material
PKW (Verbrennungsmotor)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PKW (Elektromotor)	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Roller, Trikes, Quads (Verbrennungsmotor)	✓	✓		✓	✓	✓			

Gut	Aluminium Guss	Aluminium Knet	Edelstahl	Zink	Zink auf Stahl (Verzinkung)	Zinn	Messing	Magnesium	Neodym- Eisen- Bor- Magnet- material
Roller, Trikes, Quads (Elektromotor)	✓	✓		✓	✓	✓			✓
Motorrad (Verbrennungsmotor)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
LKW <20 t (Verbrennungsmotor)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
LKW ≥20 t (Verbrennungsmotor)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Leichte Nutzfahrzeuge (Verbrennungsmotor)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Bus	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓
Traktor	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓
Anhänger (PKW)		✓	✓		✓		✓		
Anhänger (LKW)		✓	✓		✓		✓		
Anhänger (Traktor)		✓	✓		✓		✓		
Fahrräder		✓	✓			✓			
Pedelec/E-Bike		✓	✓			✓			✓
Intercity	✓	✓			✓				
Intercity-Express	✓	✓			✓				
Regionalbahn	✓	✓			✓				
Lokomotive	✓	✓	✓		✓				
Personenwagen	✓	✓			✓				
Güterwagen	✓		✓		✓				
Tram	✓				✓				
Güterschiff	✓		✓		✓				

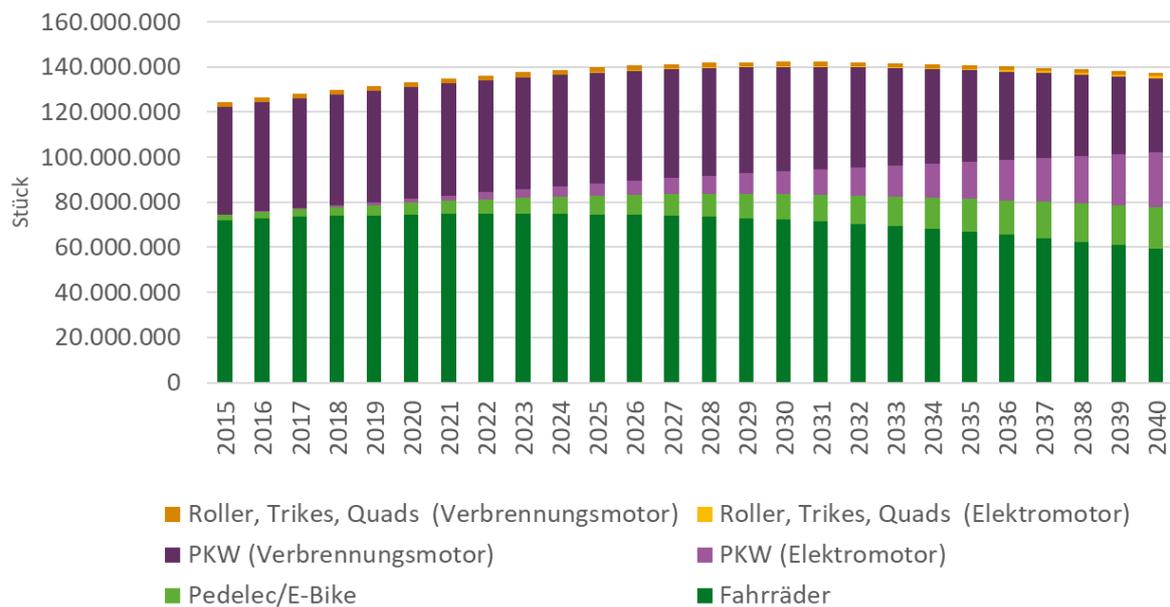
Gut	Aluminium Guss	Aluminium Knet	Edelstahl	Zink	Zink auf Stahl (Verzinkung)	Zinn	Messing	Magnesium	Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial
Tankschiff	✓		✓		✓				

Quelle: eigene Darstellung

Datengrundlagen

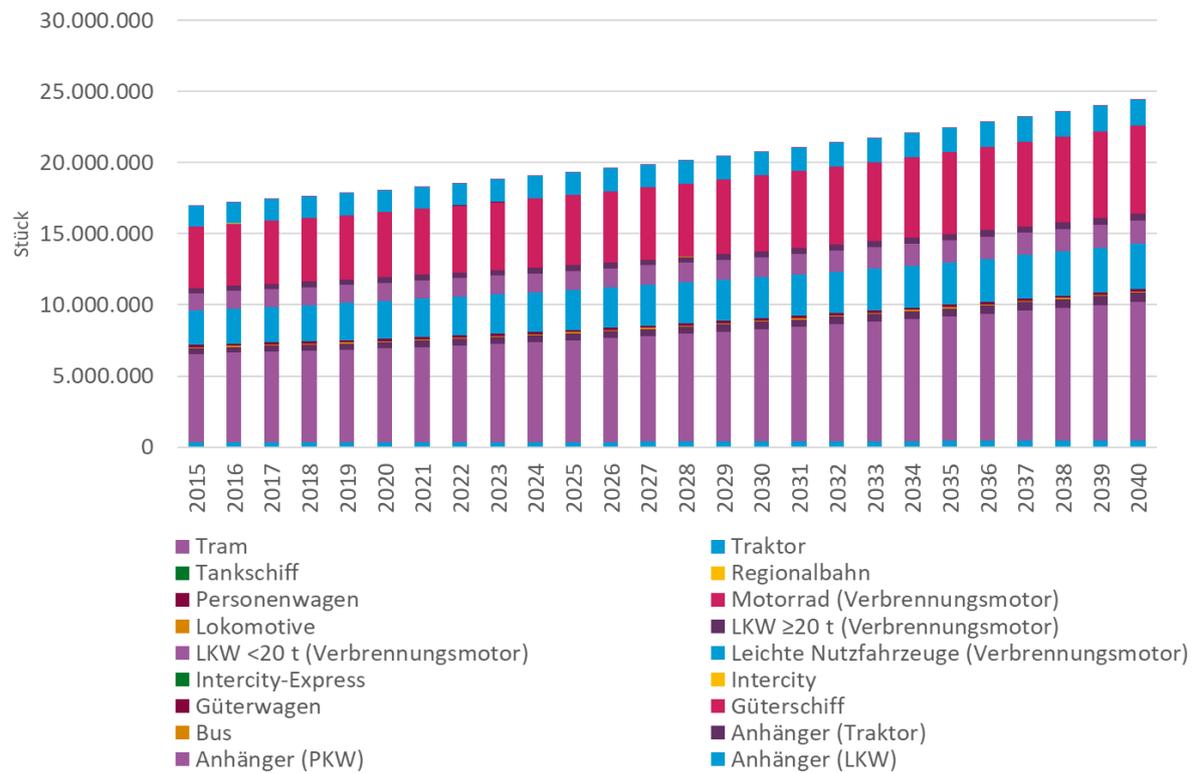
In Abbildung 56 und Abbildung 57 ist die Entwicklung des Güterbestandes in Sektor 6 dargestellt: für die Fahrzeuge, welche eine Transformation Richtung Elektromobilität (mit der Ausnahme von Bussen und LKW) erfahren, und für die übrigen Fahrzeuge. Wie oben dargestellt wird ausgehend vom Startbestand von insgesamt gut 120 Millionen Fahrzeugen (mit Transformation Richtung Elektromobilität) eine Fortschreibung mit den jeweils fahrzeugspezifischen Wachstumsraten durchgeführt. Dies führt zu einem Endbestand von knapp 140 Millionen Fahrzeugen im Jahr 2040, was einem Wachstum von knapp 20 Millionen bzw. fast 15 % entspricht. Der Bestand der übrigen Fahrzeuge wächst von fast 17 Millionen im Jahr 2015 auf fast 25 Millionen im Jahr 2040 an.

Abbildung 56: Güterbestand Sektor 6 Fahrzeuge mit Wechsel Richtung Elektromobilität 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

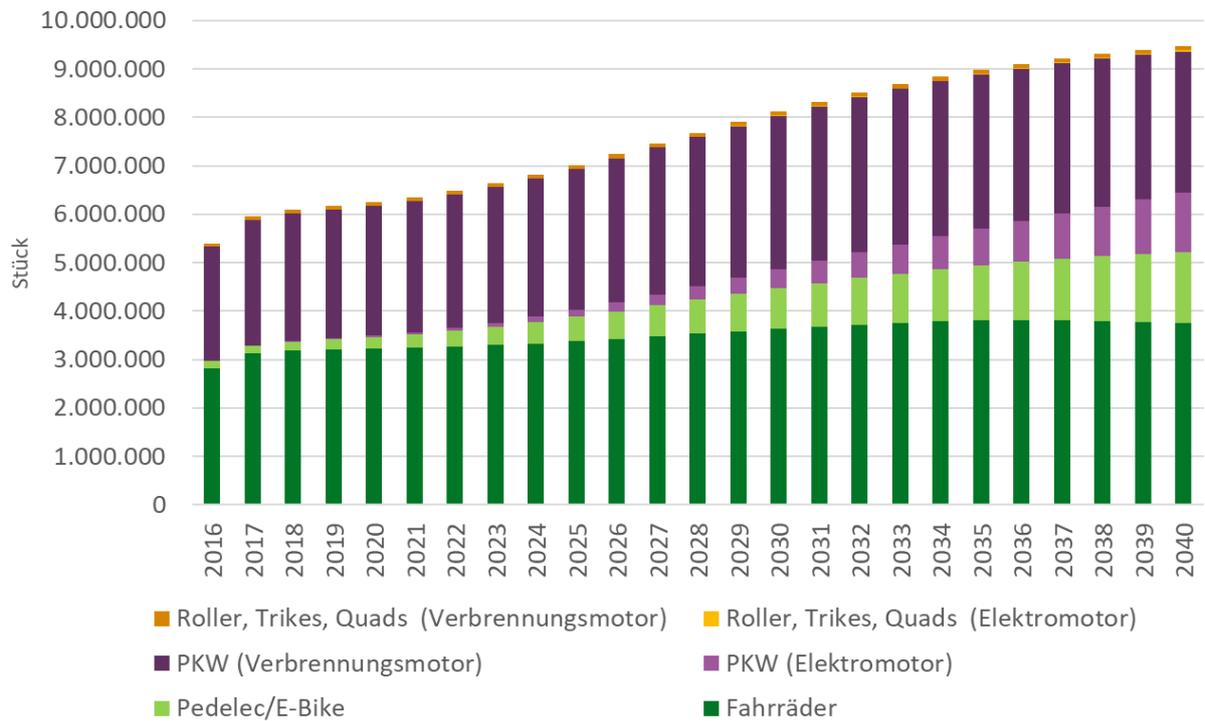
Abbildung 57: Güterbestand Sektor 6 übrige Fahrzeuge 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

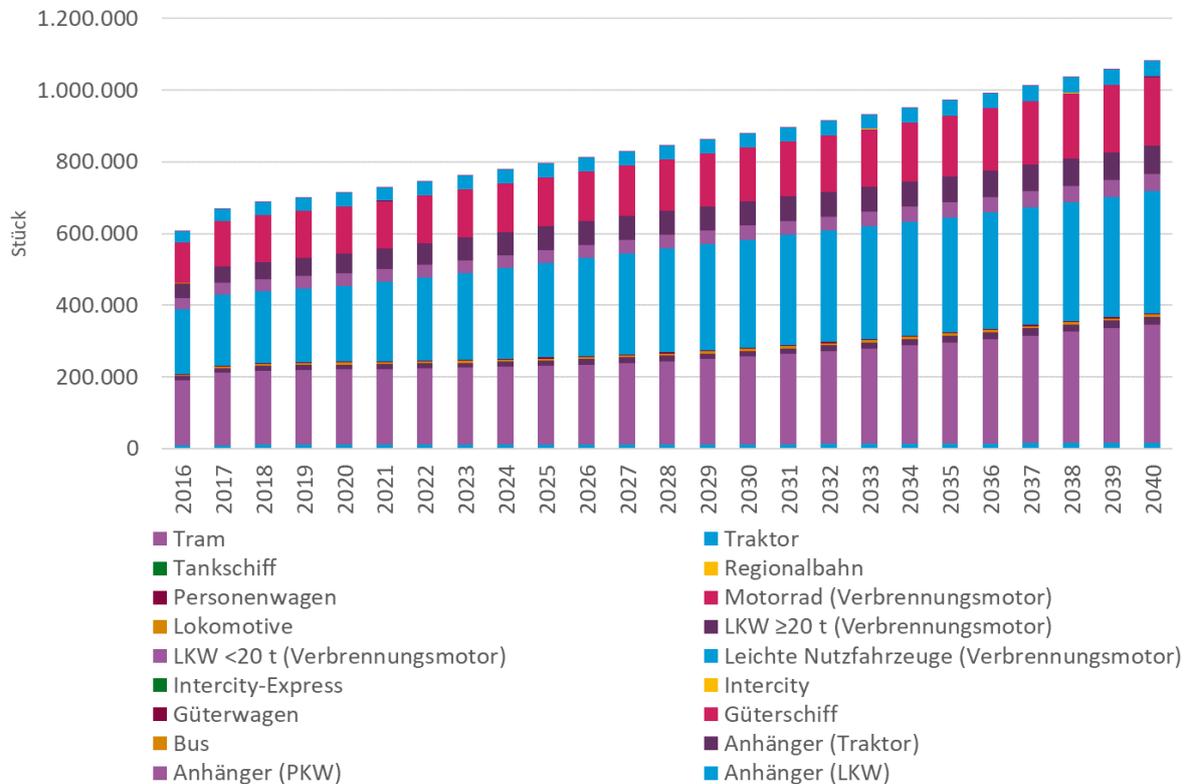
In Abbildung 58 und Abbildung 59 ist die Entnahme von Gütern über den Betrachtungszeitraum dargestellt. Wie zu erkennen ist, steigt die Entnahme aus dem gesamten Sektor 6 (d. h. sämtliche Fahrzeuge) von rund 6 Millionen im Jahr 2016 (aus technischen Gründen wird in diesem Sektor der Output erst ab 2016 betrachtet) auf 10,5 Millionen im Jahr 2040. Dies entspricht einem Anstieg von 4,5 Millionen bzw. 75 %.

Abbildung 58: Güterentnahme Sektor 6 Fahrzeuge mit Wechsel Richtung Elektromobilität 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 59: Güterentnahme Sektor 6 übrige Fahrzeuge 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Berechnungsergebnisse

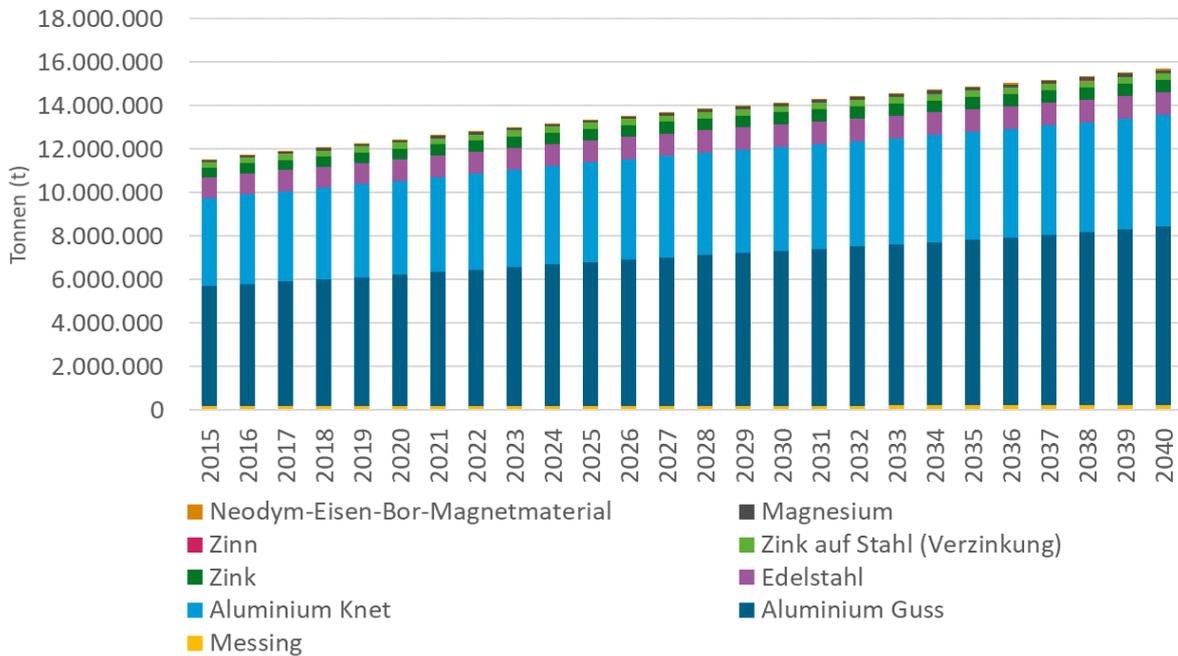
Auf Basis der dargestellten Entwicklungen hinsichtlich In- und Output sowie der hinterlegten Materialkoeffizienten ergibt sich der in Abbildung 60 dargestellte Materialbestand sowie die in Abbildung 61 dargestellte Materialentnahme.

Nach Abbildung 60 beläuft sich der Materialbestand 2015 in Sektor 6 auf 11,5 Millionen Tonnen, dominiert von 9,5 Millionen Tonnen Aluminium (5,5 Millionen Guss- und 4 Millionen Tonnen Knetlegierung). Der Materialbestand wird sich bis 2040 auf fast 16 Millionen Tonnen erhöhen (+36,4 %).

Der je nach Fahrzeugart kontinuierliche Austausch bewirkt eine Materialentnahme von rund 520.000 Tonnen im Jahr 2016 und wird vor allem durch den Aluminiumbedarf in Höhe von rund 440.000 Tonnen (260.000 Tonnen Gusslegierung und 180.000 Tonnen Knetlegierung) dominiert. Die Materialentnahme nimmt bis zum Jahr 2040 zu und beläuft sich dann auf fast eine Million Tonnen (+88,3 %).

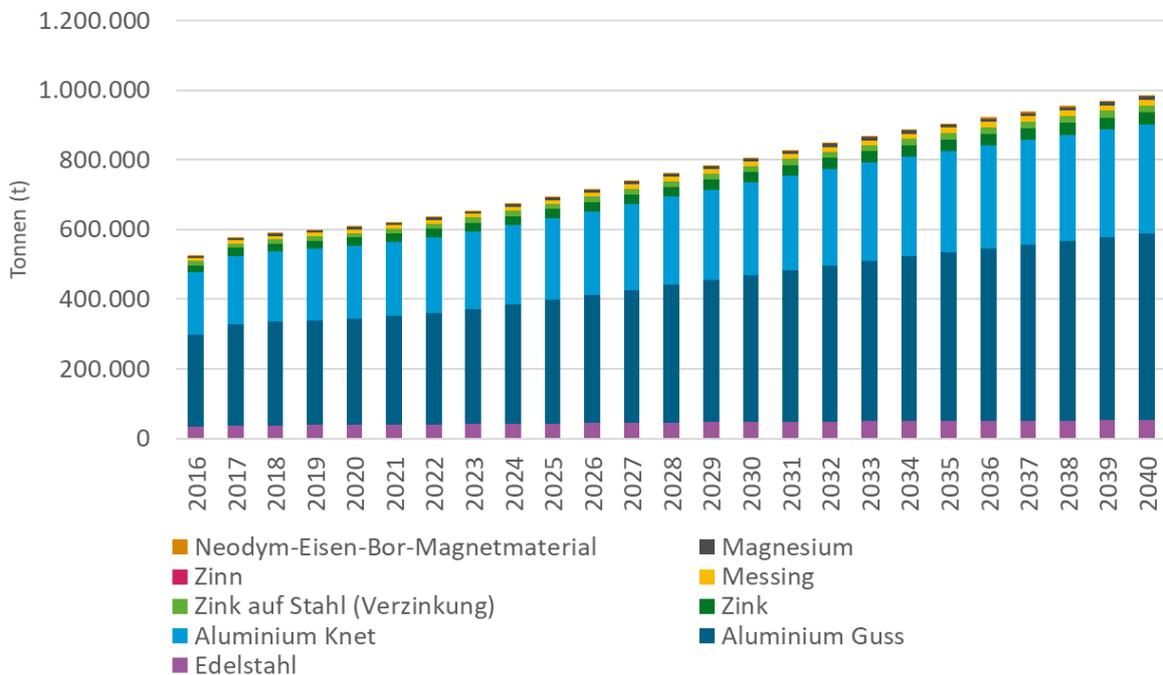
Tabelle 22 zeigt die berechneten Materialentnahmen zu den Stützjahren 2015, 2020, 2030 und 2040.

Abbildung 60: Materialbestand Sektor 6 Fahrzeuge 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 61: Materialentnahme Sektor 6 Fahrzeuge 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

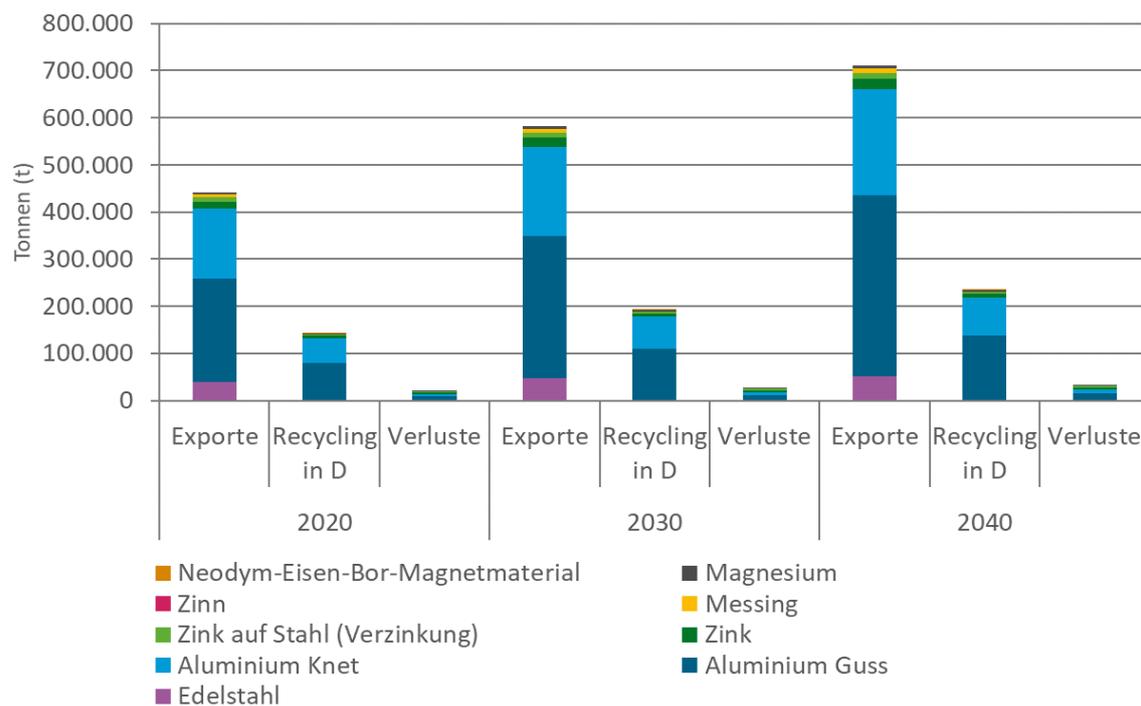
Tabelle 29: Übersicht Sektor 6: Materialentnahme aus dem anthropogenen Lager (in t)

Material	Output 2016	Output 2020	Output 2030	Output 2040	Summe 2016 - 2040
Aluminium Guss	264.394	305.731	421.802	536.510	9.965.202
Aluminium Knet	178.588	208.055	265.004	311.654	6.292.898
Edelstahl	33.939	39.515	47.954	52.468	1.137.493
Zink	20.324	23.448	30.186	35.073	712.913
Zink auf Stahl (Verzinkung)	11.330	13.237	16.872	19.681	399.896
Zinn	57	68	96	126	2.274
Messing	8.860	10.481	13.331	15.716	316.961
Magnesium	5.418	6.324	8.588	10.496	201.991
Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial	538	686	1.913	4.189	46.389

Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 62 zeigt den Verbleib der Metalle aus Sektor 6 nach Durchlauf der Verwertung für die Stützjahre 2020, 2030 und 2040. Es wird deutlich, dass die größten Mengen exportiert werden, was über die hohe Exportquote der Gebrauchtwagen zu erklären ist, welche alle Metalle enthalten und die größte Maße aller Fahrzeuge beinhalten. Dies bedeutet, dass Aluminium, sowohl Knet- als auch Gusslegierung, hier dominieren, aber auch Edelstahl hat aufgrund seiner hohen Exportquote einen nennenswerten Anteil. Im Recycling und bei den Verlusten sind dann nur noch die beiden Aluminiumlegierungen relevant. Allerdings sind die Verluste aus diesem Sektor in einer fast vernachlässigbaren Größenordnung.

Abbildung 62: Materialverbleib Sektor 6 Fahrzeuge 2020 – 2030 - 2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

4.2.7 Sektor 7: Verkehrsinfrastruktur

Untersuchungsgegenstand und Modellansatz

Untersuchungsgegenstand dieses Sektors ist die Güterausstattung der Verkehrsinfrastruktur, in der die untersuchten KartAL III Metalle im relevanten Umfang enthalten sind. In Betracht kommen die als Straßenbegleitinfrastruktur bezeichneten Güter wie Schutzstreifen (d. h. verzinkte Leitplanken), Verkehrszeichen und Ampeln (d. h. verzinkte Pfosten oder Aluminiumgehäuse von Straßenlaternen) sowie Schilderbrücken (d. h. verzinkte Stahlkonstruktionen).

In einem Bottom-up-Berechnungsansatz sind Materialkoeffizienten für die verschiedenen Güter ermittelt und mittels Angaben zum Mengengerüst für die Güter und Materialausstattung in Deutschland sowie die Entwicklung bis 2040 abgebildet.

Die zentrale Datengrundlage zur Modellierung des Sektors bilden die Vorhaben „RELIS – ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastruktur“ [Trapp et al. 2017] sowie [Bergmann et al. 2015]. In beiden Untersuchungen ist die Straßenbegleitinfrastruktur erfasst. In einem ersten Schritt wurde die Systematik der Güterausstattung mit der in DyMAS bereits vorhandenen Systematik angeglichen. Während sich die in den genannten Literaturquellen genutzte Systematik rein auf die unterschiedlichen Ausstattungsgüter (Schutzplanken, Schilderbrücken, Verkehrszeichen etc.) bezieht, beschreibt die in DyMAS angelegte Systematik das Straßensystem nach den Trägern der Straßenbaulast (Bund, Land, Kreis, Gemeinde) und enthält gleichzeitig auch z.T. die darin enthaltenen Ausstattungsgüter.

Im Rahmen der erforderlichen Zusammenlegung wurde entschieden, alle Ausstattungen nur auf die Straßenkategorien zu beziehen. Dazu ist mittels Setzung eine Verteilung der Straßenbegleitinfrastruktur nach [Trapp et al. 2017] auf Straßenkategorien vorgenommen

worden. Der Ansatz ermöglicht es, dass mit den Annahmen zum zukünftigen Straßenausbau auch der dazugehörige Ausbau der Begleitinfrastruktur modelliert werden kann.

Folgende Tabelle zeigt die Zuordnung von Straßenbegleitinfrastruktur auf die Straßenkategorien nach Baulastträgern.

Tabelle 30: Zuordnung von Straßenbegleitinfrastruktur auf die Straßenkategorien nach Baulastträgern

	Länge 2015	Schutzplanken 2-seitig mit Fahrbahntrennung		Schutzplanken 2-seitig ohne Fahrbahntrennung		Schilderbrücken			Verkehrszeichen (Schilder)			Leuchten		Lichtzeitanlagen (Ampeln)			
		An-nahme	11.376	An-nahme	30.079	An-nahme	20.680		An-nahme	10.136.430		An-nahme	9.100.000		An-nahme	81.700	
	km	Vertei-lung	km	Vertei-lung	km	Verte-i-lung	Stk	Stk /k m	Vertei-lung	Stk	Stk /k m	Vertei-lung	Stk	Stk/ km	Vertei-lung	Stk	Stk/k m
BAB (inkl. Äste)	18.402	50 %	5.688	10 %	3.008	75 %	15.510	0,84	5 %	506.822	28	0,5 %	45.500	2	0 %	0	0
Bundesstraße	41.481	50 %	5.688	30 %	9.024	25 %	5.170	0,12	10 %	1.013.643	24	2,5 %	227.500	5	0 %	0	0
Landstraße	87.325		0	30 %	9.024				15 %	1.520.465	17	4 %	318.500	4	10 %	8.170	0,094
Kreisstraße	91.877		0	20 %	6.016				20 %	2.027.286	22	10 %	910.000	10	15 %	12.255	0,133
Gemeindestraße	450.770		0	10 %	3.008				50 %	5.068.215	11	83 %	7.553.000	17	75 %	61.275	0,136
	689.855	100 %	11.376	100 %	30.079	100 %	20.680		100 %	10.136.430		100 %	9.054.500		100 %	81.700	

Eine weitere Anpassung der Datengrundlage war bezüglich eines „Verzinkungsfaktors“ von Stahl erforderlich. Hintergrund ist, dass in den genannten Literaturquellen neben der Menge Aluminium pro Straßenkilometer nur die Angabe zur Menge des verwendeten Stahls pro Gut d. h. Straßenkilometer enthalten ist. Angaben zur Menge des zur Verzinkung erforderlichen Zinks fehlen. Hier wurde der im Sektor 5: Stromnetze verwendete Materialkoeffizient für die Verzinkung von Stahlmasten verwendet. Der Materialkoeffizient liegt demnach bei 32,7 kg Zink zur Verzinkung von 1 Tonne Stahl.

Daraus ergeben sich folgende Materialkoeffizienten nach Straßenkategorie:

Tabelle 31: Materialkoeffizienten nach Straßenkategorie

		Schutz- planken 2-seitig mit Fahrbahn- trennung	Schutz- planken 2-seitig ohne Fahrbahn- trennung	Schilder- brücken	Ver- kehrs- zeichen	Leuch- ten	Licht- zeichen- anlagen	Gesamt- faktor
		t	t	t	t	t	t	t/km
BAB (inkl. Äste)	Stahl	375.977	100.765	78.973	243	1.840		30,31
	Zink	12.294	3.295	2.582	8	60		0,99
	Al			584	40	920		0,08
Bundesstraße	Stahl	375.977	302.294	178.017	548	4.148		20,76
	Zink	12.294	9.885	5.821	18	136		0,68
	Al			1.317	91	2.074		0,08
Landstraße	Stahl		302.294		1.154	8.733	4.366	3,62
	Zink		9.885		38	286	143	0,12
	Al				192	4.366	4.366	0,10
Kreisstraße	Stahl		201.529		1.214	9.188	4.594	2,36
	Zink		6.590		40	300	150	0,08
	Al				202	4.594	4.594	0,10
Gemeindestraße	Stahl		100.765		5.955	45.077	22.539	0,39
	Zink		3.295		195	1.474	737	0,01
	Al				992	22.539	22.539	0,10

Tabelle 32: Übersicht Sektor 7 Verkehrsinfrastruktur (Güter und enthaltene Materialien)

Gut	Aluminium Guss	Aluminium Knet	Edelstahl	Zink	Zink auf Stahl (Verzinkung)	Zinn	Messing	Magnesium	Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial
Straßenausstattung Bundesautobahn (BAB)		✓			✓				
Straßenausstattung Bundesstraßen		✓			✓				
Straßenausstattung Landstraßen		✓			✓				
Straßenausstattung Kreisstraßen		✓			✓				
Straßenausstattung Gemeindestraßen		✓			✓				

Quelle: eigene Darstellung

Datengrundlagen

Folgende Tabelle 33 zeigt das Mengengerüst des Straßennetzes 2015 als Ausgangsgröße der Bilanzierung sowie den Ausbau bis 2030 entsprechend der in [Bergmann et. al 2015] vorgenommenen Ableitung des zu erwartenden Ausbaus auf Basis des Bundesverkehrswegeplans 2015. Zudem enthalten ist der auf Annahmen basierende Ausbau 2030-2040.

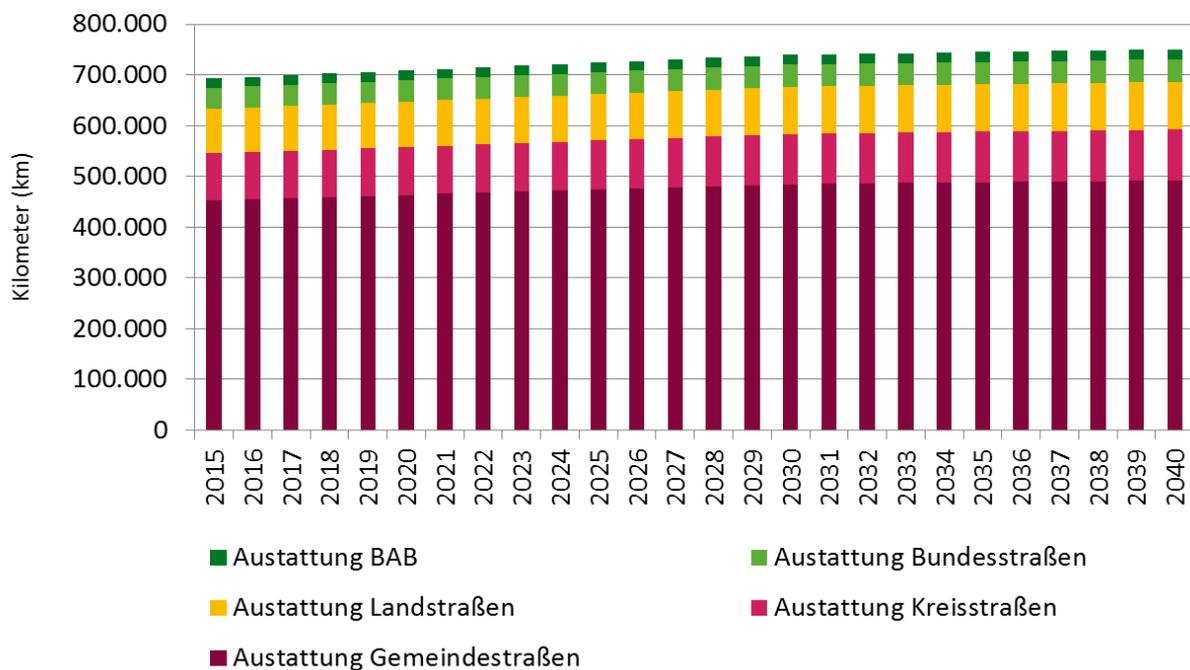
Tabelle 33: Sektor 7: Status Quo Straßennetzlängen und jährliche Ausbauraten 2015-2030 und 2030-2040 (in km)

Straßenkategorie	Bestandsnetz 2015 (in km)	jährlicher Netzausbau 2015-2030 (km)	jährlicher Netzausbau 2030-2040 (km)
Bundesautobahn	18.402	65	22
Bundesstraße	41.481	120	40
Landstraße	87.325	380	125
Kreisstraße	91.877	426	141
Gemeindestraßen	450.770	2.133	704

Quelle: eigene Darstellung auf Basis [Bergmann et. al 2015] und eigener Annahmen

Entsprechend der getroffenen Annahmen nimmt das gesamte Straßennetz bis 2040 um rund 8,25 % zu (vgl. Abbildung 63).

Abbildung 63: Güterbestand Sektor 7: Verkehrsinfrastruktur 2015-2040

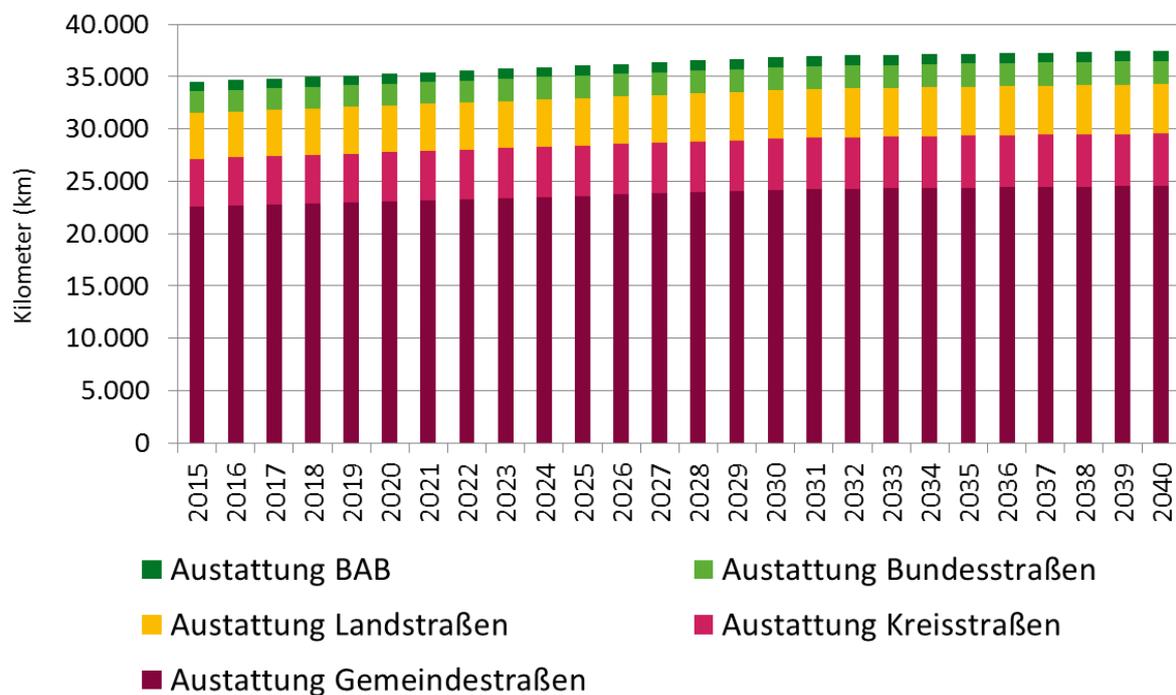


Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Für die Stoffstrommodellierung ist neben der Bestandsentwicklung insbesondere auch der Outflow, das heißt, die Entnahme von Gütern aus dem anthropogenen Lager von Interesse. Der Outflow ergibt sich durch den Ersatzbedarf an Teilen des Bestandsnetzes, der sich durch altersbedingte Sanierungen ergibt. Hierfür wurden den einzelnen Gütern Lebensdauern hinterlegt und eine jährliche Outflowgröße in der Form $1/\text{Lebensdauer} \times \text{Bestandsmenge}$ angelegt. Dieser Ansatz entspricht dem gängigen Vorgehen zur Berücksichtigung der Sanierungstätigkeit bei Infrastruktursystemen, vgl. [Bergmann et. al 2015; Trapp et al. 2017]. Für alle Güter des Sektors wird eine Lebensdauer von 40 Jahren angenommen. Für die Modellierung des anthropogenen Lagers bedeutet ein sanierungsbedingter Outflow stets einen Materialinput im selben Jahr und selben Umfang.

Abbildung 64 zeigt die Güterentnahme aus dem anthropogenen Lager 2015-2040. Demnach wird im Jahr 2015 aufgrund von Sanierungsmaßnahmen rund 34.493 km der Straßenbegleitinfrastruktur saniert. Dieser jährliche Ersatzbedarf steigt bis 2040 auf 37.457 km an (+8,5 %).

Abbildung 64: Güterentnahme Sektor 7: Verkehrsinfrastruktur 2015-2040



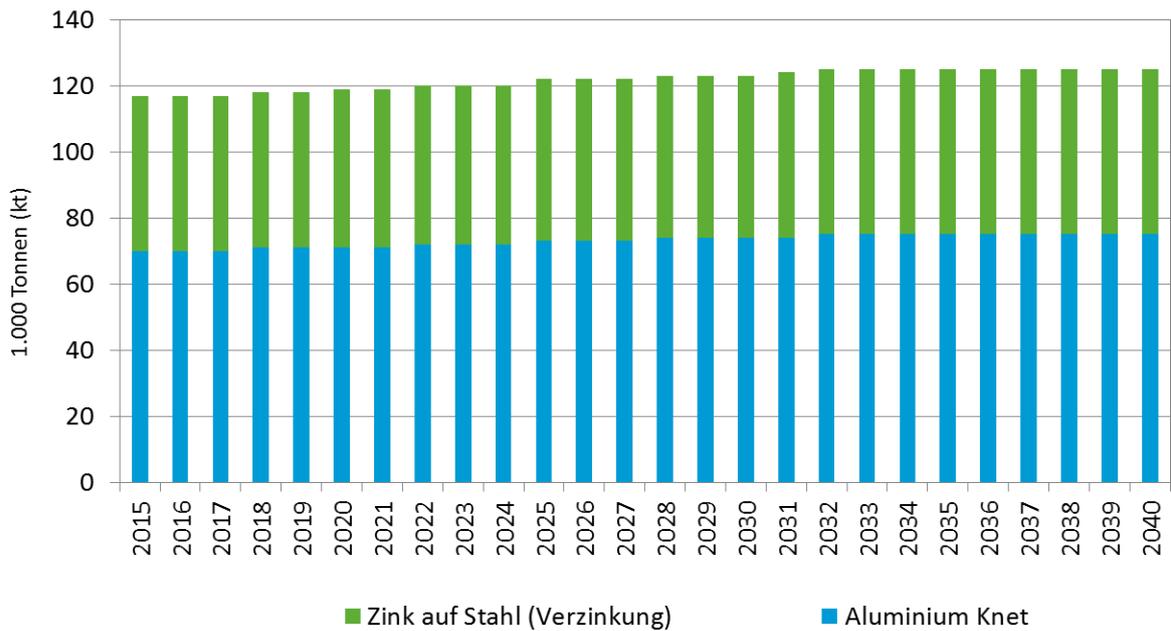
Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Berechnungsergebnisse

Auf Basis der dargestellten Entwicklungen zum Netzausbau, des rechnerischen Materialinputs aufgrund von sanierungsbedingten Ersatzbedarfen sowie der hinterlegten Materialkoeffizienten, ergibt sich der in Abbildung 65 dargestellte Materialbestand sowie die in Abbildung 66 dargestellte Materialentnahme.

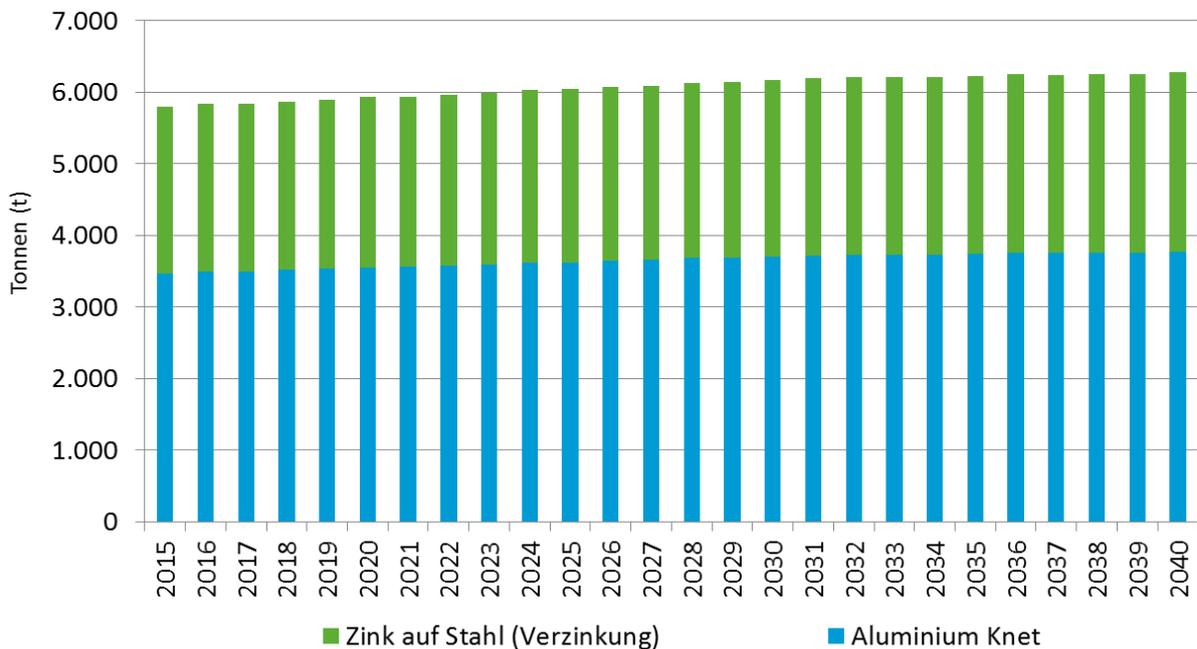
Nach Abbildung 65 beläuft sich der Materialbestand 2015 in Sektor 7 auf 116.000 Tonnen, zusammengesetzt aus 70.000 Tonnen Aluminium und 47.000 Tonnen Zink (auf Stahl). Der Materialbestand wird sich bis 2040 auf insgesamt 125.000 Tonnen erhöhen (+7,7 %).

Abbildung 65: Materialbestand Sektor 7 Verkehrsinfrastruktur 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 66: Materialentnahme Sektor 7 Verkehrsinfrastruktur 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Die durch den sanierungsbedingten Ersatzbedarf bewirkte Materialentnahme beläuft sich im Jahr 2015 auf rund 5.789 Tonnen und, zusammengesetzt aus 3.464 Tonnen Aluminium und 2.325 Tonnen Zink (auf Stahl). Die Materialentnahme nimmt bis zum Jahr 2040 zu und beläuft sich dann auf rund 6.281 Tonnen (+8,5 %). Tabelle 34 zeigt die berechneten Materialentnahmen zu den Stützjahren 2015, 2020, 2030 und 2040.

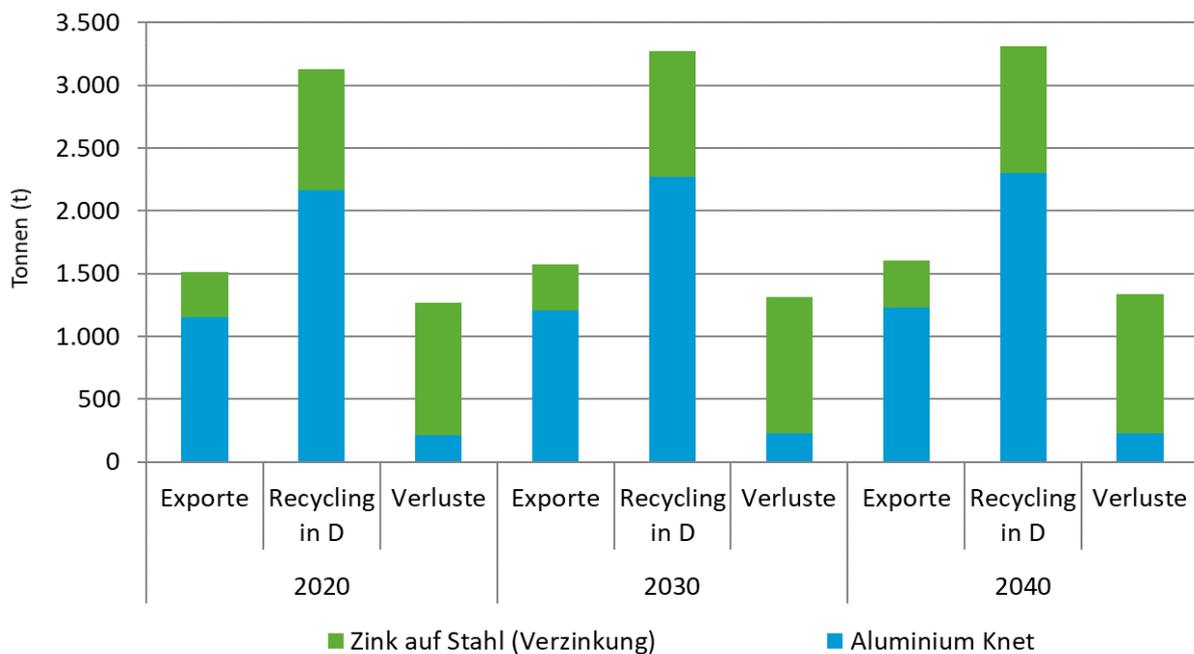
Tabelle 34: Übersicht Sektor 7: Materialentnahme aus dem anthropogenen Lager 2015-2040 (in t)

Material	Output 2015	Output 2020	Output 2030	Output 2040	Summe 2015 - 2040
Aluminium Knet	3.464	3.553	3.701	3.774	94.792
Zink auf Stahl (Verzinkung)	2.325	2.377	2.463	2.507	63.215

Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 67 zeigt den Verbleib der Metalle aus Sektor 7 nach Durchlauf der Verwertung für die Stützjahre 2020, 2030 und 2040. Es wird deutlich, dass die größten Mengen in Deutschland recycelt werden. Dies ist über die vergleichsweise geringe Exportquote von Aluminium und Zink auf Stahl zu erklären ist. Aluminium (Knetlegierung) dominiert hier die Exporte und das Recycling, weil in diesem Sektor nur Aluminium und Zink auf Stahl enthalten sind, und letzterer eine geringere Masse aufweist. Zink auf Stahl dominiert die Verluste, weil es über den gesamten Verwertungsweg höhere prozessbedingte Verluste aufweist.

Abbildung 67: Materialverbleib Sektor 7 Verkehrsinfrastruktur 2020 – 2030 - 2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

4.2.8 Sektor 8: Industrieanlagen

Die deutsche Industrie ist sehr vielfältig aufgestellt. Allen Industriesektoren ist gemein, dass sie Anlagen benötigen, mit welchem die Produktion der jeweiligen Produkte realisiert werden kann. Von den KartAL III-Metallen werden für diese Industrieanlagen relevant Edelstahl und zu einem untergeordneten Anteil Aluminium eingesetzt. Von allen Industriesektoren basieren vor allem die Großanlagen der Lebensmittelproduzenten sowie der Chemie-, Öl- und Gasindustrie auf Edelstahl und haben damit einen relevanten Anteil für Edelstahl am anthropogenen Lager in Deutschland. Dieser muss immer wieder ersetzt und erneuert werden wodurch ein für Edelstahl relevanter In- und Outputstrom entsteht, der im Sektor 8 abgebildet wird.

Untersuchungsgegenstand und Modellansatz

Es finden keine statistischen Erhebungen im Sektor des Industriebaus statt, welche sinnvoll für eine umfassende Modellierung dieses Sektors genutzt werden können. Aus diesem Grund werden alle Güter des Industrieausektors in einem generischen Industriebauprodukt zusammengefasst. Die funktionelle Einheit in Sektor 8 ist also die Anzahl eines generischen Industriebauproduktes, welches auf Basis einer generischen Rektifikationskolonne ausgestaltet wurde.

Der erste Schritt in der Modellierung des Sektors ist die Quantifizierung der funktionellen Einheit. Hierfür werden die Statistiken der WV Metalle [WV Metalle 2001-2017] sowie der BGR [BGR 2001-2016] zusammen mit dem Anteil an Edelstahl im Industriebau [Leffler 1998] zusammengetragen. Das Wachstum wird hier aus der Zeitreihe der Edelstahlproduktion entnommen (1,5 % pro Jahr). Ergänzend wurden Experten interviewt, um den Anteil [WV Metalle 2001-2017] an Aluminium zu identifizieren, der vom Bausektor in den Industriebau fließt (23 %). Um eine Quantifizierung zu erreichen, wird die Gesamtmenge an Edelstahl durch 100 t geteilt (Annahme für das durchschnittliche Gewicht einer Rektifikationskolonne). Die daraus generierte Gesamtzahl an Kolonnen wird genutzt, um die Aluminiummenge in einer generischen Einheit zu berechnen. Hierbei werden die letzten 15 Jahre betrachtet, um einen verlässlichen Mittelwert zu erhalten. Die Lebensdauer einer Kolonne wird auf Basis der Afa Tabelle für die Erdölindustrie [BMF 1995] und einer Zuschätzung der realen Lebensdauer auf 20 Jahr festgelegt. Es handelt sich hierbei um einen Top-down-Ansatz.

Um das deutsche Lager abzubilden wird eine Retromodellierung vorgenommen, welche im Jahr 1990 startet. Die Inputs von 1990 bis 2014 werden analog zur Modellierung der Zukunft mit der Wachstumsrate von 1,5 % pro Jahr rückgerechnet. Mittels der Verweilzeitverteilung stellt sich hierdurch ein Gleichgewicht bis 2015 ein. Hierdurch ist eine Berechnung der Zukunft ohne große Sprünge oder unrealistische Zuwächse möglich.

In der folgenden Tabelle finden sich die Metalle, welche in Sektor 8 im Gut des generischen Industriebauprodukts abgebildet werden.

Tabelle 35: Übersicht Sektor 8 Industrieanlagen (Güter und enthaltene Materialien)

Gut	Aluminium Guss	Aluminium Knet	Edelstahl	Zink	Zink auf Stahl (Verzinkung)	Zinn	Messing	Magnesium	Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial
Industriebauprodukt generisch		✓	✓						

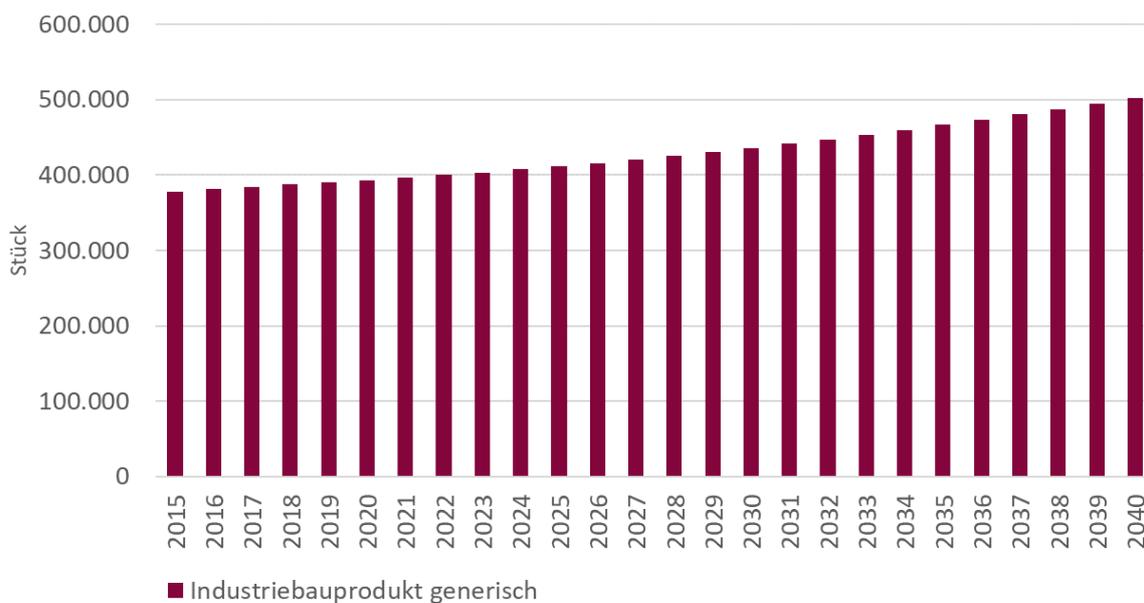
Quelle: eigene Darstellung

Datengrundlagen

In Abbildung 68 ist die Entwicklung des Güterbestandes in Sektor 8 dargestellt. Wie oben dargestellt wird ausgehend vom Startbestand von 380.000 generischen Kolonnen eine Fortschreibung mit einer Wachstumsrate von durchschnittlich 1,5 % pro Jahr durchgeführt. Dies führt zu einem Endbestand von rund generischen 500.000 Kolonnen in 2040, was einem Wachstum von gut 120.000 generischen Kolonnen bzw. fast 33 % entspricht.

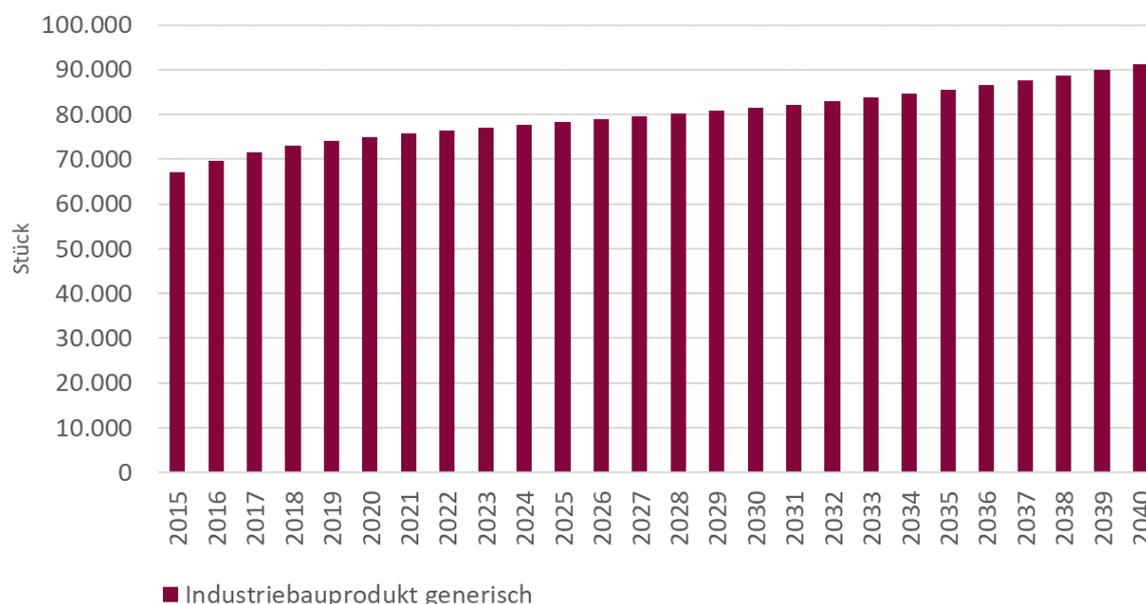
In Abbildung 69 ist die Entnahme von Gütern über den Betrachtungszeitraum dargestellt. Wie zu erkennen ist, steigt die Entnahme von 67.000 Kolonnen im Jahr 2015 auf 91.000 Kolonnen im Jahr 2040. Dies entspricht einem Anstieg von 24.000 bzw. rund 36 %.

Abbildung 68: Güterbestand Sektor 8 Industrieanlagen 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 69: Güterentnahme Sektor 8 Industrieanlagen 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Berechnungsergebnisse

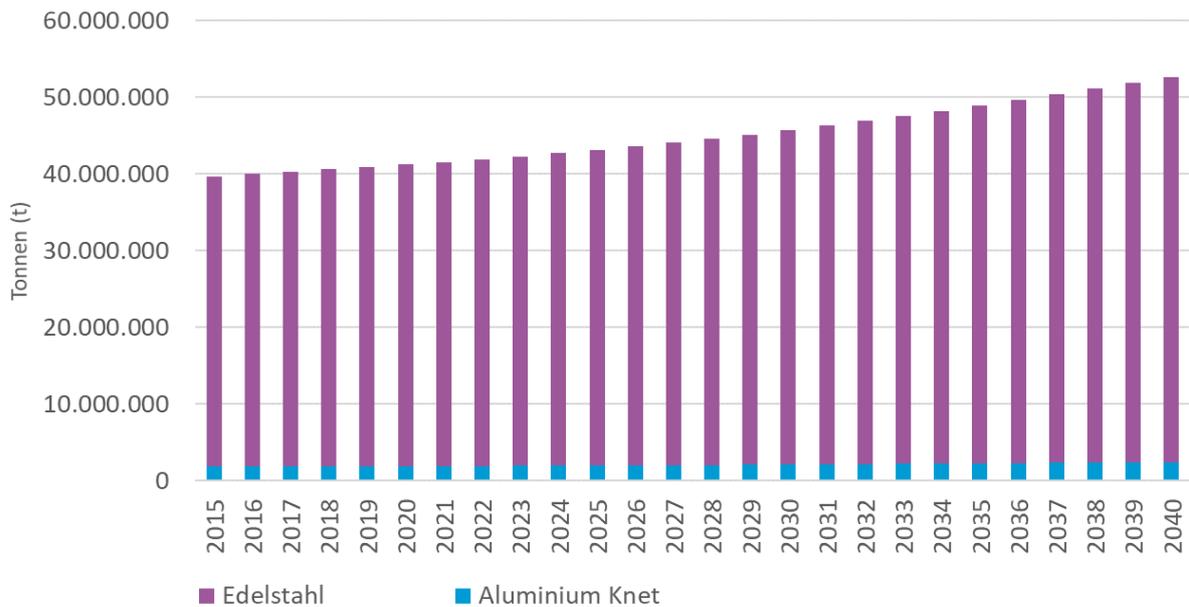
Auf Basis der dargestellten Entwicklungen des In- und Output sowie der hinterlegten Materialkoeffizienten, ergibt sich der in Abbildung 70 dargestellte Materialbestand sowie die in Abbildung 71 dargestellte Materialentnahme aus dem anthropogenen Lager.

Nach Abbildung 70 beläuft sich der Materialbestand 2015 in Sektor 8 auf 39,6 Millionen Tonnen, dominiert von 37,8 Millionen Tonnen Edelstahl. Der Materialbestand wird sich bis 2040 auf 52,6 Millionen Tonnen insgesamt erhöhen (+32,7 %).

Der langfristige und kontinuierliche Austausch von Industrieanlagen bewirkt eine Materialentnahme von rund 1,7 Millionen Tonnen im Jahr 2015 und wird vor allem durch den Edelstahlbedarf in Höhe von rund 1,6 Millionen Tonnen dominiert. Die Materialentnahme nimmt bis zum Jahr 2040 zu und beläuft sich dann auf rund 2,2 Millionen Tonnen (+32,3 %).

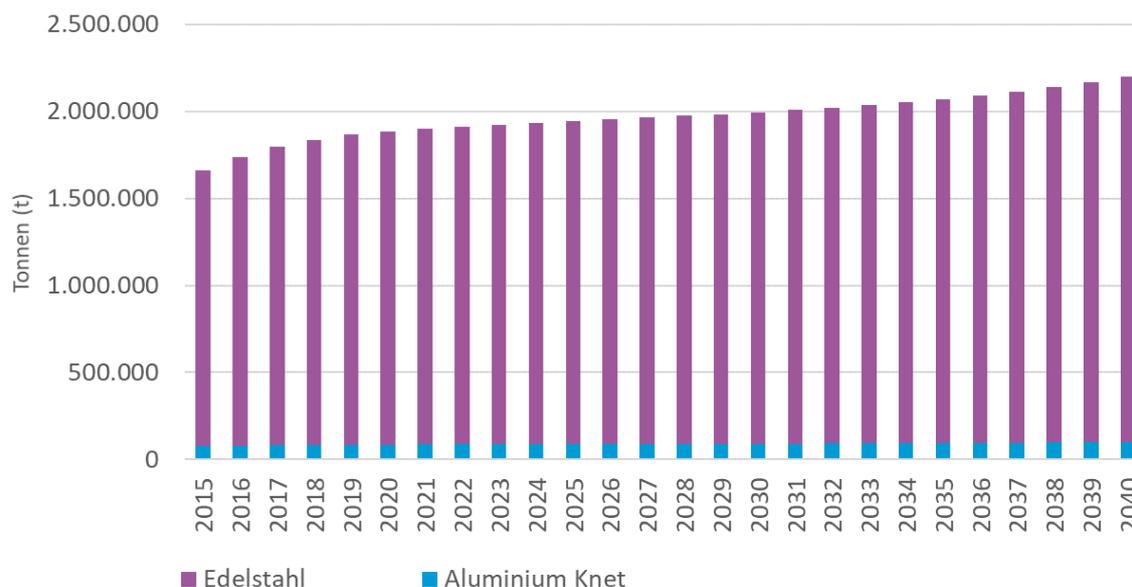
Tabelle 22 zeigt die berechneten Materialentnahmen zu den Stützjahren 2015, 2020, 2030 und 2040.

Abbildung 70: Materialbestand Sektor 8 Industrieanlagen 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 71: Materialentnahme Sektor 8 Industrieanlagen 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

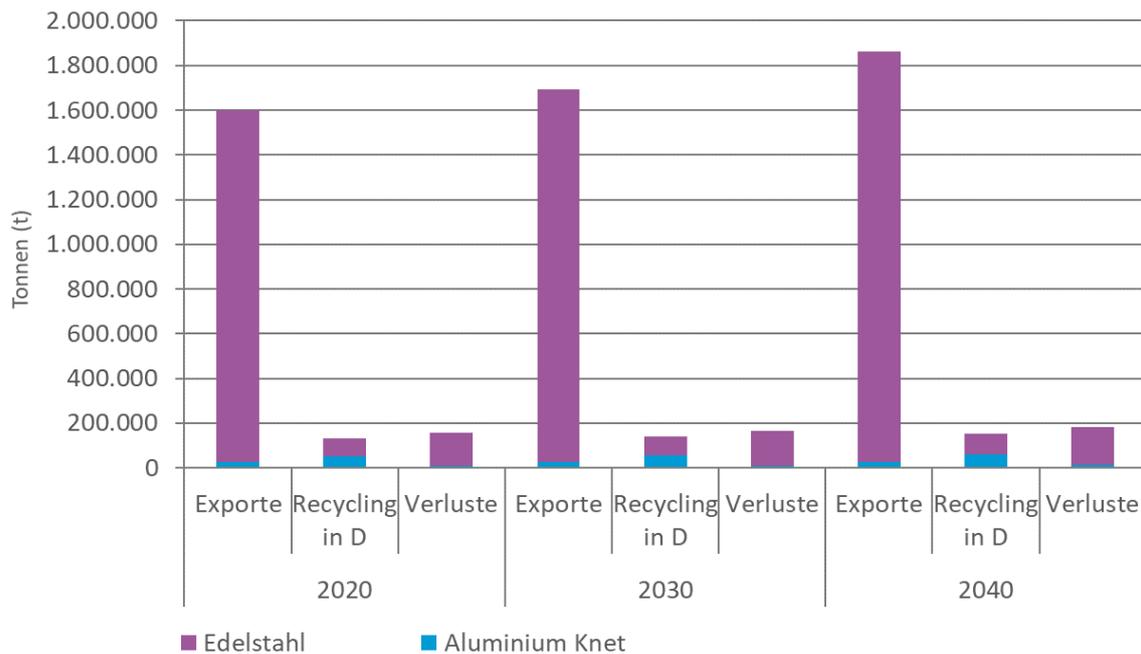
Tabelle 36: Übersicht Sektor 8: Materialentnahme aus dem anthropogenen Lager (in t)

Material	Output 2015	Output 2020	Output 2030	Output 2040	Summe 2015 - 2040
Aluminium Knet	76.198	86.515	91.549	100.816	2.347.641
Edelmetall	1.584.156	1.798.648	1.903.301	2.095.969	48.807.505

eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 72 zeigt den Verbleib der Metalle aus Sektor 8 nach Durchlauf der Verwertung für die Stützjahre 2020, 2030 und 2040. Es wird deutlich, dass die größten Mengen exportiert werden, was einfach über die hohe Exportquote von Edelmetall zu erklären ist. Edelmetall dominiert auch die recycelten Metalle in Deutschland sowie die geringen Verluste, was über den sehr geringen Anteil an Aluminium in diesem Sektor zu erklären ist.

Abbildung 72: Materialverbleib Sektor 8 Industrieanlagen



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

4.2.9 Sektor 9: Maschinen

Der Maschinenbau in Deutschland ist eine Schlüsselindustrie. Die Branche benötigt zur Herstellung ihrer verschiedenen Produkte Metalle. Ob dies nun Belüftungsanlagen, Werkzeugmaschinen oder Baumaschinen sind, alle bestehen zum Großteil aus Metallen, welche den Maschinenbausektor zu einem der größten Verarbeiter von Aluminium und Edelstahl machen. Da der Sektor langfristig gesehen immer weiterwächst, wächst auch der Bedarf an Metallen. Dieser Zuwachs wird in der Modellierung abgebildet und führt auch zukünftig dazu, dass Sektor 9 einer der wichtigsten ist, was die In- und Outputströme von Metallen in Deutschland betrifft.

Untersuchungsgegenstand und Modellansatz

Der Maschinenbau in Deutschland ist sehr vielfältig. Dies ist direkt über die Struktur des VDMA ersichtlich, welcher 38 Fachverbände aufweist. Dies bedeutet auch eine Vielzahl an verschiedensten Produkten, welche statistisch nicht einzeln ausgewiesen werden. Aus diesem Grund werden hier zur Modellierung alle Güter des Maschinenbausektors in einem generischen Maschinenbauprodukt zusammengefasst. Die funktionelle Einheit in Sektor 9 ist also die Anzahl eines generischen Maschinenbauproduktes, welches auf Basis eines Minibaggers ausgestaltet wurde.

Der erste Schritt in der Modellierung des Sektors ist die Quantifizierung der funktionellen Einheit. Hierfür wurde die Statistik des VDMA [VDMA 2018] herangezogen. Die Datenreihen des Maschinenbausektors werden über 15 Jahre analysiert, um die Entwicklung der Produktionsmengen (3 % Zuwachs pro Jahr) fortschreiben zu können, sowie die Produktionsmenge 2015 in eine Stückzahl umzurechnen. Hierbei wurde auf Basis eines Expertengesprächs [HKL 2018] die Lebensdauer des Minibaggers auf 15 Jahre festgelegt. Der Wert des fiktiven Minibaggers wurde durch die Autoren auf Basis von verschiedensten Preislisten, Foreneinträgen und Expertenmeinungen auf 30 000 Euro festgelegt. Die Statistiken

der WV Metalle [WV Metalle 2001-2017] und der BGR [BGR 2001-2016] werden mit den ökonomischen Daten korreliert, um den Metallinput pro Euro Produktionsmenge über die letzten 15 Jahre zu bestimmen. Diese werden auf den fiktiven generischen Bagger umgelegt. Es handelt sich hierbei um einen Top-down-Ansatz.

Um das deutsche Lager abzubilden wird eine Retromodellierung vorgenommen, welche im Jahr 1990 startet. Die Inputs von 1990 bis 2014 werden analog zur Modellierung der Zukunft mit der Wachstumsrate von 3 % rückgerechnet. Mittels der Verweilzeitverteilung stellt sich hierdurch ein Gleichgewicht bis 2015 ein. Hierdurch ist eine Berechnung der Zukunft ohne große Sprünge oder unrealistische Zuwächse möglich.

In der folgenden Tabelle finden sich die Metalle, welche in Sektor 9 im Gut des generischen Maschinenbauprodukts abgebildet werden.

Tabelle 37: Übersicht Sektor 9 Maschinen (Güter und enthaltene Materialien)

Gut	Aluminium Guss	Aluminium Knet	Edelstahl	Zink	Zink auf Stahl (Verzinkung)	Zinn	Messing	Magnesium	Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial	Quellen
Maschinenbauprodukt generisch	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

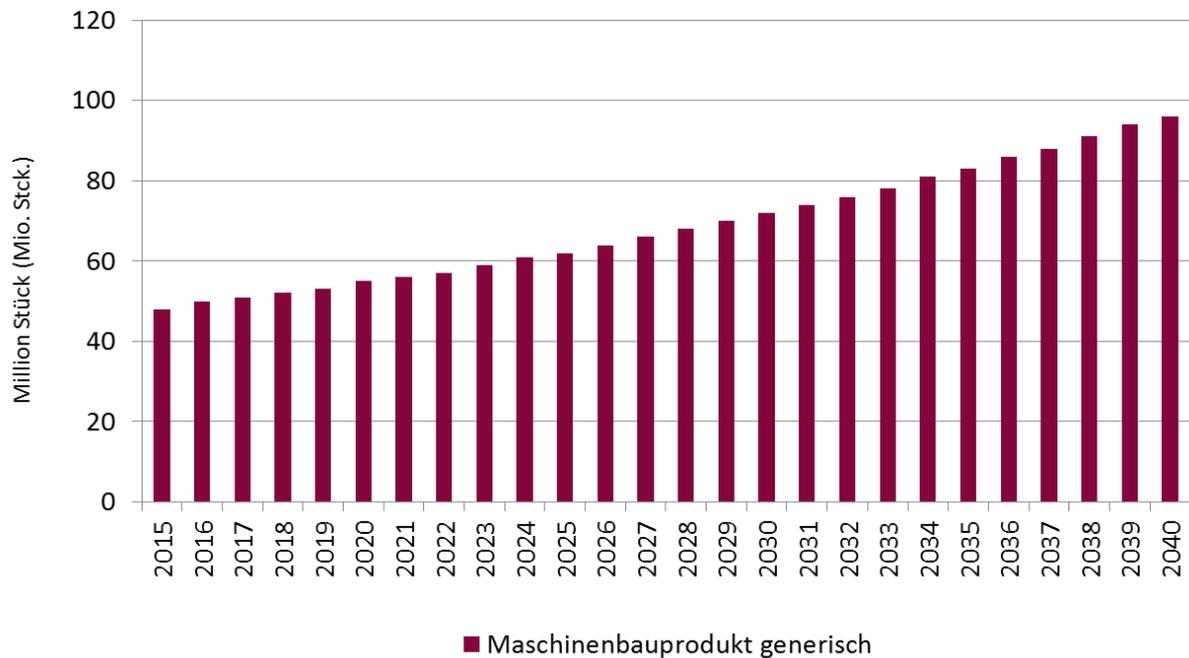
Quelle: eigene Darstellung

Datengrundlagen

In Abbildung 73 ist die Entwicklung des Güterbestandes in Sektor 9 dargestellt. Wie oben dargestellt wird ausgehend vom Startbestand von 48 Millionen Maschinen (generischer Minibagger als Einheit) eine Fortschreibung mit einer Wachstumsrate von 3 % pro Jahr durchgeführt. Dies führt zu einem Endbestand von rund 96 Milliarden in 2040. Dies entspricht einem Wachstum von 48 Millionen bzw. 100 %.

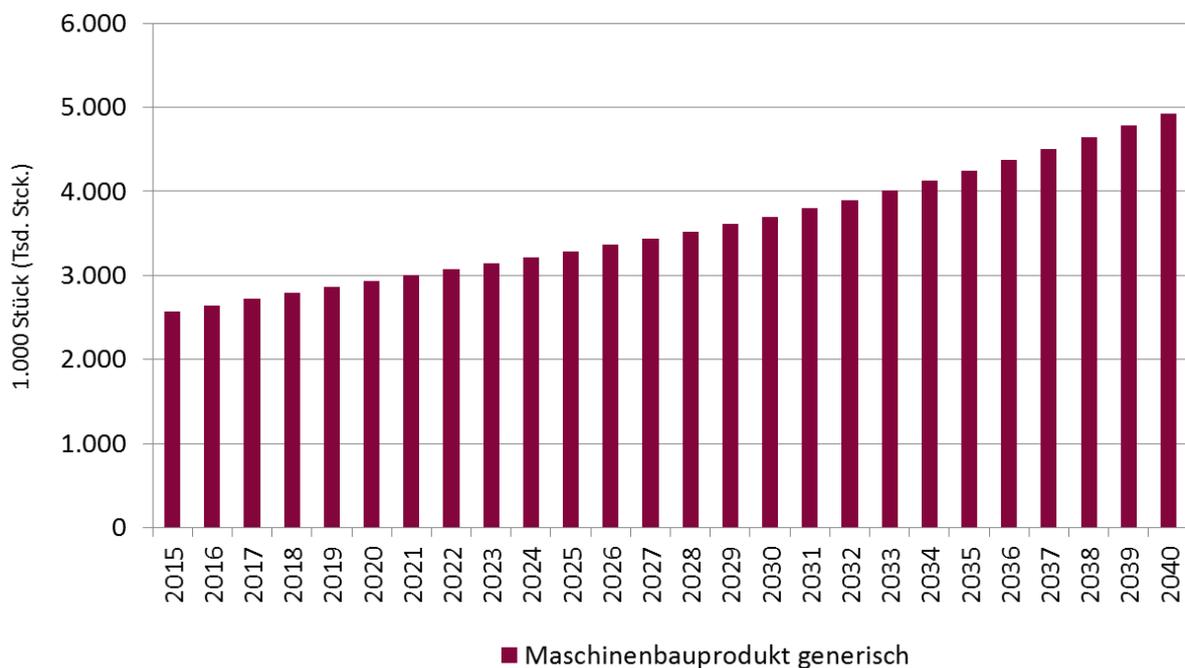
In Abbildung 74 ist die Entnahme von Gütern über den Betrachtungszeitraum dargestellt. Wie zu erkennen ist, steigt die Entnahme von rund 2,6 Millionen im Jahr 2015 auf 4,9 Millionen im Jahr 2040, was einem Anstieg von fast 2,4 Millionen bzw. rund 91,7 % entspricht.

Abbildung 73: Güterbestand Sektor 9 Maschinen 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 74: Güterentnahme Sektor 9 Maschinen 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Berechnungsergebnisse

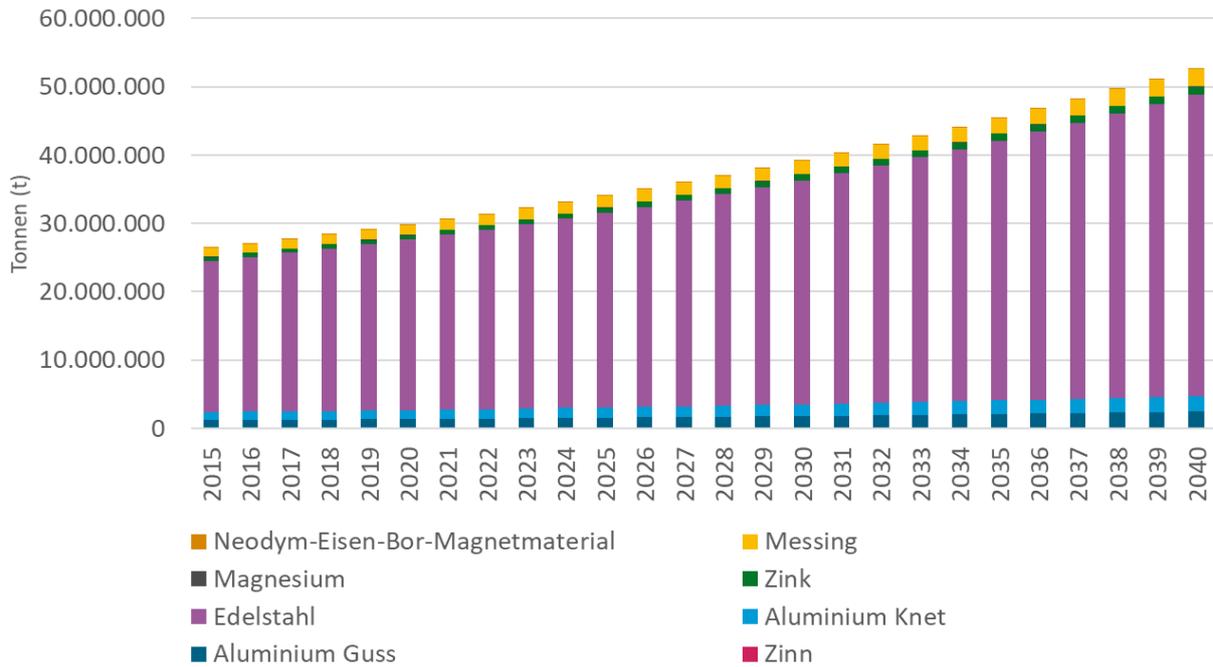
Auf Basis der dargestellten Entwicklungen des In- und Output sowie der hinterlegten Materialkoeffizienten, ergibt sich der in Abbildung 75 dargestellte Materialbestand sowie die in Abbildung 76 dargestellte Materialentnahme.

Nach Abbildung 75 beläuft sich der Materialbestand 2015 in Sektor 9 auf 26,4 Millionen Tonnen, dominiert von 22,1 Millionen Tonnen Edelstahl. Der gesamte Materialbestand wird sich bis 2040 auf 52,6 Millionen Tonnen erhöhen (+99,2 %).

Der langfristige und kontinuierliche Austausch von Maschinen bewirkt eine Materialentnahme von rund 1,4 Millionen Tonnen im Jahr 2015 und wird vor allem durch den Edelstahlbedarf in Höhe von rund 1,2 Millionen Tonnen dominiert. Die Materialentnahme nimmt bis zum Jahr 2040 zu und beläuft sich dann auf rund 2,4 Millionen Tonnen (+91,8 %).

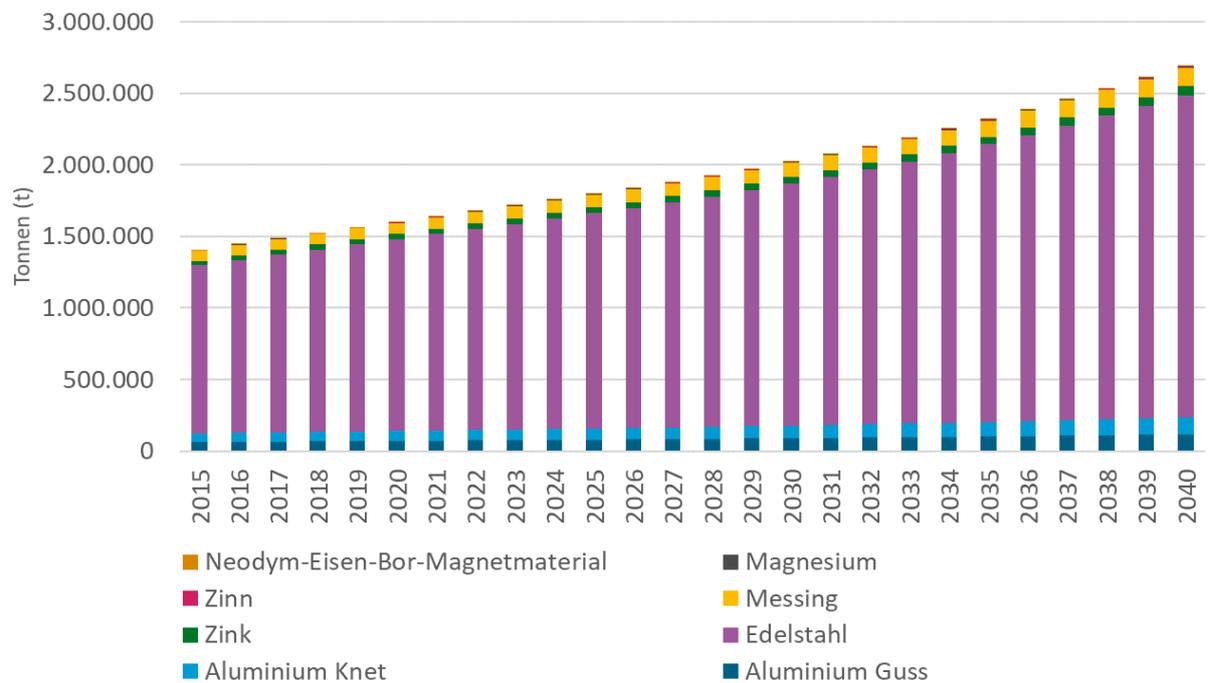
Tabelle 28 zeigt die berechneten Materialentnahmen zu den Stützjahren 2015, 2020, 2030 und 2040.

Abbildung 75: Materialbestand Sektor 9 Maschinen 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 76: Materialentnahme Sektor 9 Maschinen 2015-2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

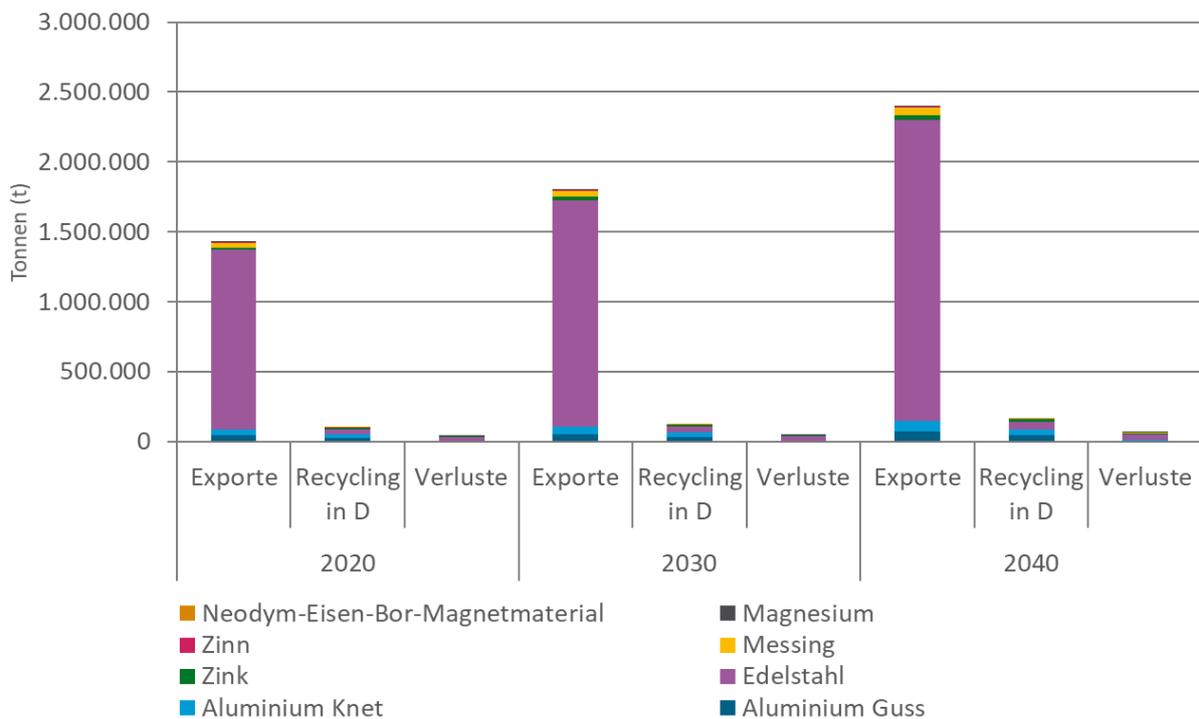
Tabelle 38: Übersicht Sektor 9: Materialentnahme aus dem anthropogenen Lager (in t)

Material	Output 2015	Output 2020	Output 2030	Output 2040	Summe 2015 - 2040
Aluminium Guss	61.704	70.594	88.882	118.642	2.237.748
Aluminium Knet	61.704	70.594	88.882	118.642	2.237.748
Edelstahl	1.174.227	1.343.394	1.691.416	2.257.750	42.622.229
Zink	31.273	35.778	45.047	60.130	1.135.152
Zinn	2.559	2.928	3.687	4.921	92.903
Messing	68.099	77.910	98.094	130.938	2.471.873
Magnesium	2.150	2.460	3.097	4.134	78.045
Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial	632	721	911	1.212	22.927

Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 77 zeigt den Verbleib der Metalle aus Sektor 9 nach Durchlauf der Verwertung für die Stützjahre 2020, 2030 und 2040. Es wird deutlich, dass die größten Mengen exportiert werden, was über die hohe Exportquote von Edelstahl zu erklären ist. Die recycelten Metalle in Deutschland verteilen sich auf die beiden Aluminiumlegierungen und den Edelstahl. Die Verluste werden vor allem vom Edelstahl dominiert, sind aber von vernachlässigbarer Größenordnung.

Abbildung 77: Materialverbleib Sektor 9 Maschinen 2020 – 2030 - 2040



Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

4.3 Gesamtübersicht über das Materiallager, die Outputströme und den Verbleib der einzelnen Metalle

In Tabelle 39 ist das Gesamtmateriallager für die Stützjahre aufgeschlüsselt nach den verschiedenen Metallen. Der Bestand der einzelnen Metalle hat eine unterschiedliche Größenordnung, der von den Anwendungsfeldern abhängt. Während Edelstahl die Spitzenposition einnimmt, da es viele Anwendungsfelder hat, sind die Lager von Zinn und Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial die beiden kleinsten, da beide sehr spezifische Anwendungsfelder haben. Zinn z. B. wird hauptsächlich in Elektronik und als Lagermetall eingesetzt während Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial in Permanentmagneten für Elektromotoren und Generatoren seine Hauptanwendungen hat. Die geringe Lagergröße dieser beiden Metallströme kombiniert mit einer starken Ausweitung der Anwendungsfelder (elektronische Geräte, Elektromobilität sowie Windkraftanlagen) führt zu einem starken Zuwachs des Lagers bis 2040. Bei Zinn verdoppelt sich das Lager, während Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterialien sogar einer Verdreifachung des Bestandes entgegensehen. Das Lager der übrigen Materialien hat sich weitgehend stabilisiert und wächst mit der mittleren Wachstumsrate der Wirtschaft von ca. 2 % pro Jahr bzw. rund 50 % über 25 Jahre.

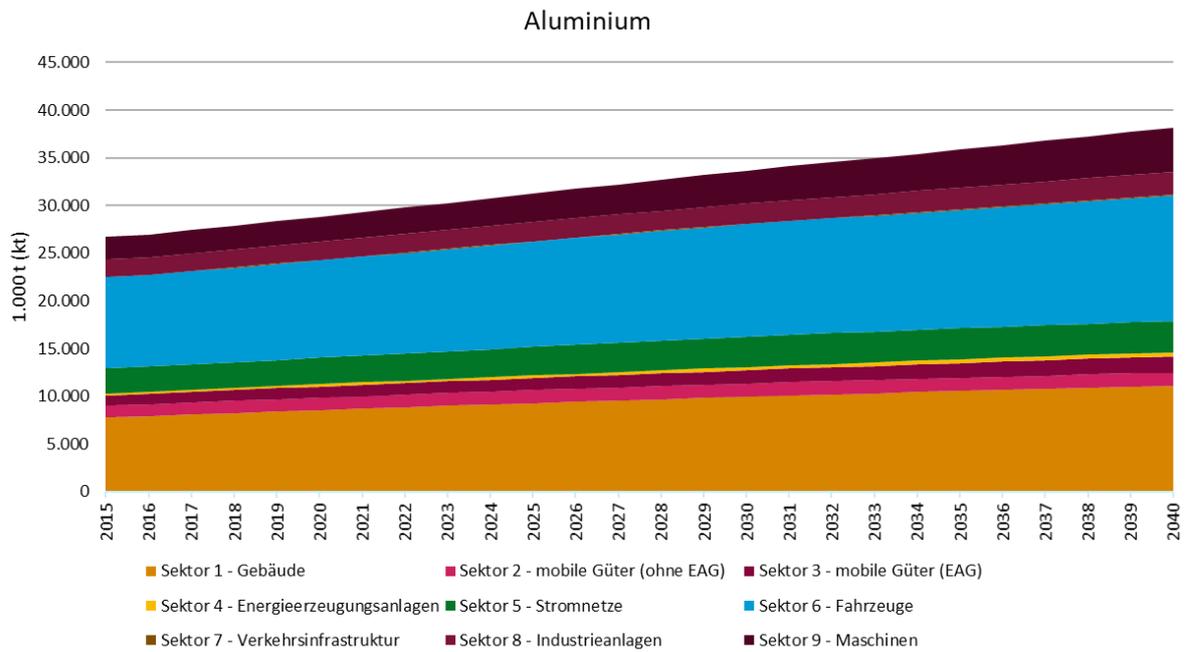
Tabelle 39: Gesamtmateriallager in Deutschland für die Jahre 2015/2020/2030/2040 in t sowie die prozentuale Änderung

Material	Lager 2015	Lager 2020	Lager 2030	Lager 2040	Änderung 2015 - 2040
Aluminium Guss	7.898.470	8.652.642	10.315.958	12.192.556	+54 %
Aluminium Knet	18.779.332	20.321.583	23.466.707	26.148.270	+39 %
Edelstahl	94.343.289	101.406.740	117.890.086	139.079.504	+47 %
Zink	4.963.330	5.447.896	6.416.004	7.333.482	+48 %
Zink auf Stahl (Verzinkung)	4.275.225	4.675.246	5.426.956	6.002.169	+40 %
Zinn	67.406	79.659	104.062	137.922	+105 %
Messing	7.767.177	8.546.127	10.156.444	11.769.118	+52 %
Magnesium	179.615	196.838	235.339	283.314	+66 %
Nd-Fe-B-Magnetmaterial	33.828	44.784	80.432	130.150	+285 %
Summe	138.307.673	149.371.515	174.091.988	203.076.485	+47 %

Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

In der nachfolgenden Abbildung ist die Bestandentwicklung zwischen 2015 bis 2040 für Aluminium gesamt und unterteilt nach den neun untersuchten Sektoren des anthropogenen Lagers abgebildet. Das gesamte Aluminiumlager wächst demnach ausgehend von rund 26,6 Millionen Tonnen im Jahr 2015 auf gut 38 Millionen Tonnen im Jahr 2040 an. Die mit Abstand wichtigsten Sektoren für Aluminium sind der Sektor 6 (Fahrzeuge) und der Sektor 1 (Gebäude). Dies gilt sowohl für das Ausgangsjahr 2015 als auch weiterhin im Zieljahr 2040.

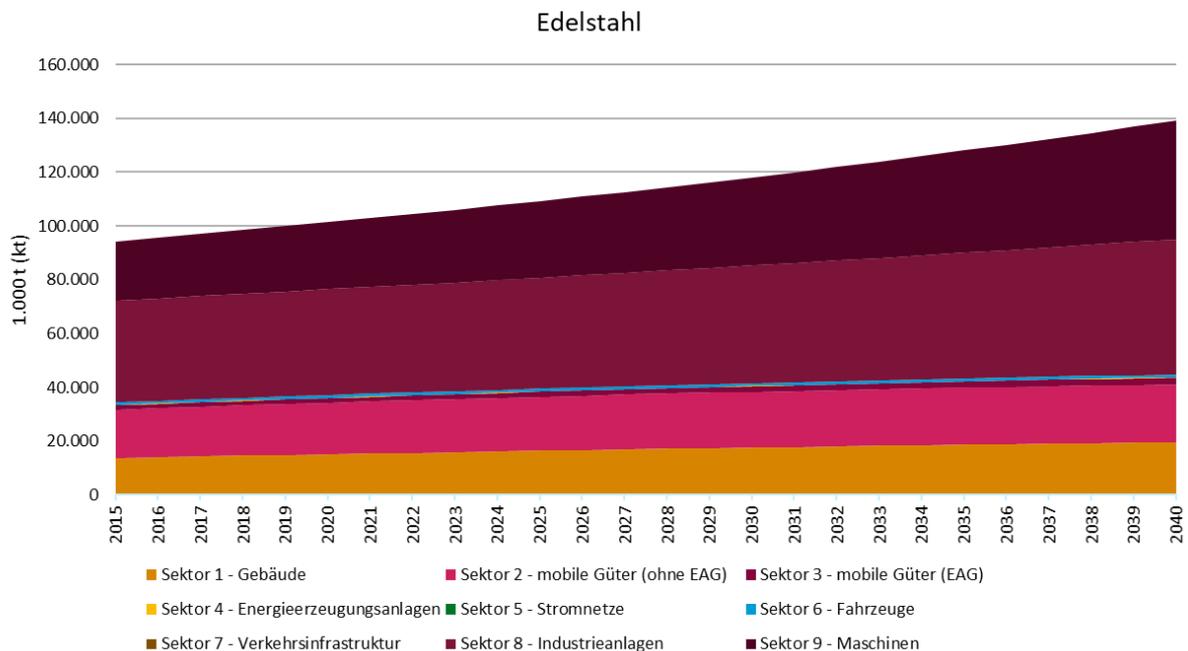
Abbildung 78: Bestandsentwicklung für Aluminium von 2015-2040 gegliedert nach Sektoren



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e. V.

Die Ergebnisse für die Bestandsentwicklung für Edelstahl sind in der nachfolgenden Abbildung 80 dargestellt. Insgesamt wächst der Edelstahlbestand von über 94 Millionen Tonnen im Jahr 2015 auf gut 139 Millionen Tonnen im Jahr 2040 an. Die Sektoren 8 (Industrieanlagen) und 9 (Maschinen) tragen für Edelstahl die größten Anteile am Bestand.

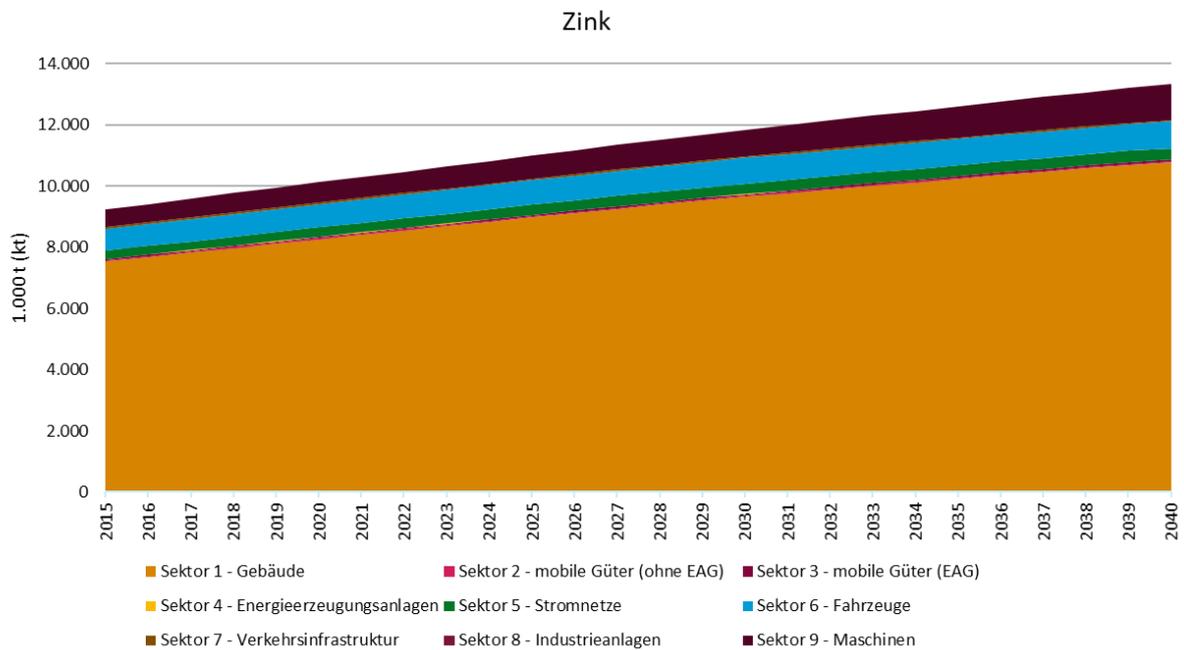
Abbildung 79: Bestandsentwicklung für Edelstahl von 2015-2040 gegliedert nach Sektoren



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e. V.

In Abbildung 80 ist die Bestandsentwicklung für Zink zwischen 2015 und 2040 dargestellt. Insgesamt wächst der Zinkbestand von gut 9,2 Millionen Tonnen im Jahr 2015 bis auf über 13 Millionen Tonnen im Jahr 2040 an. Der Sektor 1 (Gebäude) weist einen überragenden Anteil am Zinkbestand aus.

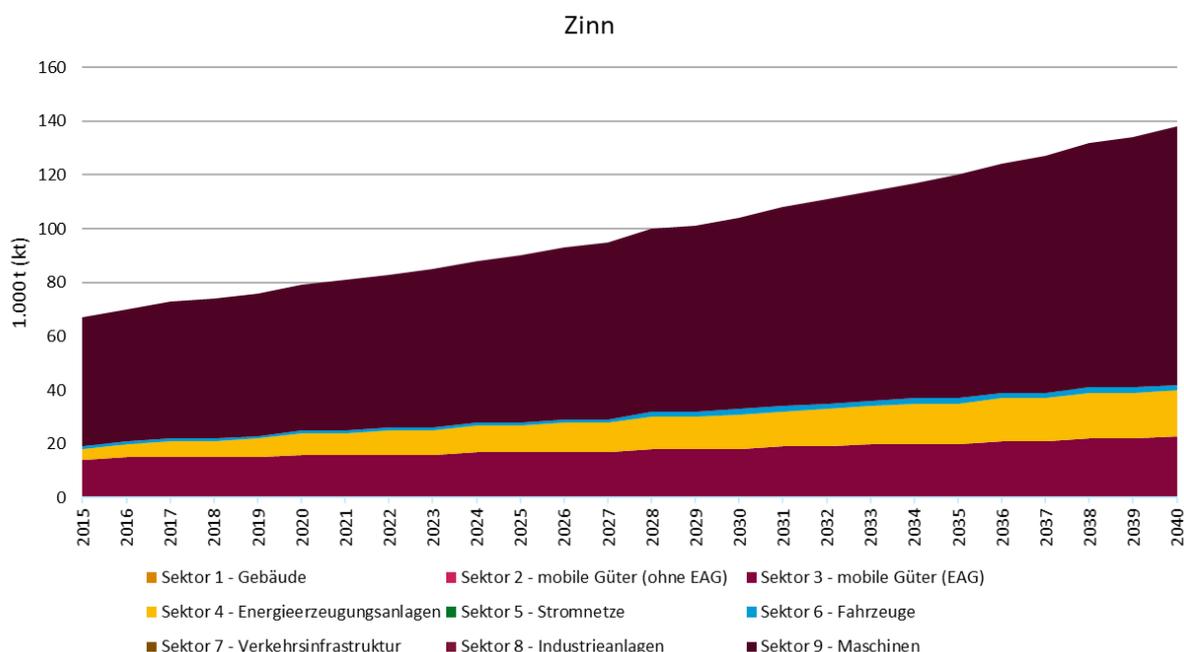
Abbildung 80: Bestandsentwicklung für Zink von 2015-2040 gegliedert nach Sektoren



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e. V.

In Abbildung 81 ist die Bestandsentwicklung für Zinn aufgeführt. Der Bestand verdoppelt sich ungefähr von rund 67.400 Tonnen im Jahr 2015 auf rund 137.900 Tonnen im Jahr 2040. Die Sektoren 3 (mobile Güter EAG) und 9 (Maschinen) zeigen die größten Beiträge.

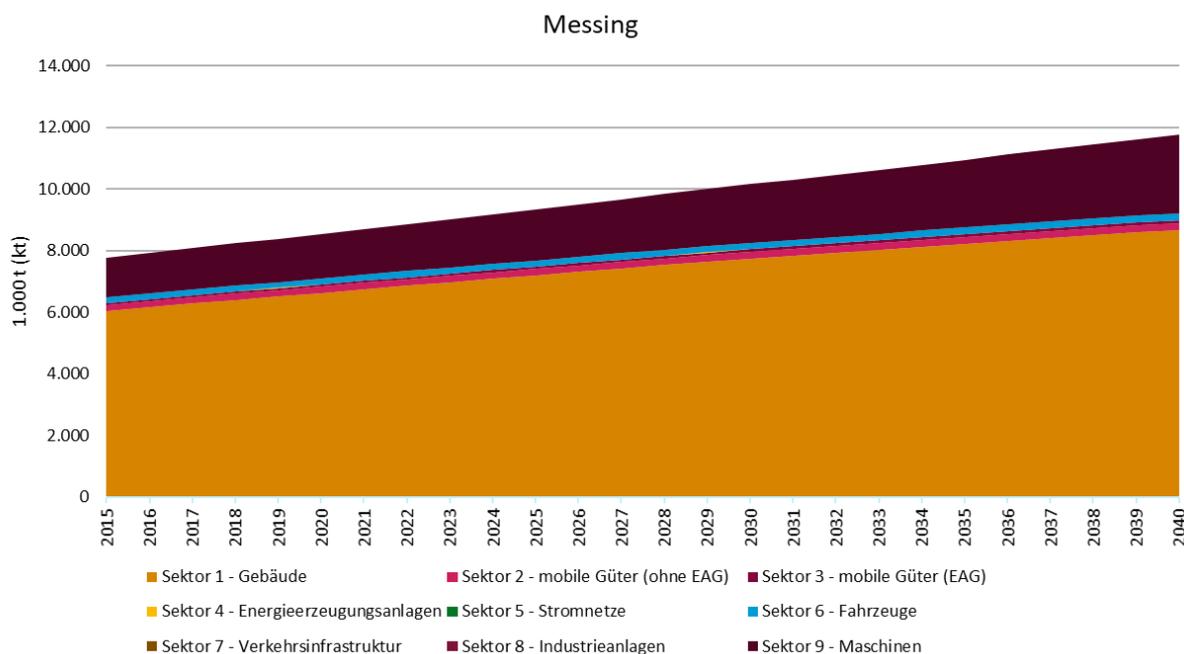
Abbildung 81: Bestandsentwicklung für Zinn von 2015-2040 gegliedert nach Sektoren



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e. V.

In der folgenden Abbildung ist die Bestandsentwicklung für Messing dokumentiert. Der Bestand an Messing wächst von fast 7,8 Millionen Tonnen (2015) auf fast 11,8 Millionen Tonnen im Jahr 2040 an. Überrasgender Sektor für Messing ist Sektor 1 (Gebäude). Mit deutlichem Abstand folgt Sektor 9 (Maschinen).

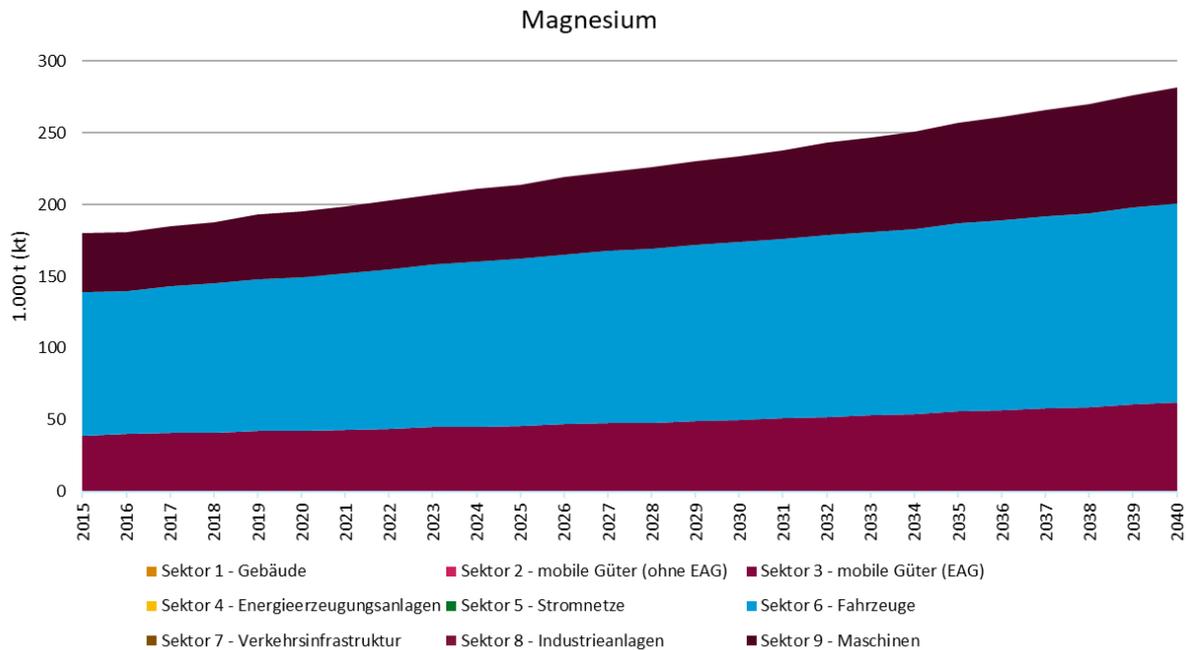
Abbildung 82: Bestandsentwicklung für Messing von 2015-2040 gegliedert nach Sektoren



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e. V.

Die Bestandentwicklung für Magnesium ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Insgesamt wächst der Bestand an Magnesium von rund 179.600 Tonnen (2015) deutlich auf rund 283.300 Tonnen (2040) an. Der Sektor 6 (Fahrzeuge) trägt den wichtigsten Anteil.

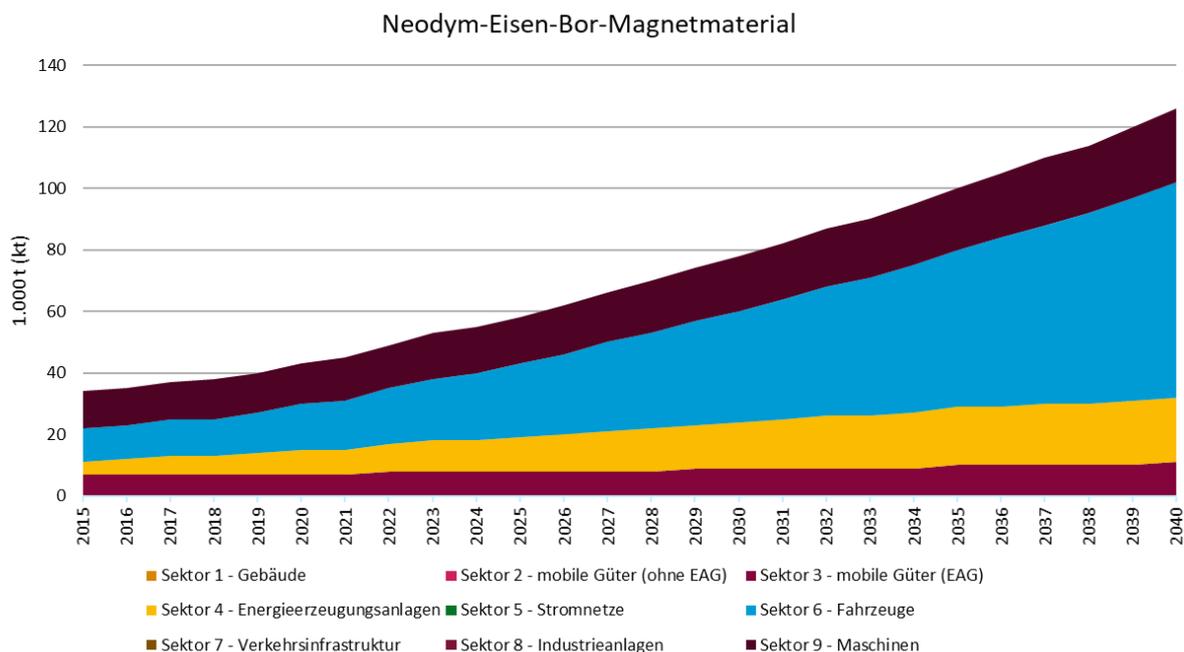
Abbildung 83: Bestandentwicklung für Magnesium von 2015-2040 gegliedert nach Sektoren



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e. V.

Die Bestandentwicklung von Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial ist in der Abbildung 84 dargestellt. Insgesamt wächst der Bestand von rund 33.800 Tonnen (2015) auf rund 130.100 Tonnen (2040) an. Dies entspricht einem Wachstum von rund 285 % über den Szenariozeitraum. Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial weist zwar von allen sieben untersuchten Metallen/Legierungen die absolut geringsten Bestandsmengen auf. Hinsichtlich der Wachstumsdynamik bis 2040 liegt es allerdings an erster Stelle. Wesentlicher Treiber hierfür ist der Sektor 6 (Fahrzeuge), der bis 2040 einen überragenden Anteil an den Bestandsmengen erreicht. Es folgen die Sektoren 4 (Energieerzeugungsanlagen) und Sektor 9 (Maschinen).

Abbildung 84: Bestandsentwicklung für Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial von 2015-2040 gegliedert nach Sektoren



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e. V.

In Tabelle 40 sind die Gesamtmaterialoutputs aus dem deutschen Lager für die Stützjahre 2015, 2020, 2030 und 2040 aufgeschlüsselt nach den verschiedenen betrachteten Metallen dargestellt. Ebenso ist die Veränderung der Outputs von 2015 bis 2040 sowohl für die einzelnen Metalle als auch für die gesamten Outputmengen dargestellt.

Wie in Tabelle 40 dargestellt, sind die Änderungen des Outputs (prozentual zwischen 2015 bis 2040) aus dem Lager im Vergleich der Metalle/Legierungen etwas inhomogener als der Bestand. Der Einfluss des Lagers auf den Output ist zu sehen, da die Veränderung des Outputs bei Zinn und Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial sehr nah an der Veränderung des Lagers liegt. Die leicht geringeren Zuwächse (im Vergleich zum Bestand) lassen sich über die Lebensdauer der Güter erklären: Die Güter sind sofort auf die Bestandszahlen wirksam, benötigen aber je nach Gut zwischen etwa 8 bis 20 Jahre, um den Bestand zu verlassen und auf die Outputzahlen zu wirken. Bei den übrigen Metallen stechen besonders Zink und Aluminium in Gusslegierung hervor, die deutlich über den durchschnittlichen 50 % der Bestandsentwicklung liegen. Dies ist über verschiedene Trends in den einzelnen Sektoren erklärbar, z. B. durch den Übergang zur Elektromobilität, welche eine andere Metallzusammensetzung der Fahrzeuge bedingt und so zu einem stärkeren Output führen kann. Wie im Lager ist es auch beim Output der Fall, dass in Summe die Gesamtzunahme (hier 54 % im Szenariozeitraum) weitgehend dem Wirtschaftswachstum entspricht.

Tabelle 40: Gesamtmaterialoutputs aus dem deutschen Lager für die Jahre 2015/2020/2030/2040 sowie die Summen und die prozentualen Änderungen (in t)

Material	Output 2015	Output 2020	Output 2030	Output 2040	Summe 2015 - 2040	Änderung 2015 - 2040
Aluminium Guss	487.149	549.654	704.529	863.300	17.074.469	+77 %
Aluminium Knet	655.227	730.851	864.980	992.186	19.625.060	+51 %
Edelstahl	4.810.107	5.481.983	6.260.223	7.256.763	157.943.768	+51 %
Zink	83.918	93.685	115.239	141.053	2.855.164	+68 %
Zink auf Stahl (Verzinkung)	51.572	56.817	68.096	78.826	1.664.191	+53 %
Zinn	4.028	4.505	5.887	7.584	145.544	+88 %
Messing	152.924	169.549	203.851	249.179	5.114.707	+63 %
Magnesium	11.139	12.665	16.127	19.688	391.968	+77 %
Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial	1844	2129	4121	7044	98372	+282 %
Summe	6.257.908	7.101.838	8.243.053	9.615.623	204.913.243	+54 %

Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

In Tabelle 41 sind die Orte des Verbleibs der verschiedenen Metallmengen nach Durchlauf der Verwertungswege für die Stützjahre 2020, 2030 und 2040 aufgeschlüsselt nach den verschiedenen betrachteten Metallen und den Orten des Verbleibs dargestellt. Zusätzlich sind die Gesamtmetallmengen in Summe für die einzelnen Verbleibsorte dargestellt.

Die Mengen in den einzelnen Verbleibsorten Export, Recycling in Deutschland und Verluste entsprechen in Summe dem Gesamtmaterialoutput aus Tabelle 40. Es wird jedoch deutlich, dass jedes Metall einen anderen Verwertungsweg aufweist und sich entsprechend unterschiedliche auf die Verbleibsorte verteilt. Aluminium wird etwas stärker exportiert als in Deutschland recycelt (was einerseits am Export des Schrottes und andererseits vor allem am Export von Auto und Maschinen liegt). Für Edelstahl (hier wird vor allem der Metallschrott direkt exportiert) und auch Messing (hier sind es nur die Güterexporte, die eine Rolle spielen) ist der Export der überragende Weg. Bei Zink und Magnesium zeigt sich gleichmäßig Export und Recycling in Deutschland. Zink auf Stahl und Zinn werden vor allem in Deutschland recycelt.

Allerdings muss betont werden, dass in absoluten Mengen von den untersuchten Metallen/Legierungen vor allem das Recycling von Aluminium in Deutschland heraussticht. Für Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial finden sich zur Zeit keine Verwertungswege oder eine dezidierte Rückgewinnungsstruktur, weshalb diese auf Grund des Datenmangels hier dem Recycling in Deutschland zugeordnet wurden. Für die Zukunft kann dieses Potenzial durchaus realisiert werden. In Summe dominiert der Export, da vor allem Edelstahl zumeist exportiert wird und die anderen Metallströme dies nicht ausgleichen können.

Tabelle 41: Verbleib der verschiedenen Metalle für die Jahre 2020/2030/2040 (in t)

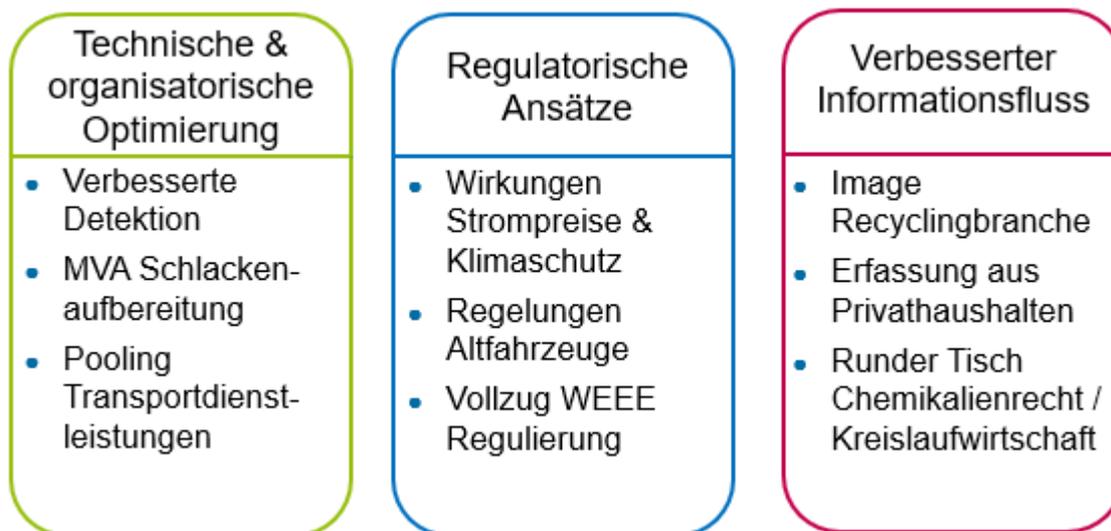
Material	Verbleibort	Output 2020	Output 2030	Output 2040
Aluminium Guss	Export	302.500	401.685	507.479
	Recycling in D	167.346	213.208	258.196
	Verluste	20.289	25.273	30.366
Aluminium Knet	Export	309.492	377.243	443.816
	Recycling in D	312.040	367.159	415.803
	Verluste	48.475	56.214	63.575
Edelstahl	Export	4.066.978	4.669.517	5.508.281
	Recycling in D	169.402	192.151	219.741
	Verluste	253.046	279.316	315.629
Zink	Export	37.838	47.657	59.329
	Recycling in D	36.780	45.246	54.487
	Verluste	15.173	18.570	22.671
Zink auf Stahl	Export	13.170	16.300	18.952
	Recycling in D	22.186	26.635	30.515
	Verluste	21.204	25.162	29.007
Zinn	Export	1.792	2.251	2.924
	Recycling in D	24.149	29.226	33.929
	Verluste	5.997	7.363	8.900
Messing	Export	42.596	53.546	69.983
	Recycling in D	12.969	14.241	15.196
	Verluste	4.624	5.288	6.082
Magnesium	Export	5.690	7.434	9.189
	Recycling in D	6.283	7.875	9.481
	Verluste	666	817	979
Neodym-Eisen-Bor- Magnetmaterial	Export	0	0	0
	Recycling in D	1.495	2.885	4.944
	Verluste	0	0	0
Summe	Export	4.780.055	5.575.633	6.619.953
	Recycling in D	751.153	895.742	1.037.349
	Verluste	370.968	420.888	482.155

Quelle: eigene Darstellung auf Basis DyMAS Modellierung, Öko-Institut e.V.

4.4 Hemmnisse und Lösungsansätze

Im Unterschied zum mineralischen Materialsystem existieren für die meisten der untersuchten Nicht-Eisenmetalle gut entwickelte Recyclingstrukturen. Dennoch wurden durch den Austausch mit den beteiligten Praxisakteuren im Projektverlauf unterschiedliche Hemmnisse für eine weiter zu optimierende Kreislaufwirtschaft vorgebracht und diskutiert. Darauf aufbauend wurden Lösungsansätze entwickelt, die sich in die Bereiche „Technische und organisatorische Optimierung“, „Regulatorische Ansätze“ und „Verbesserter Informationsfluss“ gliedern lassen (siehe Abbildung).

Abbildung 85: Überblick ausgewählter Lösungsansätze



Quelle: eigene Darstellung Öko-Institut e. V.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die wesentlichen Hemmnisse und Lösungsansätze im Detail beschrieben.

4.4.1 Technische Optimierung: Verbesserte Detektion von Schrotten

Hintergrund / Hemmnis: Die Anforderung an die Qualität von Sekundärmaterial steigt (auch seitens Sekundärschmelzen). Insb. Al-, Messing- und Zink-Schrotte sind dagegen sehr inhomogen und müssen besser vorsortiert werden, um Legierungsbestandteile in der Aufbereitung nicht zu verlieren.

Die Legierungsvielfalt in Produkten steigt kontinuierlich, z. T. auch ökonomisch bedingt. Im Bereich Edelstahl steigt beispielsweise die weltweite Produktion nickelfreier Legierungen (ferritischer Chromstahl) an, mit der Folge, dass sich zunehmend Ni-freie Chromstähle mit zeitlicher Verzögerung auch im Schrottstrom wiederfinden [Team Stainless 2013]. Die Sortierung von Cr-Stahl aus komplexen Produkten ist noch nicht optimal und führt dazu, dass chromhaltige Stähle aufgrund ihres Magnetismus in die Carbonstahl-Route sortiert werden und das Legierungselement Chrom verloren geht. Technologische Innovationen im Bereich automatisierter Detektionsverfahren wie XRT¹⁴, LIBS¹⁵ oder XRF¹⁶ sind mit hohen Investitions- und laufenden Kosten verbunden und können zur Verlangsamung von Sortierprozessen führen. In

¹⁴Röntgentransmissions-Messung

¹⁵Laserinduzierte Breakdown-Spektroskopie

¹⁶Röntgenfluoreszenz-Spektrometrie

der nachfolgenden Tabelle sind beispielhaft typische Investitionskosten und Kennwerte für entsprechende Verfahren aufgeführt.

Tabelle 42: Investitionskosten und Kennwerte automatisierter Detektionsverfahren

Technologie	Geschätzter Invest in €	Geschätzter Durchsatz in t/h	Hauptanwendung
XRT	350.000 - 450.000	6 - 8	Trennung leicht/schwer
XRF	750.000 – 850.000	5 - 7	Trennung leicht/schwer und schwere Elemente
LIBS	1 – 1,4 Millionen	8 - 10	Al-Legierungen

Quelle: [Industrie 2019]

Aus der obigen Tabelle geht hervor, dass für die Schrottaufbereitungsbetriebe die Anschaffung der entsprechenden automatisierten Detektionsverfahren mit erheblichen Investitionen verbunden ist. In diesem Kontext besteht nach Einschätzung von Marktteilnehmern die Herausforderung, dass hohe Mengendurchsätze bei den entsprechend ausgestatteten Sortieranlagen unabdingbar sind, um die relativ hohen Investitionskosten refinanzieren zu können. Das Hemmnis besteht nicht zuletzt darin, dass die Vergütung für hochwertig sortierte Schrotte am Weltmarkt nicht ausreichend ist, damit sich diese Technologien am Markt bislang schneller durchsetzen.

Lösungsansatz: Es braucht finanzielle Anreize, um moderne Detektionsverfahren stärker in automatisierten Sortierprozessen zur Anwendung zu bringen. Die Adressaten sind demnach Sortier- und Aufbereitungsbetriebe von Metallschrotten. Durch z. B. steuerliche Anreize wie verkürzte Abschreibungsfristen¹⁷ oder Regelungen für Sonderabschreibungen für entsprechende Anlagen und Technologien können Investitionskosten in größerem Umfang steuerlich geltend gemacht werden und die Hürden zur Anschaffung gesenkt werden. Die Vergabe von Krediten zu Vorzugskonditionen kann z. B. durch staatliche Organisationen wie die KfW Bank oder Zuschüsse für die Finanzierung der Investitionen erfolgen. Hier ist zu überlegen, das existierende BMU Umweltinnovationsprogramm¹⁸, welches 30 % Investitionszuschuss oder bis 70 % der förderfähigen Kosten als zinsverbilligten Kredit vorsieht mit der Begründung der besonders hohen Investitionen (siehe oben) und der Relevanz für die Rohstoffversorgung in Bereich Schrottreycling in den Förderkonditionen weiter zu entwickeln. Regelungen der EU etc. bzgl. Beihilfen sind hier zu beachten.

Adressaten: KfW Bank und vergleichbare Institutionen

4.4.2 Technische Optimierung: MVA Schlackenaufbereitung

Hintergrund / Hemmnis: Nur die Hälfte von Aluminium, Edelstahl und Messing wird aus MVA Schlacke zurückgewonnen, der Rest geht bislang verloren. Zinn, Zink und Magnetmaterialien werden nicht zurückgewonnen. Die Wahrnehmung des Recyclingpotenzials von Metallen aus Schlacken, Aschen und Stäuben wird von den Praxisakteuren als bislang gering eingeschätzt.

Es existieren zwar technische Verfahren, die eine höhere Metallausbeute aus MVA Schlacken ermöglichen. Das Hemmnis besteht nach Experteneinschätzungen darin, dass durch die Metall-

¹⁷ Festgelegt in der AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter des Bundeswirtschaftsministeriums

¹⁸ [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/Finanzierungsangebote/BMU-Umweltinnovationsprogramm-\(230\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/Finanzierungsangebote/BMU-Umweltinnovationsprogramm-(230)/)

rückgewinnung die Korngröße der Restmenge aus der Schlacke abnimmt und damit weitere Verwendungswege ausscheiden und das Material damit unbrauchbar / unverkäuflich wird.

Lösungsansatz: Ein Ansatz besteht darin, die Forschung hinsichtlich der Metallrückgewinnung aus Schlacken zu fördern und die Einführung von neuen Technologien finanziell unterstützen. Ein robustes BMBF-Programm (min. 25 Mio. Euro) zur verbesserten Metallrückgewinnung aus Schlacken, muss speziell die bislang schwierig adressierbaren MVA-Schlacken unbedingt berücksichtigen. Ein regulatorischer Ansatz kann in der Erhöhung der Anforderungen an die Schlackenaufbereitung z. B. über Standards mit einem definierten Maximalgehalt für Metalle, liegen. Da die Metallgehalte nach Schlackenart stark variieren, müsste eine entsprechende Regelung differenzieren. Während der Zinkgehalte im Feststoff von Elektroofenschlacken (EOS) mit 900 mg/kg angegeben (also 0,09 %), liegt der Zinkgehalt bei Kupferhüttenmaterial (CUM) im Feststoff bei 7 – 16 g / kg (also rund 1,1 %) [Martens & Goldman 2016].

Adressat: BMBF: Neues spezifisches Forschungsprogramm ausloben, welches Metallgewinnung aus MVA-Schlacken adressiert.

4.4.3 Technische Optimierung: Pooling Transportdienstleistungen

Hintergrund / Hemmnis: Von einer Reihe von Praxisakteuren wurde in den Dialogveranstaltungen angemerkt, dass bei externen Dienstleistern für den Transport von gefährlichen Abfällen die logistischen und vor allem personellen Kapazitäten in quantitativer und qualitativer Hinsicht (Qualifikationsgrad) sehr knapp sind. Aufgrund des damit verbundenen Nachfragemarktes werden diese Dienstleistungen entsprechend teuer angeboten. Gleichzeitig steigen die Deklarationspflichten und die Menge der als gefährlich deklarierten Abfälle. Dies führt zu einer weiteren Verschärfung der Situation.

Lösungsansatz: Da die Kapazitäten externer Transportdienstleister als nicht ausreichend wahrgenommen werden, sollte eine branchenweite Pooling-Lösung von entsprechenden Fahrzeugen entwickelt werden. Diese könnte regional durch Wirtschaftsverbände organisiert und so ausgestaltet sein, dass Sammelfahrten für gefährliche Abfälle von Verbänden (oder von ihnen beauftragten Unternehmen) organisiert werden und diese die angeschlossenen Unternehmen in regelmäßigen Abständen anfahren. Über die Betreiber und Fahrer der Transportdienstleistung sollte den Unternehmen auch Unterstützung bei formalen Anforderungen wie Deklarationspflichten angeboten werden. Die Kosten werden gemeinschaftlich durch die Unternehmen getragen. In diesem Zusammenhang müssen digitale Innovationsprozesse in der Recyclingbranche stärker gefördert werden, damit Effizienzpotenziale in der Abfalllogistik gehoben werden können. Die Nutzung digitaler Plattformlösung zur Bündelung von Transportbedarfen (vgl. Ride-Pooling im Bereich Personenbeförderung) bietet sich hierfür an. Vorbilder hierfür sind z. B. die internetgestützte Schrott- und Metallhandelsbörse „scrappel“¹⁹ sowie die App „wastebox.biz“²⁰, die zum Zweck hat (Bau-)Unternehmen bei der Entsorgung ihrer Baustellenabfälle zu unterstützen.

Adressat: Wirtschaftsverbände: Digital unterstützte Pooling-Lösungen bzgl. Transport gefährlicher Abfälle unterstützen

4.4.4 Regulatorische Ansätze: Wirkung Strompreise und Klimaschutz

Hintergrund / Hemmnis: Schrotte aus Eisen/Stahl und Nichteisenmetallen (sofern kein gefährlicher Abfall) sind in großem Umfang globale Handelsgüter. Damit stehen deutsche

¹⁹ <https://scrappel.com/schrott-kaufen/>

²⁰ <https://www.wastebox.biz/>

Recyclingunternehmen im globalen Wettbewerb. Die für hier ansässigen Unternehmen zu entrichtenden Kosten zur Einhaltung der deutschen und europäischen Umweltgesetzgebung (EEG Umlage und Emissionshandel) sind immer wieder Anlass zur Diskussion über die Zukunftsfähigkeit der deutschen Unternehmen im Bereich Metallrecycling.

Bezüglich der EEG Umlage muss berücksichtigt werden, dass im Rahmen der EEG Novellierung 2014 die potenziellen Wettbewerbsnachteile adressiert wurden (§§ 63 ff. EEG) und Ausgleichsregelungen für stromintensive Unternehmen bereits geschaffen wurden. Grundsätzlich antragsberechtigt sind damit auch Unternehmen in der Verwertungskette von Nichteisenmetallen, sowie Unternehmen aus den Wirtschaftszweigen „Rückgewinnung sortierter Werkstoffe“ (Wirtschaftszweig 38.32) und „Metallerzeugung und -bearbeitung“ (Wirtschaftszweig 24). Die Bewilligung zur Begrenzung der EEG Umlage ist mit verschiedenen Voraussetzungen verbunden (Mindestverbrauch, mind. 16 % Stromkostenintensität, Einführung Energiemanagement). Für begünstigte Unternehmen ist die Reduzierung der EEG-Umlage grundsätzlich auf 15 % begrenzt. Gleichzeitig wurden mit dem neuen EEG auch Ober- und Untergrenzen für die reduzierte Umlage festgelegt (Selbstbehalt, Summenbegrenzung der Umlage, Minimale EEG-Umlage 0,05 ct/kWh für Nichteisenmetallbranche).

Trotz Ausgleichsregelung fallen Kosten für Recyclingunternehmen zur Erfüllung der Anforderungen des EEG an Dies ist für das Gelingen der gesamtgesellschaftlichen Aufgabe auch erforderlich. Eine Abschätzung, wie viele Unternehmen in der Verwertungskette von NE-Schrotten aufgrund des Jahresstromverbrauchs überhaupt antragsberechtigt für eine Ausgleichsregelung sind und wie hoch die entstehenden Kosten durchschnittlich ausfallen und wie sie sich aufteilen (Verbleibende EEG Beiträge, Einrichtung eines Energiemanagementsystems, Berichtspflichten) liegt nicht vor. Weiterhin kann unterstellt werden, dass sich durch die Einrichtung eines zertifiziertes Energie- oder Umweltmanagementsystems (wie für Unternehmens ab 5 GWh Stromverbrauch p.a.) langfristig sinkende Verbrauchswerte einstellen.

Lösungsansatz: Insgesamt sollte die Wissensbasis über den Umfang eines potenziellen Wettbewerbsnachteils für die Unternehmen entlang der Verwertungskette von Basis- und Sondermetallen besser beleuchtet werden, um zu objektiven und belastbaren Einschätzungen hinsichtlich der Belastungen der Unternehmen zu gelangen. Hierzu sollte die hier betroffene Wirtschaft eine transparente Darstellung der Kosteneffekte durch die aktuelle EEG Umlage-regelung erarbeiten und vorlegen. Im Austausch mit dem Gesetzgeber sollte geprüft werden, welche Verfahren zur Prüfung der EEG Konformität effizienter gestaltet werden können (z. B. elektronische Nachweisverfahren) und ob existierende Zuschüsse zur Einführung eines Energie- und Umweltmanagementsystems von den Akteuren ausreichend in Anspruch genommen werden. Dem BMU wird empfohlen entsprechende umfassende Untersuchungen durch beauftragte Dritte zu veranlassen und zu finanzieren sowie die betroffenen Verbände und Unternehmen zur Mitarbeit zu motivieren. Tendenziell ist bei der zukünftigen Fortschreibung des EEG zu prüfen, ob für Unternehmen der Metallverwertungskette die Ausgleichsregelungen für stromintensive Unternehmen ausreichen, vor allem wenn durch ein ambitionierte Energiemanagement die möglichen Energieeffizienzpotenziale bereits weitgehend ausgeschöpft sind. Dem BMU wird empfohlen hier entsprechende umfassende Untersuchungen vornehmen zu lassen und entsprechend zu bewerten. Relevante Ergebnisse sind für zukünftige EEG-Novellierungen zu berücksichtigen.

Adressaten: BMU + betroffene Wirtschaft (NE-Metallindustrie und Recyclingbranche): detaillierte Untersuchung der objektiven Belastungen der Unternehmen durch das EEG. Die Ergebnisse sollen in zukünftige Fortschreibungen des EEG einfließen, um bei Bedarf Entlastungen stromintensiver Recyclingunternehmen zu erreichen.

4.4.5 Regulatorische Ansätze: Regelungen Altfahrzeuge

Hintergrund / Hemmnis: Die im Rahmen des Projekts durchgeführte Stoffstrommodellierung hat den Fahrzeugbereich als relevantesten Sektor für die Verwendung der betrachteten Nicht-Eisenmetalle bestätigt. Im gesamten Fahrzeugsektor (PKW, LKW, Fahrräder, Pedelec, Schienenfahrzeuge etc.) ergibt sich für 2015 ein Materialbestand (stock) von insgesamt rund 11 Millionen Tonnen der betrachteten Metalle und Legierungen.

Im Jahr 2016 wurden aus Deutschland rund 1,66 Millionen gebrauchte PKW und leichte Nutzfahrzeuge in andere EU Staaten und weitere 260.000 in Staaten außerhalb der EU exportiert. Damit findet auch ein späteres Recycling im End-of-Life außerhalb Deutschlands statt. Es kann unterstellt werden, dass der Standard der dabei eingesetzten Behandlungs- und Sortieranlagen nicht überall gleich ist. Neben den statistisch belegten (oder mit Zuschätzungen unterfütterten) Exporten, ist der Verbleib von rund 560.000 Fahrzeugen in Deutschland unbekannt [BMU/UBA 2016].

Lösungsansatz: Der ordnungsgemäße und umweltgerechte Umgang mit Altfahrzeugen in Europa wird durch die Altfahrzeug-Richtlinie ("Richtlinie 2000/53/EG") geregelt. Aktuell befindet sich die Europäische Richtlinie zu Altfahrzeugen in der Evaluation und es wird erwartet, dass die derzeit gültige Richtlinie aus dem Jahr 2000 überarbeitet werden muss. Hier ergibt sich für die Bundesregierung die Möglichkeit zur Einflussnahme mit dem Ziel, die Qualität der Altfahrzeugverwertung insgesamt und hinsichtlich der untersuchten Metalle in Europa zu steigern.

Denkbar wäre, einen bestimmten technischen Standard für Post Shredder Technologien (PST) zu definieren und dabei insbesondere die sensorbasierte Nachsortierung der NE Fraktion zu adressieren. Der Einsatz dieser Technik wäre aber nicht immer (geografisch / bei unterschiedlichen Erlösen für Sekundärmaterial) kostendeckend. Um hier für die Akteure der Recyclingkette entsprechende Investitionssicherheit zu erreichen, könnten entweder die erweiterte Herstellverantwortung oder steuerliche Instrumente unterstützend wirken (siehe auch Lösungsansatz Verbesserte Detektion von Schrotten).

Mit dem Ziel, sensorbasierte Nachsortierung stärker im Markt zu etablieren, könnte die Europäische Altfahrzeugrichtlinie materialspezifische Recyclingquoten formulieren. Solche materialspezifischen Ziele wären aber möglicherweise im Vollzug schwierig durchzusetzen/nachzuweisen. Alternativ könnten die wirtschaftlichen Bedingungen für eine qualitativ hochwertige Separierung der untersuchten Metalle verbessert werden.

Der Export nicht funktionsfähiger Altfahrzeuge in Nicht-OECD-Länder ist durch die Altfahrzeugrichtlinie gesetzlich festgesetzt. Dennoch braucht es klarer definierte Regelungen und Verfahrensabläufe durch die EU, um den Export von vermeintlichen „Gebrauchtfahrzeugen“ effizienter unterbinden. Mit der Anlaufstellenrichtlinie Nr. 9 über die Verbringungen von Altfahrzeugen existiert zwar bereits ein europaweit abgestimmtes Informationsmaterial, wie die Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 über die Verbringung von Abfällen (VVA) auszulegen ist. Diese ist aber für die nationalen Zollbehörden nicht verbindlich. Mit dem Ziel, eine höhere Rechtsverbindlichkeit zu schaffen, sollte die Anwendung der Anlaufstellenrichtlinie Nr. 9 im Rahmen der ELV Revision aufgenommen werden.

Weiterhin kann dies bspw. über eine Beweisumkehr entsprechend der WEEE-Revision erfolgen. Damit wäre ein Exporteur in der Pflicht, die Gebrauchsfähigkeit des Exportguts nachweisen. Eine solche Regelung ist vor allem mit Blick auf die zunehmenden Marktanteile von Hybrid- und vollelektrischen PKW und den darin enthaltenen Lithium-Ionen-Batterien von Bedeutung, da Hochvoltbatterien bei unsachgemäßer Behandlung lebensgefährlich sind und enorme Brand-

risiken z. B. bei Schiffstransport, auf Schrottplätzen in Afrika usw. bergen. Zum Vollzug der Regulierung wird mehr Personal benötigt. Optimierungsmöglichkeiten bestehen auch über die Einführung digitaler Verfahrensabläufe.

Der Scope der Altfahrzeugrichtlinie umfasst bislang PKW und leichte Nutzfahrzeuge. Die im Projekt durchgeführte Stoffstrommodellierung aller Fahrzeuge in Deutschland zeigt, dass auch andere Fahrzeugtypen in nennenswertem Umfang pro Jahr auf dem Bestand abfließen. Für das Jahr 2015 sind dies z. B. rund 5.000 LKW <20t, rund 50.000 LKW >20t und rund 5.000 Busse. Vor diesem Hintergrund ist eine Ausweitung des Scopes der Richtlinie auf weitere Fahrzeuge empfehlenswert.

Adressat: BMU: Es wird empfohlen, dass das BMU die Lösungsansätze in die anstehende Novellierung der Europäischen Altfahrzeug-Richtlinie einbringt.

4.4.6 Regulatorische Ansätze: Vollzug WEEE Regulierung

Hintergrund / Hemmnis: Deutschland konnte nach den jüngsten offiziell vorliegenden Daten zu den insgesamt zurückgenommenen und behandelten Mengen an Elektro(nik)altgeräten (engl. WEEE) die gesetzlich geforderte Mindestsammelquote von 45 % für das Berichtsjahr 2018 nicht erfüllen. Es wurde lediglich eine Sammelquote von 43,11 % erzielt [Löhle et al. 2020]. In diesem Zusammenhang muss hervorgehoben werden, dass ab dem Berichtsjahr 2019 durch die WEEE-Richtlinie eine Mindestsammelquote von 65 % von den Mitgliedsstaaten verlangt wird. Als Hauptursache für die geringe Sammelquote in Deutschland ist vor allem ein großer Export von Elektro(nik)altgeräten in Entwicklungsländer zu sehen – häufig im Kontext der Grauzone Export von Gebrauchsgütern (legal) versus Export von als Abfall geltenden Elektro- und Elektronik-Altgeräten (illegal).

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit schreibt hierzu:

Um den illegalen Export in Entwicklungsländer zu reduzieren, wurden bei der Neufassung des ElektroG im Jahr 2015 die Vorgaben der sogenannten europäischen WEEE-Richtlinie (Richtlinie 2012/19/EU) umgesetzt. Hierbei wurden auch Mindestanforderungen für den Export festgelegt, die auch Kriterien für die Abgrenzung zwischen gebrauchten Geräten einerseits und den als Abfall geltenden Elektro- und Elektronik-Altgeräten andererseits beinhalten.

So dürfen seitdem grundsätzlich nur noch überprüfte und funktionsfähige Gebrauchtgeräte, die ausreichend verpackt sind, als "Nicht-Abfall" exportiert werden. Zudem wurde eine Umkehr der Beweislast eingeführt – der Exporteur muss belegen, dass es sich bei Geräten um funktionsfähige Gebrauchtgeräte und nicht etwa um Abfall handelt. Darüber hinaus wurden im Rahmen des Basler Übereinkommens im Jahr 2015 internationale Leitlinien zur Abgrenzung von Abfall und Nicht-Abfall bei Elektro- und Elektronik-Altgeräten verabschiedet. Schließlich wurden im Jahr 2017 die seit 2007 bestehenden europäischen Anlaufstellen-Leitlinien Nummer 1 über die Verbringung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten an die Vorgaben der WEEE-Richtlinien sowie die Inhalte der Leitlinien unter dem Basler Übereinkommens angepasst. [BMU 2020]

Lösungsansatz: Die Wirkungen der oben zitierten Änderungen des ElektroG im Jahr 2015 im Hinblick auf den Export in Entwicklungsländer sollten einer umfassenden Evaluation unterzogen werden, dies gilt nicht zuletzt für die Wirkungen der Beweislastumkehr für Exporteure. Ziel ist es herauszufinden, ob positive Wirkungen durch die Neufassung 2015 erzielt worden sind. Falls keine oder nur unzureichende Wirkungen erzielt wurden, ist herauszufinden wo die Ursachen hierfür liegen. Eine derartige Untersuchung bedarf einer sorgfältigen Interviewphase mit Befragung von Fachleuten aus dem Bereich Vollzugsbehörden, Zollbehörden, Hafenzoll etc. Angesichts der erheblich zu niedrigen Sammelquoten für Elektro(nik)altgeräte in Deutschland besteht hier dringlicher Handlungsbedarf.

Adressat: BMU/UBA: Vergabe einer umfassenden Evaluationsstudie unter Einbeziehung der jeweiligen Umweltministerien der Bundesländer, die über Hochseehäfen verfügen.

4.4.7 Verbesserter Informationsfluss: Image Recyclingbranche

Hintergrund / Hemmnis: Die spezifischen Probleme in der Verwertungskette von Metallen sind Nichtfachleuten schwer vermittelbar und fallen daher auch bei politischen Akteuren und Entscheidungsträgern oft unter das Wahrnehmungsradar im Vergleich zu anderen Wirtschaft- und Umweltbelangen. Die strategische Relevanz des Metallrecyclings wird daher vielfach weit unterschätzt und notwendige Maßnahmen zur Verbesserung der Rahmenbedingungen kommen häufig nur sehr schleppend voran. Es gibt zwar ansprechende Kommunikationsoffensiven der NE-Metallindustrie - allerdings werden diese u.U. bei Dritten als subjektive Einschätzungen antizipiert und entfalten daher u.U. nicht ausreichend Wirkung.

Lösungsansatz: Das BMU sollte in einem längerfristigen Programm anschaulich gestaltete Broschüren herausgeben, die spezifische Herausforderungen und Lösungsvorschläge einem breiteren Publikum prägnant und anschaulich vermitteln. Ein positives Beispiel sind die vom UNEP Resource Panel herausgegebenen Broschüren zum Metal Recycling. Die Themensetzung und Ausarbeitung der Broschüren sollte von einem Fachbeirat mit Vertretern der NE-Metallindustrie, Behördenvertretern und Umweltverbänden begleitet werden.

Adressaten: BMU/UBA: Broschüren-Serie zu ausgewählten Themen des Metallrecyclings initiieren und realisieren

4.4.8 Verbesserter Informationsfluss: Anreize zur Steigerung der Erfassung aus privaten Haushalten

Hintergrund / Hemmnis: Lücken im Metallkreislauf entstehen, wenn Produkte und Güter nicht in die richtigen Verwertungswege gelangen. In der Regel entscheidet beim Abfallanfall die erste Zuordnung in den entsprechenden Verwertungsweg, Daher sind private Abfallerzeuger eine entscheidende Zielgruppe, da private Akteure häufig aus Unwissenheit NE-haltige Altprodukte nicht in die richtigen Verwertungswege geben. Beispiele sind die Entsorgung von Elektrokleingeräten in die Restmülltonne statt Abgabe im örtlichen Wertstoffhof.

Lösungsansatz: Benötigt wird eine zielgruppenspezifische Kommunikation, um private Abfallerzeuger über die Relevanz ihres Handelns zu informieren. Gleichzeitig müssen einfachere Angebote geschaffen werden, um metallhaltige Abfälle leichter entsprechenden Verwertungswegen zuzuführen. Dies sind z. B. E-Schrott Container nahe öffentlicher Einrichtungen oder bestehender Sammelpunkte. Dazu sind zum Teil bessere Schutzmaßnahmen vor Diebstahl und Vandalismus zu entwickeln. Dort, wo die Abgabe von Schrotten an Öffnungszeiten gekoppelt ist (insb. Betriebshöfe), gilt es, nutzerfreundlichere Angebote zu entwickeln (z. B. einmal wöchentliche Spätabgabe).

Adressaten: BMU, Öffentliche Entsorgungsträger: Gemeinsame Informationsoffensive des BMU und öffentlicher Entsorgungsträger in Richtung private Abfallerzeuger bzgl. richtiger Verwertungswege; Realisierung eines dichteren Netzes von E-Schrott-Containern und Sammelpunkten durch öffentliche Entsorgungsträger

4.4.9 Information und Austausch: Runder Tisch / Kommunikationsplattform Chemikalienrecht - Kreislaufwirtschaft

Hintergrund / Hemmnis: Regelungen auf Ebene des europäischen Chemikalienrechts können weitreichende Auswirkungen auf die Kreislaufwirtschaft und die Verwendung von Sekundärmaterialien haben. Wird aus Abfall ein Produkt (z. B. Metallschrott, der durch Einschmelzen zu

Sekundärrohstoff wird und zur Herstellung neuer Erzeugnisse eingesetzt wird), gelten die Regelungen von CLP²¹ und REACH²² und damit wird auch eine Bewertung des vom Stoff ausgehenden Risikos zur Schädigung menschlicher Gesundheit oder der Umwelt notwendig.

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit zur Stellungnahme der laufenden Verfahren. Aus Sicht einiger Praxisakteure sind die Abläufe, welche Stoffe zur Regulierung vorgeschlagen werden und wie diese eingestuft werden, nicht ausreichend transparent. Für die Sekundärwirtschaft können die Regelungen des europäischen Chemikalienrechts weitreichende Folgen auf die Verwertungswege und –quoten im Metallrecycling haben, da häufig nur extrem niedrige Werte (z. B. Blei) an „Verunreinigungen“ toleriert werden, die in der Praxis der Recyclingwirtschaft kaum erreicht werden können. Damit entsteht ein gravierender Zielkonflikt zwischen den politischen Zielen des Ressourcenschutzes und des Schutzes von Gesundheit und Umwelt, der nicht ausreichend thematisiert und diskutiert wird.

Lösungsansatz: Vorgeschlagen wird die Einrichtung eines Runden Tisches als Kommunikationsplattform zum besseren und kontinuierlichen Austausch zwischen den in Deutschland zuständigen Behörden, Gremien und Praxisakteuren aus der Wirtschaft. Dem Umweltbundesamt kommt dabei eine Vermittlerrolle zu, da dieses für die Umweltbewertung im Rahmen von REACH zuständig und gleichzeitig Wissensträger für Fragen des Ressourcenschutzes ist. Ein weiterer zentraler Ansprechpartner ist die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) mit der dort angesiedelten, koordinierenden Bundesstelle für Chemikalien (BfC). Die regelmäßigen Abstimmungen und Zwischenergebnisse des Runden Tisches sind durch die beteiligten Bundesressorts in die Abstimmungen zum Chemikalienrecht auf europäischer Ebene einzubringen.

Adressaten: BMU/UBA in Kooperation mit der BAuA zur Einrichtung und kontinuierlichen Moderation eines runden Tisches

²¹ Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006, ABl. L 353 vom 31.12.2008, S. 1,

²² Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Agentur für chemische Stoffe, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission, ABl. L 396 vom 30.12.2006, S. 1

4.4.10 Zusammenfassung

Im Folgenden sind die diskutierten Lösungsansätze den maßgeblichen Akteursgruppen zugeordnet und tabellarisch zusammengefasst.

Tabelle 43: Zentrale Lösungsansätze entlang der Akteurskette zur Optimierung der Verwertungsprozesse von Metallen und -Legierungen

Akteure	Lösungsansätze
<p>Sammler und Zerlegebetriebe</p> <p>Anreize zur Steigerung der Erfassung aus privaten Haushalten</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Gemeinsame Informationsoffensive des BMU und öffentlicher Entsorgungsträger in Richtung private Abfallerzeuger bzgl. richtiger Verwertungswege - Realisierung eines dichteren Netzes von E-Schrott-Containern und Sammelpunkten durch öffentliche Entsorgungsträger
<p>Schrottaufbereiter</p> <p>Einsatz moderne Detektionsverfahren wie XRT, XRF, LIBS</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Verbesserte Auftrennung komplexer Schrotte (siehe auch Fördergeber/Banken)
<p>Endverwerter</p> <p>Technische Optimierung MVA-Schlackenaufbereitung</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Beteiligung an der Entwicklung innovativer Verfahren zur verbesserten Metallrückgewinnung aus MVA-Schlacken und sonstigen Schlacken (siehe auch Politik und Vollzugsbehörden)
<p>Transportgewerbe</p> <p>Technische Optimierung: Pooling Transportdienstleistungen</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Wirtschaftsverbände: Digital unterstützte Pooling-Lösungen bzgl. Transport gefährlicher Abfälle unterstützen
<p>Fördergeber/Banken</p> <p>Einsatz moderner Detektionsverfahren wie XRT, XRF, LIBS in der Aufbereitung für bessere Schrottqualitäten</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Vergabe von Krediten zu Vorzugskonditionen sowie Zuschüsse zur Überwindung von Investitionshürden
<p>Politik und Vollzugsbehörden</p> <p>Förderung der technischen Optimierung MVA-Schlackenaufbereitung</p>	<ul style="list-style-type: none"> - BMBF: Neues spezifisches Forschungsprogramm ausloben, welches Metallgewinnung aus MVA-Schlacken adressiert.
<p>Regulatorische Ansätze: Wirkung Strompreise und Klimaschutz</p>	<ul style="list-style-type: none"> - BMU + betroffene Wirtschaft (NE-Metallindustrie und Recyclingbranche): detaillierte Untersuchung der objektiven Belastungen der Unternehmen durch das EEG. Die Ergebnisse sollen in zukünftige Fortschreibungen des EEG einfließen, um bei Bedarf Entlastungen stromintensiver Recyclingunternehmen zu erreichen.

Akteure	Lösungsansätze
Regulatorische Ansätze: Regelungen Altfahrzeuge	<ul style="list-style-type: none"> - BMU: Lösungsansätze in die anstehende Novellierung der Europäischen Altfahrzeug-Richtlinie einbringen, u. a. die Anwendung der Anlaufstellenrichtlinie Nr. 9 im Rahmen der ELV Revision verbindlich festschreiben.
Regulatorische Ansätze: Vollzug WEEE Regulierung	<ul style="list-style-type: none"> - BMU/UBA: Vergabe einer umfassenden Evaluationsstudie zur Untersuchung der Wirkungen der Änderungen des ElektroG im Jahr 2015 im Hinblick auf den Export in Entwicklungsländer unter Einbeziehung der jeweiligen Umweltministerien der Bundesländer, die über Hochseehäfen verfügen.
Verbesserter Informationsfluss: Image Recyclingbranche	<ul style="list-style-type: none"> - BMU/UBA: Broschüren-Serie zu ausgewählten Themen des Metallrecyclings initiieren und realisieren. - Die Themensetzung und Ausarbeitung der Broschüren sollte von einem Fachbeirat mit Vertretern der NE-Metallindustrie, Behördenvertretern und Umweltverbänden begleitet werden.
Information und Austausch: Runder Tisch / Kommunikationsplattform Chemikalienrecht - Kreislaufwirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> - BMU/UBA in Kooperation mit der BAuA: Einrichtung und kontinuierlichen Moderation eines runden Tisches zur Kompromissfindung zwischen Chemikalienrecht -und Kreislaufwirtschaft

5 Übergreifende Schlussfolgerungen

Die Projektreihe „Kartierung des Anthropogenen Lagers“ des Umweltbundesamtes schafft die wissenschaftlichen Grundlagen für ein tieferes Verständnis des anthropogenen Lagers in Deutschland. Übergeordnetes Ziel ist: Materialien, die in Gütern und Bauwerken gebunden sind, über Urban Mining möglichst umfassend zurückzugewinnen und hochwertig zu verwerten. Das Vorhaben „KartAL III - Kartierung des Anthropogenen Lagers III – Etablierung eines Stoffstrommanagements unter Integration von Verwertungsketten zur qualitativen und quantitativen Steigerung des Recyclings von Metallen und mineralischen Baustoffen“ untersuchte dafür die Stoffströme und Verwertungswege von sieben Metallen bzw. Legierungen und neun mineralischen Baustoffen.

Das anthropogene Lager in Deutschland wächst – Metalle und mineralische Baustoffe werden dem Lager zugeführt und dort genutzt. Mit dem wachsenden Lager werden auch die Outputströme aus dem Lager in die Kreislaufwirtschaft zukünftig weiterwachsen. Im Vorhaben wurden diese Mengenströme für den Zeitraum 2015 bis 2040 quantifiziert. Die Erfassungs- und Verwertungssysteme der Metalle und Baustoffe nach der Nutzungszeit unterscheiden sich jedoch erheblich. Stoffstromanalysen und Ansätze zur Optimierung der Recyclingstruktur sind daher getrennt nach Metallen und Baumineralik entwickelt und stoffspezifisch vertieft worden.

Metallstoffströme und Bestände

Metalle sind in vielen unterschiedlichen Sektoren eingebunden und divers im anthropogenen Lager verteilt. Das Projektteam bilanzierte daher für die untersuchten Metalle und Legierungen in den folgenden neun Sektoren:

- ▶ Technische Güter im Hochbau (Wohnen und Nicht-Wohnen)
- ▶ Mobile Güter in Gebäuden (ohne Elektrogeräte),
- ▶ Mobile Güter in Gebäuden (Elektrogeräte),
- ▶ Stromerzeugungsanlagen,
- ▶ Stromnetze,
- ▶ Fahrzeuge,
- ▶ Verkehrsinfrastruktur,
- ▶ Industrieanlagen,
- ▶ Maschinen.

Innerhalb der unterschiedlichen Sektoren wurden die Bestandsentwicklungen und Outputströme in die Kreislaufwirtschaft über diverse Produktkategorien bzw. Güter erfasst. So setzt sich der Sektor Fahrzeuge aus vielen Produktkategorien zusammen wie PKW (mit Verbrennungsmotor), PKW (mit Elektromotor), LKW < 20t (mit Verbrennungsmotor) usw. Die Erfassung von Materialbeständen und Stoffströmen war daher hoch komplex. Letztlich wurde der Datenbestand beginnend mit den einzelnen Produktkategorien/Gütern über die neun Sektoren bis zum gesamten anthropogenen Lager Deutschland für die sieben untersuchten Metalle/Legierungen Edelstahl, Aluminium, Zink, Magnesium, Zinn, Messing und Neodym-Eisen-Bor-Magnete aufgebaut.

Der Bestand der einzelnen Metalle hat eine unterschiedliche Größenordnung, der von den Anwendungsfeldern abhängt. Während Edelstahl im Startjahr 2015 mit gut 94 Millionen Tonnen innerhalb der untersuchten Metalle/Legierungen die Spitzenposition einnimmt, da es viele Anwendungsfelder hat, sind die Lager von Zinn (gut 67.000 Tonnen 2015) und Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial (knapp 34.000 Tonnen 2015) die beiden kleinsten, da beide sehr spezifische Anwendungsfelder haben. Zinn z. B. wird hauptsächlich in Elektronik und als Lagermetall eingesetzt während Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial in Permanentmagneten für Elektromotoren und Generatoren seine Hauptanwendungen hat. Die geringe Lagergröße dieser beiden Metallströme kombiniert mit einer starken Ausweitung der Anwendungsfelder (elektronische Geräte, Elektromobilität sowie Windkraftanlagen) führt zu einem starken Zuwachs des Lagers bis 2040. Bei Zinn verdoppelt sich das Lager, während Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterialien sogar einer Verdreifachung des Bestandes entgegensehen. Das Lager der übrigen Materialien hat sich weitgehend stabilisiert und wächst mit der mittleren Wachstumsrate der Wirtschaft von ca. 2 % pro Jahr bzw. rund 50 % über 25 Jahre.

Es wächst jedoch nicht nur das anthropogene Lager aller betrachteten Metalle/Legierungen in Deutschland zwischen 2015 und 2040. Die Mengenströme des Outputs in die Kreislaufwirtschaft wachsen ebenso mit, d. h. das Potenzial des Urban Mining wird in der Zukunft noch deutlich größer werden gegenüber heute. Es wird jedoch deutlich, dass jedes Metall einen anderen Verwertungsweg aufweist und sich entsprechend unterschiedlich auf die Verbleibsorte verteilt. Aluminium wird etwas stärker exportiert als in Deutschland recycelt (was einerseits am Export des Schrottes und andererseits vor allem am Export von gebrauchten Autos und Maschinen liegt). Für Edelstahl (hier wird vor allem der Metallschrott direkt exportiert) und auch Messing (hier sind es nur die Güterexporte, die eine Rolle spielen) ist der Export der überragende Weg. Bei Zink und Magnesium zeigt sich gleichmäßig Export und Recycling in Deutschland. Zink auf Stahl und Zinn werden vor allem in Deutschland recycelt.

Allerdings muss betont werden, dass in absoluten Mengen von den untersuchten Metallen/Legierungen vor allem das Recycling von Aluminium in Deutschland heraussticht. Für Neodym-Eisen-Bor-Magnetmaterial finden sich zur Zeit keine Verwertungswege oder eine dezidierte Rückgewinnungsstruktur. Für die Zukunft kann dieses Potenzial durchaus realisiert werden.

Baumineralische Stoffströme und Bestände

Die Bilanzierung der Stoffströme der mineralischen Baustoffe war weniger komplex. Sie umfasst die Bereiche Hochbau (Wohn- und Nichtwohngebäude) und Tief- und Ingenieurbau (Straßen, Brücken, Kanäle etc.). Das in Gebäuden enthaltene Materiallager liegt vor allem in Wohngebäuden. In der Kurpfalz lassen sich hier 76 % der Massen finden, in Berlin 80 %. Davon sind in der Kurpfalz 45 % in Ein- und Zweifamilienhäusern verbaut, in Berlin mit 15 % deutlich weniger. Die in der Infrastruktur enthaltenen Materiallager sind deutlich unterschiedlich. So befinden sich in der Kurpfalz davon 51 % in den Verkehrswegen, in Berlin sind es nur 31 %.

In den Gebäuden sind v.a. Beton und die Mauerwerksbaustoffe Kalksandstein, Mauerwerksziegel (und mineralische Leichtbaustoffe) sowie Dachziegel und Gips verbaut. In der Kurpfalz werden im Mauerwerk in letzter Zeit mehr Ziegel eingesetzt, in Berlin mehr Kalksandstein. Der Materialoutput aus dem Gebäudebereich beschränkt sich bislang auf die Maßnahmen zur Bestandserhaltung, bestehend aus Ersatzneubau und Sanierung. In beiden Regionen findet noch ein Wachstum des Gebäudebestands statt, der sich bis 2030 aber v.a. in der Kurpfalz abschwächt, so dass die Maßnahmen zur Bestandserhaltung durch Ersatzneubau und Sanierung mit ihren Materialströmen immer wichtiger werden.

Der Infrastrukturbestand in der Kurpfalz besteht gegenüber Berlin entsprechend der Bedeutung der Verkehrswege zu einem größeren Anteil aus Asphalt und Schotter, in Berlin sind Sande und Kiese etwas stärker vertreten. In beiden Regionen überwiegen die Stoffflüsse aus den Maßnahmen zur Bestandserhaltung. Der Betonanteil ist geringer als im Gebäudebereich. In- und Output bleiben über die Zeit relativ konstant.

In Bezug auf den gesamten Materialbestand überwiegen auf der Inputseite zu Beginn (2015) insbesondere in Berlin die hauptsächlich mit dem Gebäudebereich verbundenen Materialströme Beton und Mauerwerk. Die Infrastruktur mit Schotter, Asphalt, Kiesen und Sanden wird aber aufgrund ihres großen Bedarfs zur Bestandserhaltung und der abnehmenden Gebäudebestandsvergrößerung wichtiger. Auf Outputseite sind die Materialströme aus der Infrastruktur am größten. Der Gesamtinput sinkt in der Kurpfalz etwas stärker als in Berlin, der –output steigt jeweils nur leicht.

In beiden Regionen können durch ambitionierte Aufbereitung mehr RC-Baustoffe bereitgestellt werden. Die hochwertige Verwertung führt nicht zu einer bloßen Verlagerung der mineralischen Abfälle in andere Bereiche, sondern schafft zusätzliche Aufnahmekapazitäten. Die Materialien können dadurch entsprechend ihren Eigenschaften auch in ihren ursprünglichen Anwendungsfeldern genutzt werden und es muss letztlich weniger niederwertiges Material beseitigt werden. Durch perspektivische Verwertung könnte aus den regional anfallenden Mengen an Altbeton, Kalksandstein und Mauerziegel so viel qualifizierte RC-Gesteinskörnung erzeugt werden, dass im Jahr 2030 70 % des Betonbedarfs der Kurpfalz als R-Beton ausgeführt werden könnte. In Berlin wären es 55 %.

Verwertungsstrategien im Vergleich

Metallabfälle werden nahezu vollständig hochtechnisierten Aufbereitungsverfahren zugeführt. Die Metallschrotte besitzen einen positiven Marktwert und werden global als Wertstoff gehandelt. Der Verlust von Metallen für ein Recycling ist neben Verlusten bei der Erfassung aus privaten Anfallstellen (besonders relevant sind hier Elektroaltgeräte) fast ausschließlich technisch bedingt, d. h. innerhalb der unterschiedlichen Aufbereitungsprozesse. Allerdings werden große Mengenströme auch außerhalb Deutschlands dem Recycling zugeführt. Dies gilt in besonderem Maße für Edelstähle.

Für die Baumineralik gilt: Die Rückführung von Baustoffen aus dem anthropogenen Lager in den Wirtschaftskreislauf findet nicht ausreichend statt. Das wertgebende Potenzial der verbauten Materialien wird nur unzureichend genutzt. Bei der Entsorgung steht häufig die schnelle und kostengünstige Entledigung der angefallenen Massen im Vordergrund.

Die Absatzwege der aufbereiteten Materialien beschränken sich auf den Einsatz im Tiefbau, obwohl die Eigenschaften der rückgebauten Materialien grundsätzlich auch eine Verwertung im Hochbau zuließen. Geschlossene Stoffkreisläufe sind – zumindest in Ansätzen – bislang nur bei den getrennt erfassten Altbetonen, den recyclingfähigen Gipsabfällen und Flachglasscherben zu verzeichnen. Der Anteil der unbehandelten Bauabfälle, die einfachen Verwertungsmaßnahmen zugeführt oder direkt beseitigt werden, ist ein relevanter Massenstrom, der erheblichen Einfluss auf die Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen für Bauprodukte darstellt. Die Umlenkung und ambitionierte Aufbereitung dieser Stoffströme hätte relevante Auswirkungen auf die Substitution von primären Naturbaustoffen.

Die Akteure der Verwertungsketten im Bereich der Baumineralik agieren regional begrenzt und kleinteilig. Insbesondere die Massenbaustoffe wie Beton, Ziegel und Kalksandstein werden möglichst nahe an der Anfallstelle aufbereitet oder direkt entsorgt. Der Konkurrenzdruck zu aufbereitungsarmen und kostengünstigen Entsorgungsoptionen ist deutlich höher als in der Verwert-

ungsindustrie der Metalle, die auf den Im- und Export von Gütern und die Produktion von nachgefragten Sekundärrohstoffen ausgelegt ist.

Optimierungspotenziale in den Verwertungsketten

Optimierungspotenziale im Metallrecycling ergeben sich insbesondere aus technischen Verbesserungen. Dazu zählt die Notwendigkeit einer besseren Detektion von Metallschrotten mit Hilfe moderner spektroskopischer Verfahren in automatisierten Sortierprozessen. Vor allem Al-, Messing- und Zink-Schrotte sind sehr inhomogen und müssen besser vorsortiert werden, um Legierungsbestandteile nicht zu verlieren. Gleichzeitig steigen die Qualitätsansprüche der potenziellen Abnehmer. Da die Einführung derartiger innovativer Verfahren mit beträchtlichen Investitionen verbunden ist, werden zur Unterstützung steuerliche Vergünstigungen oder Abschreibungsmöglichkeiten empfohlen.

Ein weiteres Hemmnis stellt die „Null-Schadstoff-Philosophie“ im Produktbereich dar. Zwar wird die Sinnhaftigkeit von Grenzwerten in Produkten (hier bzgl. Metallen/Legierungen) nicht grundsätzlich angezweifelt. Allerdings zeigen einige Tendenzen hier derartig radikale Vorstellungen auf, die in der Konsequenz zum Erliegen ganzer Recyclingkreisläufe führen könnten. Vorgeschlagen wird daher die Einrichtung eines Runden Tisches zum besseren und kontinuierlichen Austausch zwischen den in Deutschland zuständigen Behörden, Gremien und Praxisakteuren aus der Wirtschaft. Dem Umweltbundesamt kommt dabei eine Vermittlerrolle zu, da dieses für die Umweltbewertung im Rahmen von REACH zuständig und gleichzeitig Wissensträger für Fragen des Ressourcenschutzes ist.

Um die Kreislaufwirtschaft der Baumineralik zu stärken, müssen stoffstromumlenkende Strategien umgesetzt werden. Dies gelingt nur im Zusammenspiel und im Austausch aller an der Entsorgung beteiligten Akteure. Von entscheidender Bedeutung ist die Steigerung der Akzeptanz von Baustoffen, die auf aufbereitetes Material zurückgreifen. Maßnahmen zur Steigerung der Nachfrage sind erforderlich, um Markimpulse zur Verbesserung der Aufbereitungsstrategien zu schaffen.

Die Praxis zeigt, dass insbesondere die getrennte Bereitstellung der abgebrochenen Baumaterialien nur unzureichend umgesetzt wird. Die Pflichten der Gewerbeabfallverordnung werden regelmäßig nicht ausreichend erfüllt. Gleichzeitig sind auch die behördliche Überwachung und der Vollzug von abfallrechtlichen Vorgaben auf der Baustelle unzureichend. Dieser Missstand ist bei Abbruchunternehmen bekannt und führt dazu, dass Abbruch- und Entsorgungsdienstleistungen vorwiegend unter dem Aspekt „Arbeitsaufwand“ kalkuliert, optimiert und angeboten werden. Eventuell entstehende höhere Entsorgungskosten für nicht sortenrein erfasste Bauabfälle werden durch den geringeren Arbeitsaufwand in der Gesamtkalkulation kompensiert. Dieses Vorgehen wird besonders in Regionen verfolgt, in denen kostengünstige Entsorgungsoptionen für Bauabfallgemische im nahen oder mittleren Umkreis zur Verfügung stehen.

Etablierte Baustoffmärkte greifen nur dann auf sekundäre Rohstoffe zurück, wenn diese spezifische Eigenschaften vorweisen. In der Aufbereitungsstrategie der Abfälle müssen diese Anforderungen ebenfalls Berücksichtigung finden. Zusätzlich müssen Rohstoffe aus dem Materialkreislauf aus dem Abfallrecht entlassen sein. Ihre Verwendung bedeutet für die Baustoffindustrie ansonsten einen deutlich erhöhten Genehmigungs- und Verwaltungsaufwand, verbunden mit langwierigen und kostspieligen Umstrukturierungen.

Öffentliche Institutionen sind gemessen am Bauvolumen relevante Auftraggeber im Hoch- und Tiefbau. Sie können wichtige Marktanreize setzen und über die Ausschreibep Praxis eine Vorbildfunktion zur Umsetzung der ressourcenpolitischen Ziele einnehmen. Die öffentlichen Vergabestellen setzen die – bereits verpflichtenden - Vorgaben und Ziele jedoch nicht ausreichend um.

Schlussfolgerungen

Im Vorhaben „KartAL III - Kartierung des Anthropogenen Lagers III – Etablierung eines Stoffstrommanagements unter Integration von Verwertungsketten zur qualitativen und quantitativen Steigerung des Recyclings von Metallen und mineralischen Baustoffen“ konnte die wachsende Relevanz des anthropogenen Lagers für die Sekundärrohstoffwirtschaft in Deutschland nachgewiesen werden. Die Potenziale für die Sekundärrohstoffwirtschaft speisen sich perspektivisch aus dem wachsenden Bestand und den wachsenden Outputströmen aus dem Lager. Die Verhältnisse für die untersuchten Metalle und Legierungen im Hinblick auf die Kreislauf-führung stellen sich jedoch gänzlich unterschiedlich dar im Vergleich zu der untersuchten Baumineralik. Das Recycling von Metallen bzw. Legierungen ist in vielen Fällen langjährige Praxis mit entsprechend etablierten Infrastrukturen. Allerdings bestehen auch hier durchaus noch Optimierungspotenziale und vor allem die Herausforderung die wachsenden Recycling-potenziale verstärkt für die inländische Recyclingwirtschaft zu sichern. Im Falle der Baumineralik gibt es vielversprechende Ansätze für ein hochwertiges Recycling (z. B. RC-Beton, Gipsrecycling). Allerdings müssen für ein verstärktes Recycling in der „Fläche“ noch erhebliche Anstrengungen auf allen Akteursebenen (von Bauherren, Bauträgern bis zur Abbruchwirtschaft und den Vollzugsbehörden) unternommen werden, um die Potenziale aus dem anthropogenen Lager auch hier verstärkt zu heben und damit letztlich Primärrohstoffe in adäquatem Ausmaß einzusparen.

6 Quellenverzeichnis

50Hertz Transmission; Amprion; TenneT; TransnetBW (2019): Netzentwicklungsplan Strom. VERSION 2019, 1. ENTWURF.

Agora Verkehrswende (2017): Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität.

https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Synthesepapier_WEB.pdf (18.12.2019) Tabelle der Bundesagentur für Arbeit zu den sozialversicherungspflichtig Beschäftigten nach ausgewählten Merkmalen in den Kreisen; Stichtag: 31. Dezember 2018.

Andreas Herzig et al. (2016): Smart Grid – Die Digitalisierung der Energiewende. Hg. v. Deloitte (2/2016).

Arbeitsagentur (2019): Pendlerverflechtungen der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten nach Kreisen; jeweils für Baden-Württemberg und Berlin; Stichtag: 30. Juni 2019.

Argonne (2012): Updated Vehicle Specifications in the GREET Vehicle-Cycle Model

<https://greet.es.anl.gov/files/update-veh-specs> (18.12.2019)

Banse, J.; Effenberger, K.-H. (2006): Deutschland 2050 – Auswirkungen des demographischen Wandels auf den Wohnungsbestand [Germany 2050 - Effects of demographic change on housing stock]. Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. (IÖR). In: IÖR-Texte 152. Dresden.

BBS (2016): Schwarzkopp, J.; Drescher, J; Gornig, M.; Blazejczak, J. (2016): Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland. Prof. Dr.-Ing. Stoll & Partner Ingenieurgesellschaft; DIW Berlin. Im Auftrag des Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden

BBSR (2015): Held, T.; Waltersbacher, M.: Wohnungsmarktprognose 2030 [Housing market forecast 2030]. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. In: BBSR-Analysen KOMPAKT 07/2015. Bonn.

BBSR (2017): Tabelle des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung zur Referenz Kreise/Kreisregionen zu Kreistypen, Stand: 31.12.2017.

BDEW (2018): Kraftwerkspark in Deutschland. Aktueller Kraftwerkspark, Stromerzeugungsanlagen im Bau und in Planung, absehbare Stilllegungen konventioneller Kraftwerke. Fakten und Argumente. Hg. v. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Berlin.

BDEW (2019): Entwicklung der Stromnetze in Deutschland. Hg. v. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V

https://www.bdew.de/media/documents/Stromkreislaengen_D_Entw_10J_o_online_jaehrlich_Ki_29032019.pdf (26.11.2019)

Bergmann et. al (2015): Ressourceneffizienzpotenziale im Tiefbau. Materialaufwendungen und technische Lösungen. Unter Mitarbeit von Thomas Bergmann, Daniel Bleher und Wolfgang Jenseit. Hg. v. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE). Berlin.

BGR (2001-2016): Bundesrepublik Deutschland - Rohstoffsituation 2000-2015 (2000 nur Rohstoffsituation). Hg. v. Bundeanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, ab Jahrgang 2009

https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Produkte/produkte_node.html (26.11.2019) Die Publikationen bis einschließlich 2008 sind nur als Printversion verfügbar.

BGR (2014): Zinn - Angebot und Nachfrage bis 2020. Hg. v. Michael Schmidt, Philip Schütte und Uwe Näher. Berlin (DERA Rohstoffinformationen), 18.12.2019

BMF (1995): AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig "Erdölverarbeitung". Hg. v. Bundesministerium der Finanzen https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuertem

[en/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_Erdoelverarbeitung.pdf?_blob=publicationFile&v=3](#)
(26.11.2019)

BMU (2020): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: FAQ - Was wird getan, um den illegalen Export von Elektro- und Elektronik-Altgeräten aus Deutschland zu verhindern?

<https://www.bmu.de/faq/was-wird-getan-um-den-illegalen-export-von-elektro-und-elektronik-altgeraeten-aus-deutschland-zu-ver/> (30.11.2020)

BMVI (2017): Statistisches Handbuch "Verkehr in Zahlen". Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-pdf-2017-2018.pdf?_blob=publicationFile (18.12.2019)

BMWi; AGEE-Stat (2019): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien - Statistik.

BTB (2019): Auf den Punkt. Jahresbericht 2019. Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie (Hrsg).

BMJV (2017): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017). Hg. v. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/inhalts_bersicht.html (06.11.2019)

Bürger et al. 2016: Klimaneutraler Gebäudebestand 2050

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_06_2016_klimaneutraler_gebaeudebestand_2050.pdf (17.05.2018)

Büttner, C.; Charlier, F.; Dabruck, J.-P.; Friedmann, D.; Nabbi, R.; Rombach, E. et al. (2016): Voruntersuchung Wiederverwertbarkeit Seltener Metalle beim Rückbau kerntechnischer Anlagen. RWTH Aachen University https://www.tib.eu/de/suchen?tx_tibsearch_search%5Baction%5D=getDocument&tx_tibsearch_search%5Bcontroller%5D=Download&tx_tibsearch_search%5Bd%5D=6fb410fc021483ae9a459f7830836493&tx_tibsearch_search%5Bdocid%5D=TIBKAT%3A872356213&cHash=62aa40f611f17806f147b044a2c29ea3 (17.05.2018)

Chemie am Auto (2014): Zink. Hg. v. Wirtschaftsgesellschaft des Kfz-Gewerbes mbH <https://www.chemie-am-auto.de/metalle/zink.html> (18.12.2019)

Deilmann, C.; Behnisch, M.; Dirlich, S.; Gruhler, K.; Hagemann, U.; Petereit R.; Kunz, C.; Petereit, K. (2013): Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude – Erfassung und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO₂-Minderungspotenzialen [Systematic data analysis of non-residential buildings - recording and quantification energy saving and CO₂ reduction potentials]. Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. (IÖR); Ingenieurbüro Petereit. Im Auftrag des BMVBS. Dresden, Göldenitz, Berlin.

Deilmann, C.; Krauß, N.; Gruhler, K.; Reichenbach, J. (2014): Sensitivitätsstudie zum Kreislaufwirtschaftspotenzial im Hochbau [Sensitivity study on the circular economy potential in building construction]. Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. (IÖR); Intecus GmbH. Im Auftrag des BBSR und BBR. Dresden.

Dena (2012): dena-Verteilnetzstudie. Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromnetze in Deutschland bis 2030. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9036_ESD_dena-Verteilnetzstudie.pdf (25.10.2018)

Destatis (2015): Bevölkerung Deutschlands bis 2060 – 13. Koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung.

Destatis (2017): Verkehr – Eisenbahnverkehr – Betriebsdaten des Schienenverkehrs 2015. Statistisches Bundesamt (Destatis).

Destatis (2016): Tabelle des Statistisches Bundesamtes zur Gebietsfläche in den Kreisen; Stichtag: 31.12.2016.

Destatis (2018): Tabelle des Statistisches Bundesamtes zur Bevölkerung in den Kreisen; Stichtag: 31.12.2018 und 31.12.2012.

Destatis (2019): Ausstattung privater Haushalte mit Fahrzeugen - Deutschland
<https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Ausstattung-Gebrauchsgueter/Tabellen/liste-fahrzeuge-d.html> (18.12.2019)

ecoinvent (2017): ecoinvent - the world's most consistent & transparent life cycle inventory database
<https://www.ecoinvent.org/> (18.12.2019)

Elmorel (2017): <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/elektrofahrzeugrecycling-2020-schlussselkomponente-leistungselektronik-elmorel-2020/> (18.12.2019)

EPA DK (2015): Life cycle assessment of shredder residue management. Hg. v. EPA DK
https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/123616851/Life_cycle_assessment.pdf (18.12.2019)

Führ, M.; Schenten, J. et. al (2014): Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit - Stärkung der Regelungen für (Import-)Erzeugnisse in der Chemikalienverordnung REACH, Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der Verordnung. UBA. https://www.sofia-darmstadt.de/fileadmin/Dokumente/Sonstige/STIERE/texte_40_2015-import-erzeugnisse-SVHC.pdf (Dezember 2014)

GDWS 2016: Ausstattung privater Haushalte mit Fahrzeugen – Deutschland
<https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Ausstattung-Gebrauchsgueter/Tabellen/liste-fahrzeuge-d.html> (18.12.2019)

Gerbert et al. (2018): Klimaschutzpfade für Deutschland.
https://www.prognos.com/uploads/tx_atwpubdb/20180118_BDI_Studie_Klimapfade_fuer_Deutschland_01.pdf (18.12.2019)

Gruhler, K; Böhm, R. (2011): Auswirkungen des demografischen Wandels auf das Stofflager und die Stoffflüsse des Wohngebäudebestandes – Deutschland 2050 [Effects of demographic change on the material stock and flows of the residential building stock - Germany 2050]. Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. (IÖR), Dresden. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

Hedemann, J.; Meinshausen, I. (2017): Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland - Entwicklung eines dynamischen Stoffstrommodells und Aufbau einer Datenbank zur Prognose des Sekundärrohstoffaufkommens (KartAL II)
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-08-04_texte_58-2017_kartalii.pdf (Juli 2017)

Henderson (2018): Copper and Brass Sales: How Much Copper Is in an Average Vehicle?
<https://www.rotaxmetals.net/the-copper-in-your-car/> (18.12.2019)

Heuck, K.; Dettmann, K. D.; Schulz, D. (2013): Elektrische Energieversorgung. Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis: Springer Fachmedien Wiesbaden
<https://books.google.de/books?id=vc4-AgAAQBAJ>

HKL (2018): Persönliches Telefonat mit HKL Baumaschinen Center Darmstadt am 29.08.2018.

Hoffmann, M. (2016): Kann ein Recycling von NdFeB-Magneten in Europa vor 2030 erwartet werden? Masterarbeit. TU Clausthal, 2016.

Industrie 2019: Persönliche Mitteilung eines Anlagenausrüsters am 13. April 2019.

International Magnesium Association (2017): Magnesium Recycling in the EU - Material flow analysis of magnesium (metal) in the EU and a derivation of the recycling rate
[http://www.intlmag.org/resource/resmgr/sustainability/FullRprt_EU-Mg-recycling_201\(24.07.2018\)](http://www.intlmag.org/resource/resmgr/sustainability/FullRprt_EU-Mg-recycling_201(24.07.2018))

IÖR (2018): Online-Informationsportal des Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung zu Bauwerksdaten <http://ioer-bdat.de/bauwerksdaten/wohngebaeude/> (18.12.2019)

IZA (2019): Persönliche Korrespondenz via E-Mail mit der International Zinc Association (IZA), 28.02.2019.

Jorge, Raquel Santos; Hawkins, Troy R.; Hertwich, Edgar G. (2012): Life cycle assessment of electricity transmission and distribution—part 1. Power lines and cables. In: Int J Life Cycle Assess 17 (1), S. 9–15. DOI: 10.1007/s11367-011-0335-1.

KBA (2019a): Kraftfahrt-Bundesamt - Fahrzeugklassen und Aufbauarten - Bestand in den Jahren 1960 bis 2019 nach Fahrzeugklassen
https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/b_fzkl_zeitreihe.html?nn=652402 (18.12.2019)

KBA (2019b): Kraftfahrt-Bundesamt - Versicherungskennzeichen - Anzahl der ausgegebenen Versicherungskennzeichen in den Jahren 2007 bis 2016
https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Versicherungskennzeichen/b_versicherung_zeitreihe.html (18.12.2019)

KBA (2019c): Kraftfahrt-Bundesamt - Halter - Neuzulassungen von Pkw in den Jahren 2009 bis 2018 nach ausgewählten Haltergruppen
https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Halter/z_n_halter.html (18.12.2019)

Leffler, B. (1998): Stainless Steel: Stainless Steels and their Properties, 2nd ed. ISBN 91-9720-216-9.

Leuenberger, Marianne (2010): Life Cycle Assessment of Two Wheel Vehicles. Hg. v. Leuenberger <http://esu-services.ch/fileadmin/download/leuenberger-2010-TwoWheelVehicles.pdf> (18.12.2019)

Löhle et al. (2020): Löhle, S.; Schmiedel, U.; Bartnik, S.: Analyse der Datenerhebungen nach ElektroG und UStatG über das Berichtsjahr 2018 zur Vorbereitung der EU-Berichtspflichten 2020 – Teilbericht, cyclos GmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes, veröffentlicht als UBA TEXTE 135/2020.

Manager Magazin (2018): Vespa und Co.: Absatz von Knatter-Motorrollern bricht ein - manager magazin
<https://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/vespa-und-co-absatz-von-knatter-motorrollern-bricht-ein-a-1208335.html> (18.12.2019)

Müller, A. (2016): Erschließung der Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Kreislaufwirtschaft Bau. Im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Weimar.

Öko-Institut; Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht
<https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf> (18.12.2019)

Pfluger et al. (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Karlsruhe/Aachen/Heidelberg (2017) https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basisszenario.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (06.11.2019)

Quentin et al. (2018): Windenergieanlagen - Was tun nach 20 Jahren? Unter Mitarbeit von Jürgen Quentin, Dirk Sudhaus, Marike Endell. Hg. v. Fachagentur Windenergie an Land https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/FA_Wind_Was_tun_mit_WEA_nach_20Jahren.pdf (20.11.2019)

Schmied, M.; Mottschall, M. (2010): Treibhausgasemissionen durch die Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland <https://www.oeko.de/oekodoc/1852/2013-520-de.pdf> (20.11.2019)

SenStUm (2017): Evaluation der Bevölkerungsprognose Berlin 2015-2030 – Vergleich der Prognose 2015-2030 mit der Realentwicklung 2016. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen Ref. I A – Stadtentwicklungsplanung in Zusammenarbeit mit dem Amt für Statistik Berlin-Brandenburg. Berlin, Juni 2017.

Statistisches Bundesamt (2019): Bauen und Wohnen 2018. Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden u. a. nach Bauherren - Lange Reihen z. T. ab 1980. Hg. v. Destatis https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Bautaetigkeit/baufertigstellungen-bauherren-pdf-5311201.pdf?__blob=publicationFile (17.12.2019)

Statistisches Amt Berlin-Brandenburg (2018): Statistisches Bericht Q II 1 – 2j /16 – Abfallentsorgung im Land Berlin 2015-2016. Amt für Statistik Berlin-Brandenburg. Potsdam.

Stürmer, S.: R-Beton in Betonfertigteilen und -waren; HTWG Hochschule Konstanz, ifeu-Institut; gefördert im Rahmen der Umweltforschung Baden-Württemberg; Konstanz/Heidelberg, Dezember 2016.

Team Stainless (2013): Recycling ferritic stainless steel https://www.worldstainless.org/Files/ISSF/non-image-files/PDF/Team_Stainless_Recycling_Ferritic_Stainless_Steel.pdf (18.12.2019)

TenneT (2016): Drehstrom-Erdkabel. Chancen und Herausforderungen bei 380-kV-Erdkabeln im Drehstromnetz. Hg. v. TenneT TSO GmbH.

Trapp et al. (2017): Ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen (RELIS) - umweltschonend, robust, demografiefest. Unter Mitarbeit von Jan Hendrik Trapp und Wulf-Holger Arndt, Jens Libbe, Dr. Stefan Schneider, Maic Verbücheln, Jan Winkelhaus, Moritz Mottschall, Dierk Bauknecht, Thomas Bergmann, Jens Gröger, Sven Hausigke. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-08-15_texte_64_2017_infrastrukturen.pdf (18.12.2019)

Treeze (2016): Life Cycle Inventories of Water Transport Services https://treeze.ch/fileadmin/user_upload/downloads/Publications/Case_Studies/Mobility/544-LCI-Water-Transport-Services-v2.0.pdf (18.12.2019)

UBA (2014): Rebekka Volk, Richard Müller, Frank Schultmann, Jérémy Rimbon, Thomas Lützkendorf, Joachim Reinhardt, Florian Knappe: Stofffluss- und Akteursmodell als Grundlage für ein aktives Ressourcenmanagement im Bauwesen von Baden-Württemberg „StAR-Bau“, Schlussbericht des Forschungsvorhabens

UBA (2016): Knappe, F.; Reinhardt, J.; Bergmann, T.; Mottschall, M.; Keck, I.; Köstlin, S.: 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-Institut; Öko-Institut; Keck-Informationstechnologie. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3712_33_324_primaerrohstoffe_strassenbau_bf.pdf (18.12.2019)

UBA (2017): Trapp, J. H.; Arndt, W.-H.; Libbe, J.; Schneider, S.; Verbücheln, M.; Winkelhaus, J.; Mottschall, M.; Bauknecht, D.; Bergmann, T.; Gröger, J.: Ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen – umweltschonend, robust, demografiefest. Forschungskennzahl 3713 16 103. Difu; Öko-Institut. Im Auftrag des Umweltbundesamtes (Hrsg). Dessau-Roßlau.

UBA (2019): Bulach, W.; Bleher, D.; Buchert, M.; Müller, F.: Factsheet – Aluminium https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/factsheet-aluminium_fi_barrierefrei.pdf (17.12.2019)

Urban Mine Plattform (2019): Urban Mine Plattform <http://www.urbanmineplatform.eu/homepage> (18.12.2019)

VDMA (2018): Maschinenbau in Zahl und Bild 2018. Hg. v. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau. https://www.vdma.org/documents/105628/20243678/MbauinZuB2018_1524470187749.pdf/14e4650e-bb39-37de-92f1-cf43902e05e5 (18.12.2019)

VDV (2017): 2017 Statistik. Hg. v. VDV Die Verkehrsunternehmen <https://www.vdv.de/vdv-statistik-2017.pdf>, (18.12.2019)

Wann (2012): Messing als Installationswerkstoff. Hg. v. Gütegemeinschaft Messing-Sanitär <https://www.haustechnikdialog.de/Downloads/SHKwissen/sj/SJ-2-2013-Werkstoff-Messing.pdf> (18.12.2019)

Welzel, L. (2019): End-Of-Life Wind Turbines in the EU: An Estimation of the NdFeB-Magnets and Containing Rare Earth Elements in the Anthropogenic Stock of Germany and Denmark. Hg. v. Uppsala University.

Wetzel (2015): Materialbedarf von Stromerzeugungssystemen - Szenarienpfadanalyse für Deutschland. Hg. v. Universität Stuttgart & Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt <http://elib.dlr.de/98018/1/Materialbedarf%20von%20Energieerzeugungssystemen.pdf> (01.03.2018)

WRAP (2015): Project: Electrical and electronic equipment (EEE) product age | WRAP UK <http://www.wrap.org.uk/sustainable-electricals/esap/minimising-product-returns/eee-product-age> (18.12.2019)

WV Metalle (2001-2017) (Hg.): Wirtschaftsvereinigung Metalle - Publikationen. Metallstatistik <https://www.wvmetalle.de/presse/publikationen/> (17.12.2019)

Zensus (2011): Ergebnisse aus der Zensusdatenbank 2011 [Results from the 2011 census database] <https://ergebnisse.zensus2011.de/#Home> (17.12.2019)

ZIV (2016): Pressemitteilung zum Fahrradmarkt 2015 https://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/PM_2016_08.03._Fahrradmarkt_2015.pdf (18.12.2019)

A Anhang

Tabelle 44: Prognostizierte Materialien und Outputs aus dem Bestand in der Kurpfalz für die in der Aufbereitung betrachteten Materialien

Materialien in 1.000 t	Input 2018	Output 2018	Input 2020	Output 2020	Input 2025	Output 2025	Input 2030	Output 2030
Beton Gebäude	880,97	-293,49	874,48	-300,72	863,45	-315,97	750,56	-327,31
Beton Infrastruktur	373,83	-321,13	373,83	-321,13	373,83	-321,13	373,83	-321,13
Kalksandstein Gebäude	140,34	-48,81	138,88	-48,89	134,99	-49,68	111,71	-51,17
Ziegel Gebäude	14,55	-2,75	14,80	-2,78	15,17	-2,93	12,66	-3,06
Klinker (Ziegel) Gebäude	255,44	-88,85	252,79	-88,98	245,72	-90,43	203,33	-93,13
Klinker (Ziegel) Infrastruktur	9,60	-6,51	9,60	-6,51	9,60	-6,51	9,60	-6,51
Mineralische Leichtbaustoffe Gebäude	45,23	-15,73	44,76	-15,76	43,51	-16,01	36,00	-16,49
Flachglas Gebäude	99,09	-48,25	99,36	-49,83	101,35	-52,57	100,60	-54,94
Gipsprodukte n.d. Gebäude	121,34	-43,55	122,76	-44,86	126,00	-48,29	121,63	-50,57
mineralische Dämmstoffe Gebäude	41,12	-3,53	41,57	-3,67	42,83	-3,89	41,98	-4,09
mineralische Dämmstoffe Infrastruktur	0,04	-0,04	0,04	-0,04	0,04	-0,04	0,04	-0,04

Tabelle 45: Prognostizierte RC-Baustoffoutputs für die Kurpfalz mit konventioneller, mittlerer und perspektivischer Aufbereitung

Materialien in 1.000 t	Konv. 2020	Mittel 2020	Pers. 2020	Konv. 2025	Mittel 2025	Pers. 2025	Konv. 2030	Mittel 2030	Pers. 2030
RC-Pflanzsubstrat aus Hochbau	1,18	4,35	28,09	1,25	8,54	28,70	1,31	12,99	29,60
RC-Schaumglas aus Hochbau	3,18	2,73	0,00	3,36	2,28	0,00	3,52	1,76	0,00
RC-Glaswolle aus Hochbau	3,18	2,73	0,00	3,36	2,28	0,00	3,52	1,76	0,00

RC-Glas sonstiges aus Hochbau	1,59	1,36	0,00	1,68	1,14	0,00	1,76	0,88	0,00
RC-Gips aus Hochbau	2,12	8,80	34,00	2,29	18,51	36,70	2,40	28,82	38,43
RC-Behälterglas aus Hochbau	7,95	8,16	9,44	8,41	8,92	9,99	8,79	9,61	10,44
RC-Gesteinskörnung Straßenbau aus Hochbau	241,95	237,76	192,56	253,88	243,90	201,70	262,82	246,72	208,74
RC-Mineralwolle aus Hochbau	0,00	0,52	3,66	0,00	1,25	3,89	0,00	2,04	4,09
RC-Flachglas aus Hochbau	0,00	5,40	37,77	0,00	12,84	39,95	0,00	20,88	41,75
RC-Gesteinskörnung Hochbau Typ I aus Hochbau	0,00	9,05	105,59	0,00	21,45	111,25	0,00	34,57	115,24
RC-Gesteinskörnung Hochbau Typ II aus Hochbau	0,00	1,40	16,57	0,00	3,22	16,88	0,00	5,15	17,39
RC-Pflanzsubstrat aus Infrastruktur	0,00	0,22	1,90	0,00	0,49	1,91	0,00	0,76	1,91
RC-Gesteinskörnung Straßenbau aus Infrastruktur	225,51	220,71	169,42	226,13	215,30	169,89	226,13	209,29	169,89
RC-Gesteinskörnung Hochbau Typ I aus Infrastruktur	0,00	9,66	112,75	0,00	21,81	113,06	0,00	33,92	113,06
RC-Gesteinskörnung Hochbau Typ II aus Infrastruktur	0,00	0,07	0,58	0,00	0,15	0,59	0,00	0,23	0,59

Tabelle 46: Prognostizierte Materialin- und outputs aus dem Bestand in Berlin für die in der Aufbereitung betrachteten Materialien

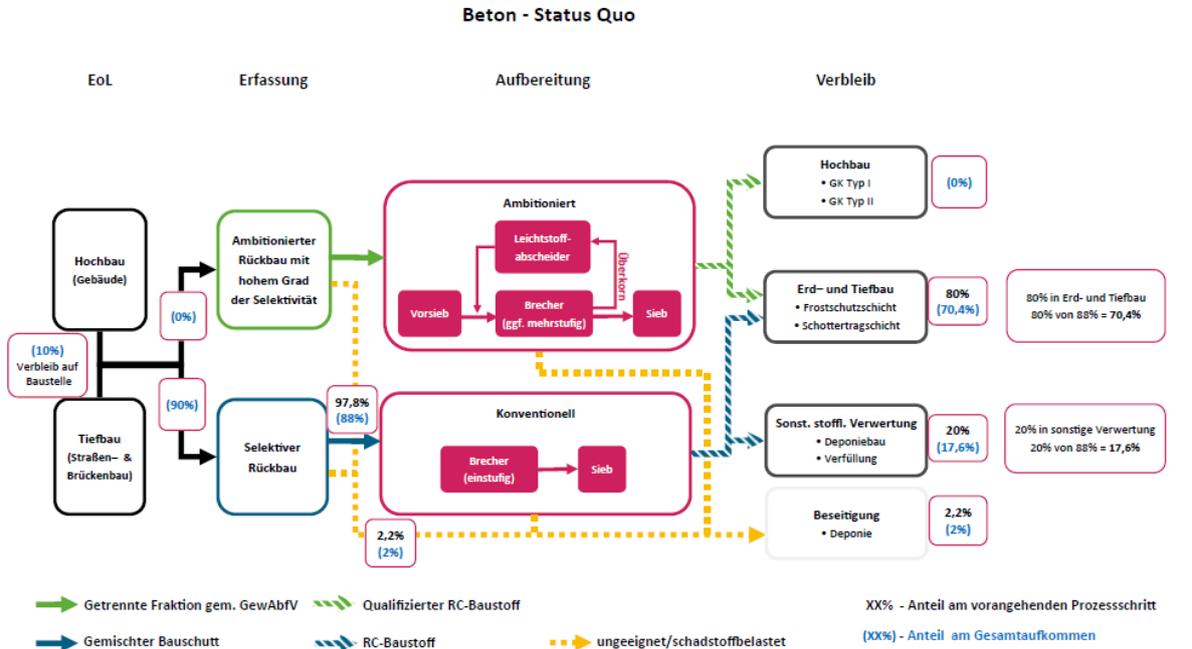
Materialien in 1.000 t	Input 2018	Output 2018	Input 2020	Output 2020	Input 2025	Output 2025	Input 2030	Output 2030
Beton Gebäude	3295,14	-703,36	3290,97	-733,81	3303,70	-795,92	2709,35	-848,42
Beton Infrastruktur	626,51	-496,98	626,51	-496,98	626,51	-496,98	626,51	-496,98
Kalksandstein Gebäude	1293,27	-490,08	1303,54	-486,76	1292,77	-482,25	1010,56	-479,14
Ziegel Gebäude	47,76	-5,36	49,22	-5,45	49,74	-5,84	39,88	-6,17
Klinker (Ziegel) Gebäude	453,11	-171,70	456,71	-170,54	452,93	-168,96	354,06	-167,87
Klinker (Ziegel) Infrastruktur	33,38	-22,66	33,38	-22,66	33,38	-22,66	33,38	-22,66
Mineralische Leichtbaustoffe Gebäude	102,69	-38,91	103,50	-38,65	102,65	-38,29	80,24	-38,04
Flachglas Gebäude	241,96	-93,38	243,93	-97,46	254,43	-104,41	249,32	-110,16
Gipsprodukte n.d. Gebäude	416,42	-97,65	424,36	-102,13	437,57	-113,08	414,84	-121,61
mineralische Dämmstoffe Gebäude	122,17	-6,41	123,51	-6,88	128,26	-7,35	124,05	-7,81
mineralische Dämmstoffe Infrastruktur	0,14	-0,13	0,14	-0,13	0,14	-0,13	0,14	-0,13

Tabelle 47: Prognostizierte RC-Baustoffoutputs für Berlin mit konventioneller, mittlerer und perspektivischer Aufbereitung

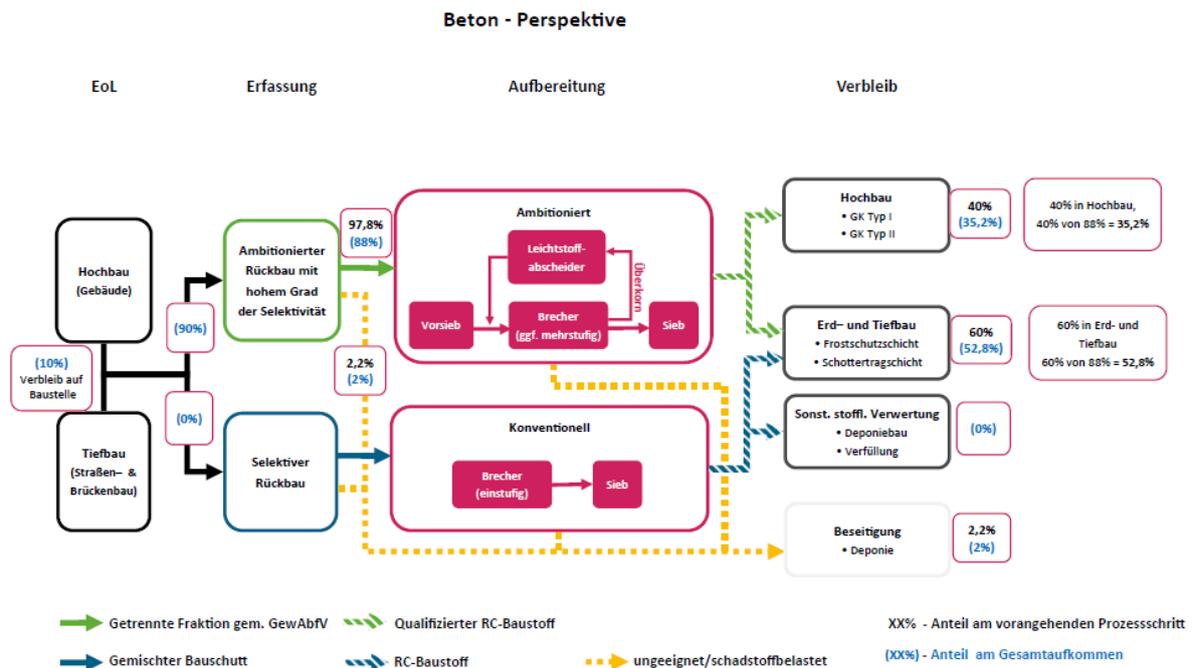
Materialien in 1.000 t	Konv. 2020	Mittel 2020	Pers. 2020	Konv. 2025	Mittel 2025	Pers. 2025	Konv. 2030	Mittel 2030	Pers. 2030
RC-Pflanzsubstrat aus Hochbau	2,33	8,41	53,93	2,49	16,16	53,91	2,64	23,86	53,85
RC-Schaumglas aus Hochbau	6,22	5,33	0,00	6,68	4,53	0,00	7,05	3,53	0,00
RC-Glaswolle aus Hochbau	6,22	5,33	0,00	6,68	4,53	0,00	7,05	3,53	0,00
RC-Glas sonstiges aus Hochbau	3,11	2,67	0,00	3,34	2,27	0,00	3,53	1,76	0,00
RC-Gips aus Hochbau	4,84	20,04	77,40	5,37	43,36	85,94	5,78	69,32	92,42

RC-Behälterglas aus Hochbau	15,55	15,97	18,47	16,71	17,71	19,84	17,63	19,28	20,93
RC-Gesteinskörnung Straßenbau aus Hochbau	815,85	805,43	693,52	859,14	833,48	725,39	894,28	851,51	751,17
RC-Mineralwolle aus Hochbau	0,00	0,98	6,86	0,00	2,36	7,35	0,00	3,90	7,81
RC-Flachglas aus Hochbau	0,00	10,55	73,87	0,00	25,51	79,35	0,00	41,86	83,72
RC-Gesteinskörnung Hochbau Typ I aus Hochbau	0,00	22,08	257,65	0,00	54,04	280,23	0,00	89,61	298,71
RC-Gesteinskörnung Hochbau Typ II aus Hochbau	0,00	6,63	100,76	0,00	14,83	100,10	0,00	22,91	99,46
RC-Pflanzsubstrat aus Infrastruktur	0,00	0,76	6,61	0,00	1,70	6,63	0,00	2,65	6,63
RC-Gesteinskörnung Straßenbau aus Infrastruktur	348,99	341,63	262,76	349,95	333,34	263,48	349,95	324,11	263,48
RC-Gesteinskörnung Hochbau Typ I aus Infrastruktur	0,00	14,96	174,50	0,00	33,75	174,98	0,00	52,49	174,98
RC-Gesteinskörnung Hochbau Typ II aus Infrastruktur	0,00	0,23	2,03	0,00	0,52	2,04	0,00	0,82	2,04

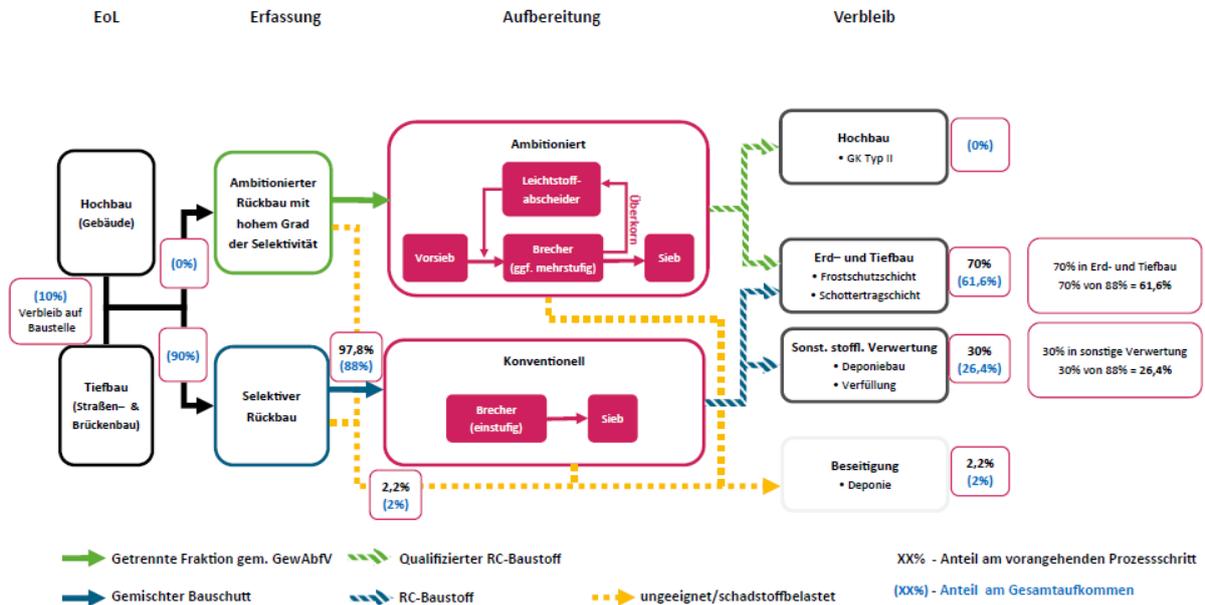
Abbildung 86: Betrachtete Verwertungswege für Beton, Kalksandstein, Mauerziegel, Dachziegel, Mineralwolle, Gips, Flachglas jeweils mit einer Aufbereitung wie im Status Quo und einer perspektivischen Aufbereitung mit jeweils massenmäßiger Aufteilung der Materialströme und der daraus gewonnenen RC-Baustoffe



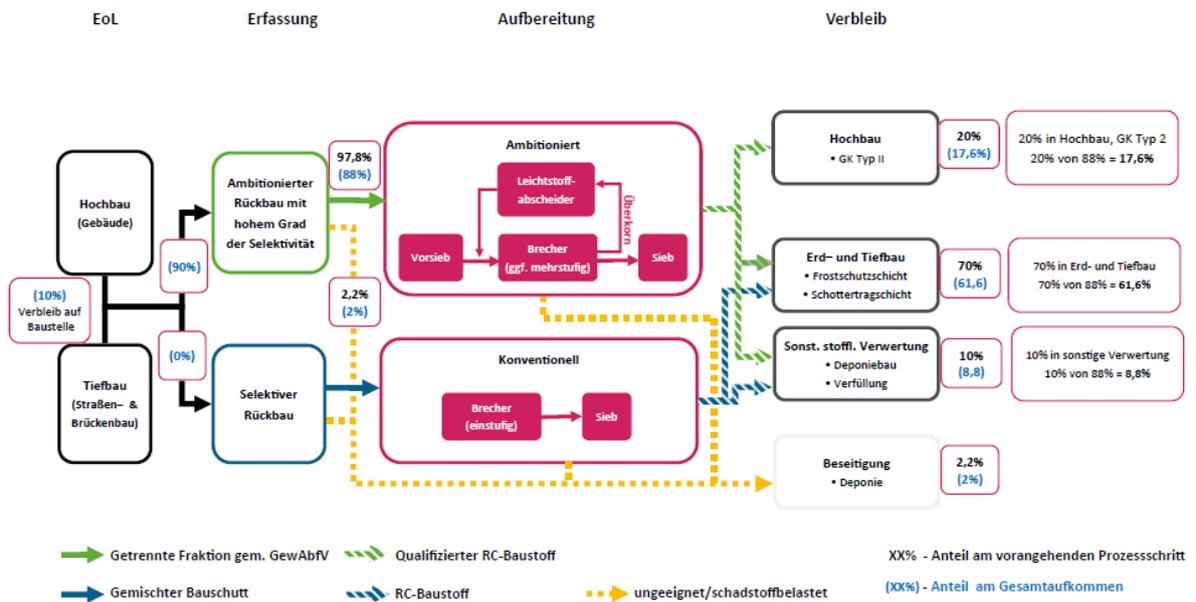
Quelle: eigene Darstellung, ifeu



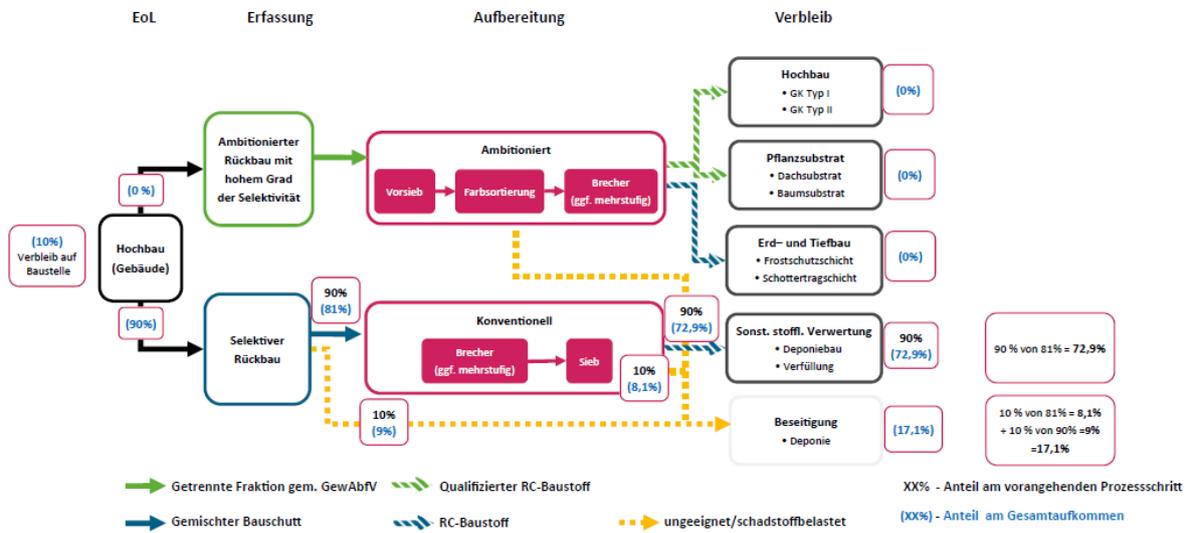
Kalksandstein - Status Quo



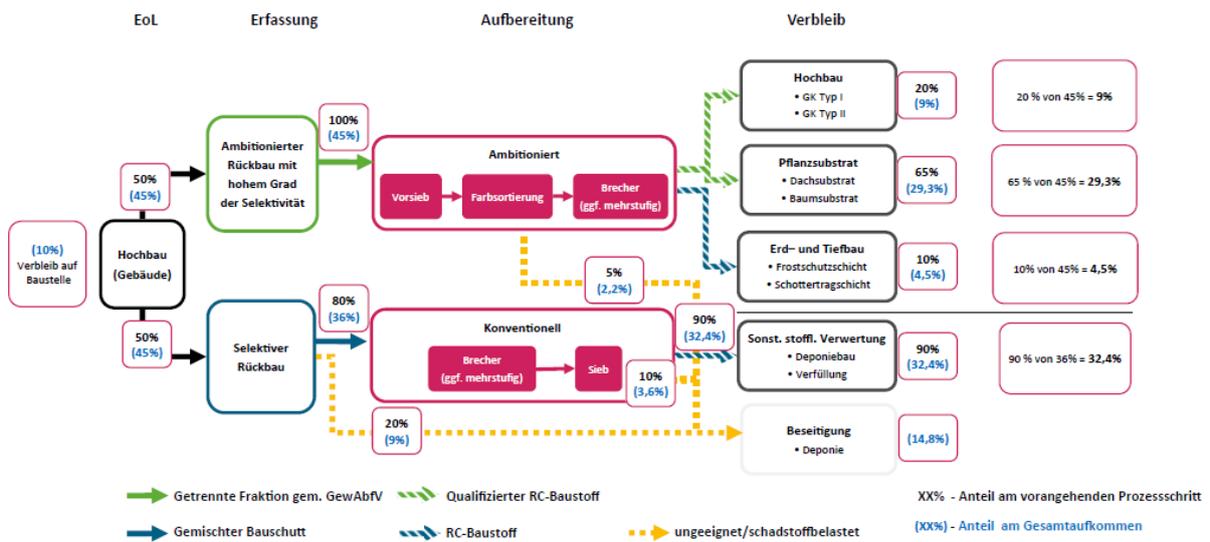
Kalksandstein - Perspektive



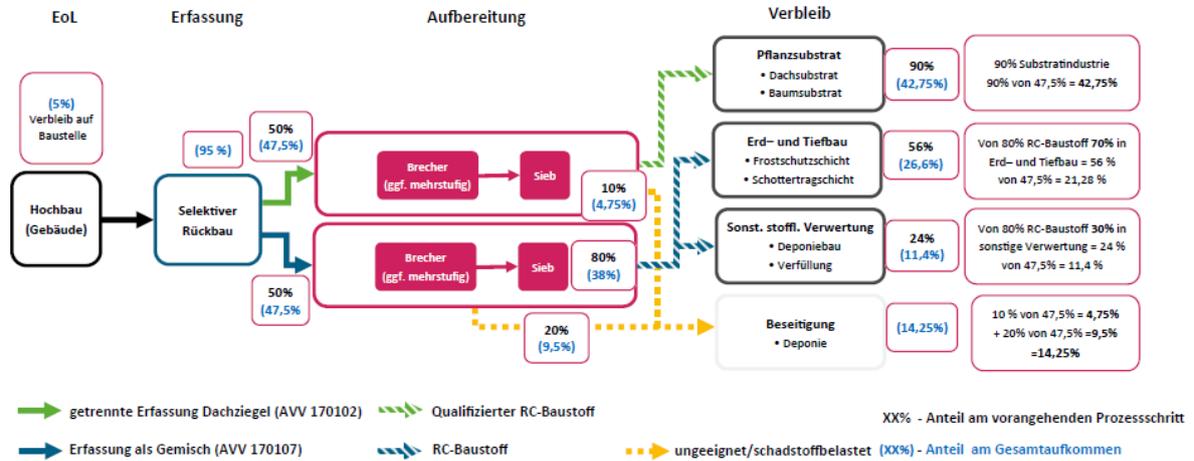
Mauerziegel - Status Quo



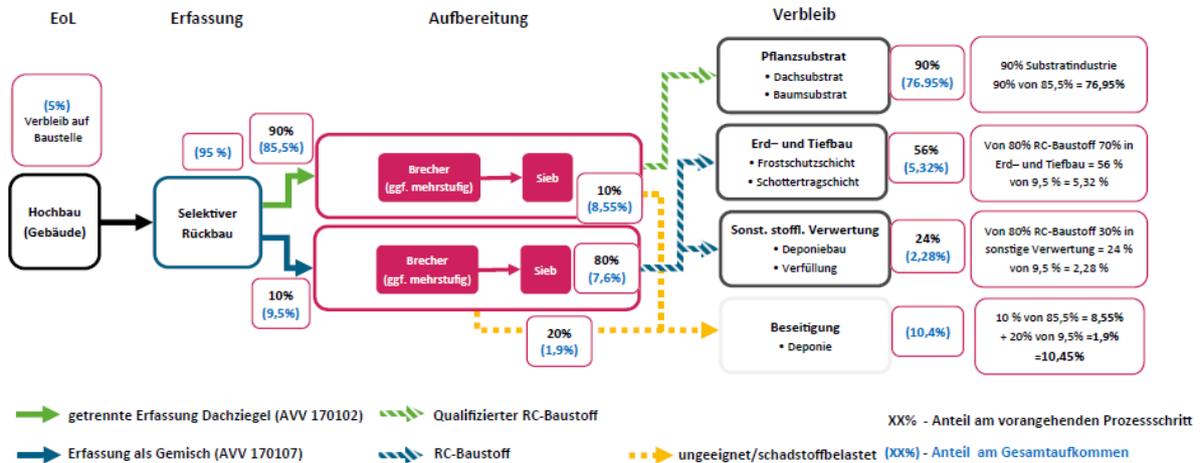
Mauerziegel - Perspektive



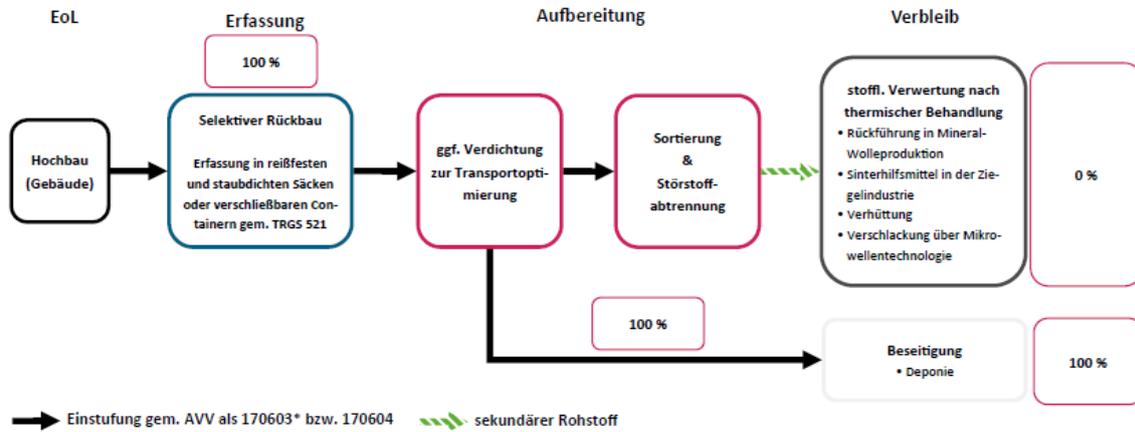
Dachziegel - Status Quo



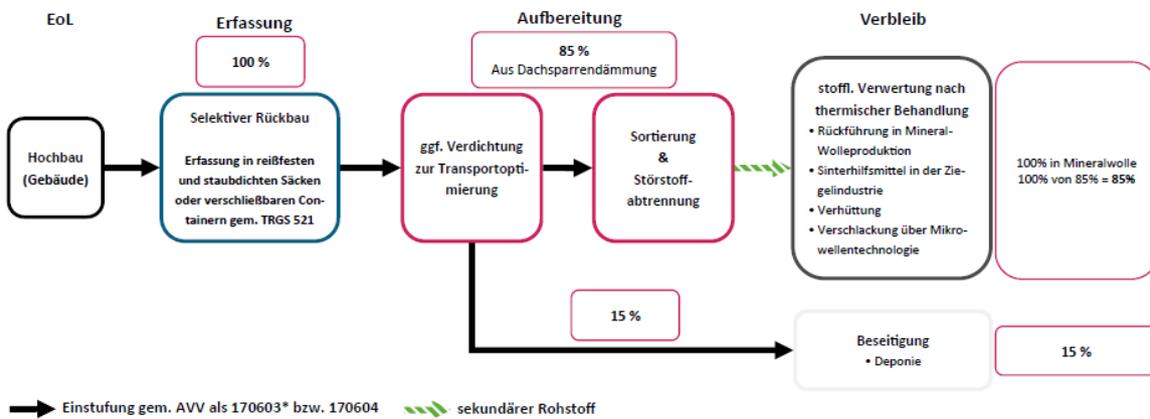
Dachziegel - Perspektive



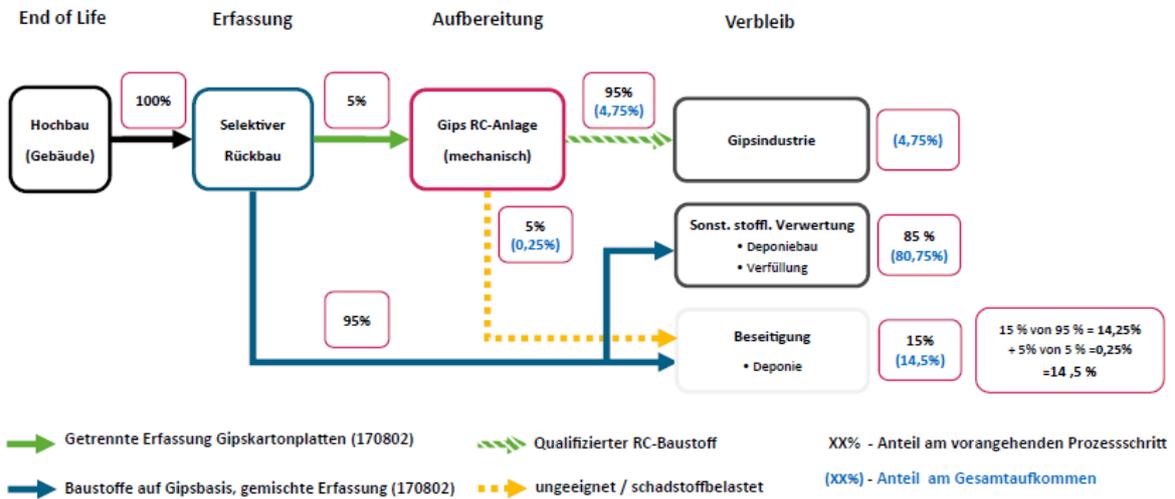
Mineralwolle -Status Quo



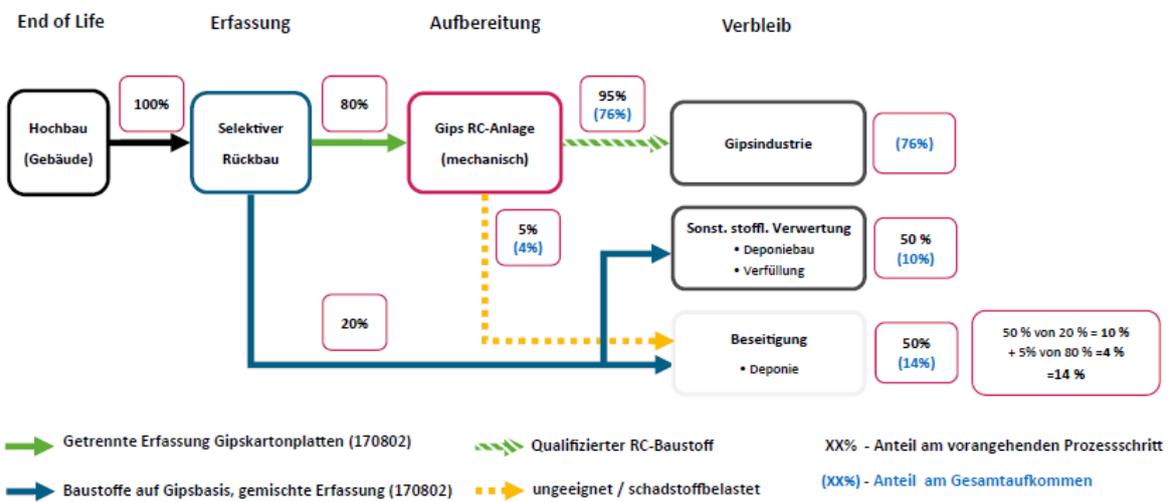
Mineralwolle- Perspektive



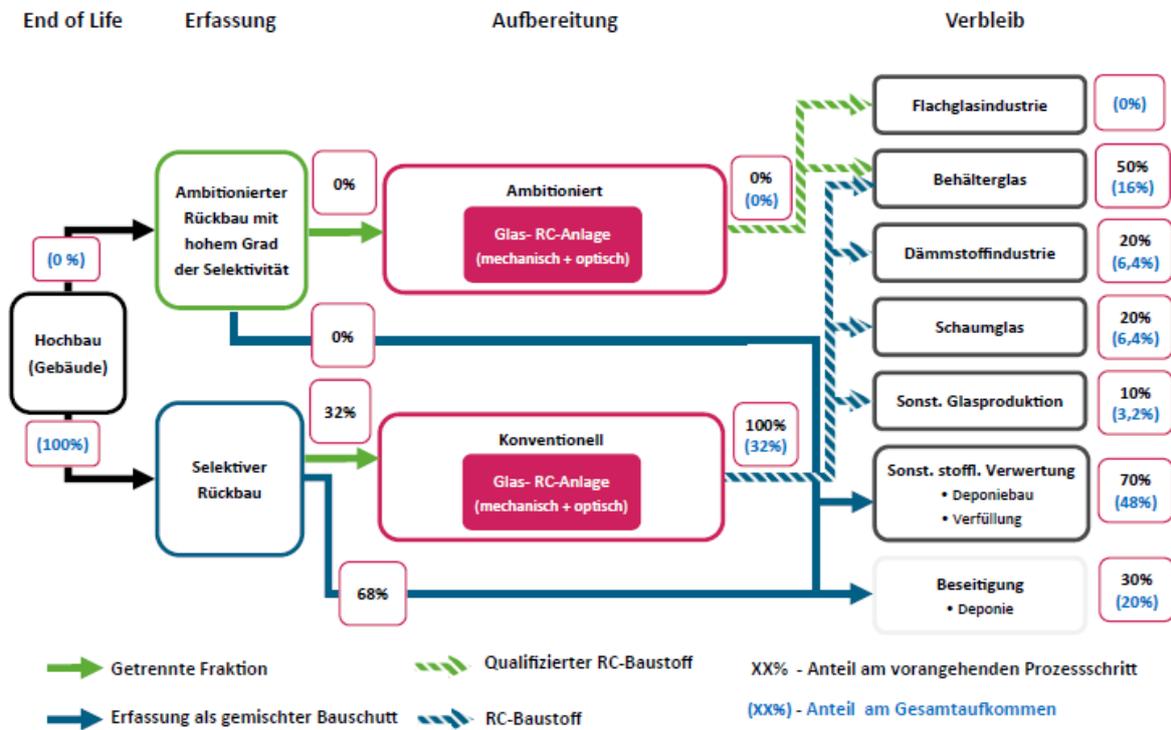
Gips - Status Quo



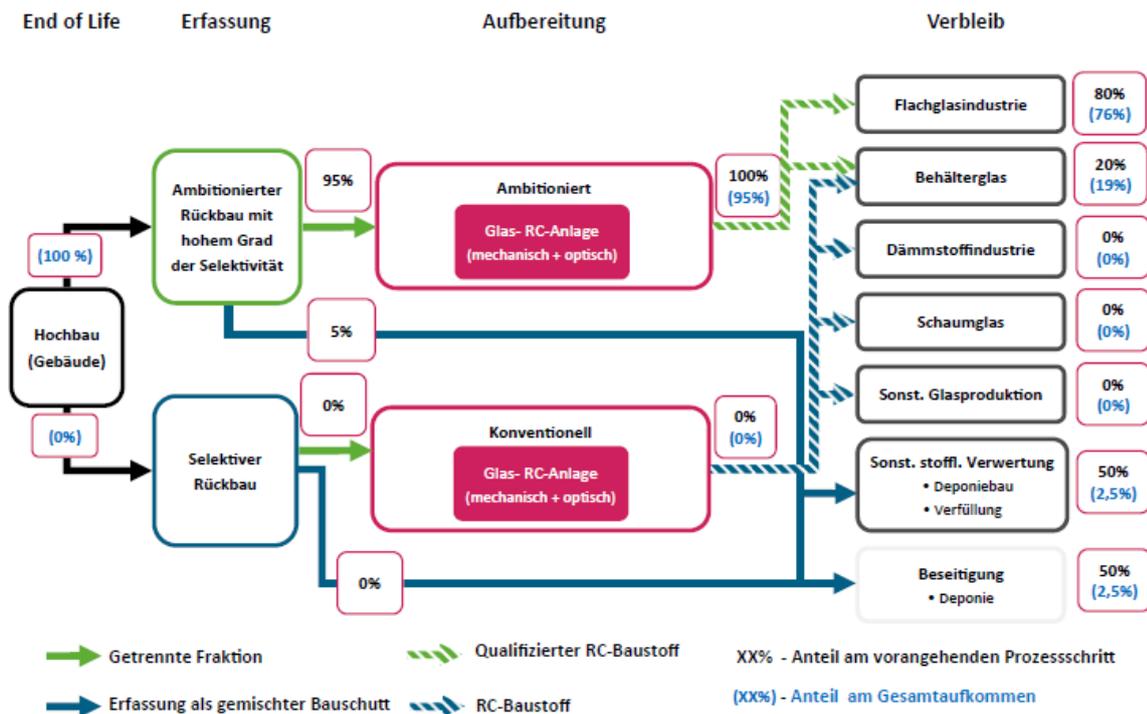
Gips - Perspektive



Flachglas - Status Quo



Flachglas - Perspektive



B Anhang

Dialogforen zu mineralischen Baustoffen (02.11.2017 in Berlin, 20.11.2017 in Heidelberg)

B.1 Auswertung und Diskussion

Florian Knappe, Nadine Muchow

Im Rahmen des oben genannten Projektes wurden 2 Dialogforen durchgeführt, in denen jeweils 6 Themenschwerpunkte zur Kreislaufführung von mineralischen Bauabfällen diskutiert worden sind. Sie dienten dem Austausch und der Vernetzung unterschiedlicher Akteursgruppen, die in der Verwertungskette von mineralischen Bauabfällen beteiligt sind, sowie zur Beleuchtung der Diskussionsinhalte aus unterschiedlichen Blickwinkeln der Bau(stoff)industrie und Entsorgungswirtschaft.

Die vorliegende Auswertung gibt lediglich die Diskussionsstränge in den Dialogforen wieder und erhebt keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit. Sie soll dazu dienen, effektive Stellgrößen für ein verbessertes Stoffstrommanagement zu erkennen und im Fortgang des Projekts zu adressieren.

TOP 1: Kreislaufführung mineralischer Baustoffe aus dem Hochbau

Diskussion

Rohstoffversorgung: Bis dato ist eine Rohstoffverknappung für die Baustoffindustrie zwar absehbar und auch teilweise schon zu spüren. So wurden wachsende Probleme bei der Erweiterung oder der Neuerschließung neuer Abbaustätten geschildert. Dies führt aber offenbar noch nicht dazu, dass sich die Baustoffwirtschaft aktiv um die Erschließung sekundärer Rohstoffe aus der Aufbereitung von post-consumer Abfällen bemüht und dort insbesondere auch investiert. Die Baustoffbranche ist jedoch an dem Thema sehr interessiert.

Absatzwege der Sekundärrohstoffwirtschaft: Die Bemühungen um eine Optimierung der Kreislaufwirtschaft mit höheren funktionalen Recyclingquoten sind vor allem aus der Sekundärrohstoffwirtschaft zu erkennen, die in Aufbereitungstechnik investiert und sich um neue Absatzwege und Erweiterung des Portfolios bemüht. So reagierte man auf das Kalihaldenverbot für Gipsabfälle. Derartige Investitionen werden bislang allein von der Entsorgungswirtschaft getragen. Kooperationen im Sinne einer Risikoverteilung zwischen Bauschutt aufbereitern und der Baustoffindustrie werden nicht geschlossen. Bauschuttrecycler berichten über in der Regel schwierige Absatzmöglichkeiten in den ungebundenen Bereich aus mangelnder Akzeptanz und sinkender Nachfrage aus dem Straßen- und Wegebau.

Anforderungen der Baustoffhersteller: Klar ist, dass eine Kreislaufwirtschaft vor allem dann funktioniert, wenn die aus der Aufbereitung von mineralischen Bauabfällen stammenden Massen möglichst nahe den Spezifikationen und Eigenschaften der primären Rohstoffe entsprechen. Die Bauprodukte dürfen in ihren Eigenschaften und Qualitäten nicht gefährdet sein. Auch die Produktionsprozesse sollten möglichst wenig auf diese sekundären Rohstoffe hin angepasst werden müssen.

Konsequenzen für die Entsorgungswirtschaft: Von der Entsorgungswirtschaft verlangt diese Ausrichtung auf eine bessere Kreislaufführung nicht nur Investitionen in Technik und Know-how. Sie bedeutet ein Umdenken und die gesamten Prozesse der Recyclingwirtschaft müssen auf diese Anforderungen der Baustoffindustrie ausgelegt werden. Welche Rohstoffeigenschaften müssen auch über große Massenströme hinweg verlässlich mit engen Toleranzen erreicht werden? Was bedeutet das für die Aufbereitungsstrategie und -technik und welche Eigenschaften müssen die Abfallmassen als Input aufweisen, um dies letztendlich sicherzustellen. Die größten Herausforderungen werden bei den gemischten Bauabfällen und im Feinkornbereich aus der Aufbereitung gesehen, für die das Aufzeigen hochwertiger Verwertungswege noch schwierig ist.

Status der Bauabfälle: Kommen die sekundären Rohstoffe möglichst nahe an die der primären Rohstoffe heran, liegt die Überlegung nahe, diese Massen aus dem Abfallrecht zu entlassen und mit der Aufbereitung und einer entsprechenden Zertifizierung von Produktion und Produkt sowie Qualitätssicherung ein Abfallende festzulegen. Bei der Gesteinskörnung für den Einsatz im Beton ist dies gelungen, sie unterliegt dem gleichen Regelwerk wie primäre Gesteinskörnung und weist eine CE-Kennzeichnung auf. Für Gips (Recyclinggips) bspw. kann dies bisher nur im Einzelfall (für einzelne Standorte) beantragt und genehmigt werden.

Genehmigungsaufwand für die Baustoffindustrie: Die Verwendung von Rohstoffen, die dem Abfallrecht unterliegen, über eine bestimmte Mengenschwelle hinweg, ist mit einem deutlich erhöhten Genehmigungs- und Verwaltungsaufwand verbunden. Die Genehmigungen der Produktionsanlagen müssen in Richtung Abfallbehandlungsanlage angepasst werden. Es wird zudem befürchtet, dass mit der Verwendung von Abfall auch das Image der einzelnen Baustoffe und damit deren Vermarktbarkeit gefährdet werden könnte.

Normen: Die Normen und Zulassungen der einzelnen Bauprodukte verhindern einen Einsatz von RC-Rohstoffen nicht. So wäre im Fall von Kalksandstein eine Beimengung von 10 % Rezyklat ohne Verschlechterung der Eigenschaften möglich, was aber mangels guter Rezyklatqualitäten aus dem Abbruch und konkurrierender Absatzwege im Deponiebau nicht ausgeschöpft werden kann.

Wirtschaftlichkeit: Für die Recyclingindustrie ist die Umstellung der Produktion auf dieses Portfolio z.T. mit höheren Kosten verbunden. Wirtschaftlich ist dies daher nur zu bewältigen, wenn nicht nur entsprechende Erlöse aus der Vermarktung erzielt werden können. Ganz wichtig ist auch der Erlös der Annahme der Abfallmassen. Hier sind auskömmliche Preise nur dann zu erzielen, wenn alternative Entsorgungswege insbesondere über Deponien und Verfüllmaßnahmen unterbunden werden bzw. nicht in Preiskonkurrenz treten. Billige Senken sind des Recyclings Tod. Nach sukzessiver Anhebung der Preise bspw. für Gipsabfälle an Deponien ist dies in Deutschland in vielen Regionen mittlerweile tendenziell gewährleistet. Problematisch zeigt sich derzeit die Billigentsorgung für Gipsabfälle in Tschechien. Hier muss dringend auf EU-Ebene ein Riegel vorgeschoben werden. Das UBA prüft derzeit mit Vertreter*innen der Länder sowie in Rücksprache mit DG Environment rechtliche und administrative Schritte, um diese Form der Verbringung zukünftig zu unterbinden. Generell sind Deponiekapazitäten restriktiv zu halten. Es spricht auch nichts dagegen, dass seitens der Bundesländer aktiv der Austausch mit Deponiebetreibern gesucht wird, um Annahmepreise für einzelnen Abfallstoffe sicherzustellen, die das Recycling schützen und damit der Intention des Gesetzgebers der Abfallhierarchie entsprechen. Beispielsweise fließen derzeit große Massenströme mineralische Bauabfälle/Bauschutt zur Ablagerung aus Berlin in Richtung Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Thüringen. Denkbar wäre auch ein Verbot der Beseitigung von recyclingfähigen Abfallmassen, was auch auf Ebene einzelner Bundesländer ausgesprochen werden könnte.

Ende der Abfalleigenschaft: Beim Thema Abfallende sind die einzelnen Bundesländer gefordert. Hier müsse man nicht zwingend auf Regelungen auf Ebene der EU oder auf nationaler Ebene warten. Derartige Festlegungen sind auch auf Ebene der Bundesländer zu erreichen und dies sogar mittels Erlass. Beispiel hierfür ist das System QRB in Baden-Württemberg für Baustoffe für den ungebundenen Einbau im Erdbau oder im Straßen- und Wegebau sowie die Einstufung von Flugaschen, Schlacken etc. in einigen Bundesländern als Nebenprodukt. Auch REA-Gips bspw. unterlag noch nie dem Abfallrecht.

Entwicklungsperspektive der Aufbereiter: Es stellt sich die Frage, inwieweit sich die Recyclingwirtschaft in Richtung Produktion von Rohstoffen für die Baustoffindustrie weiterqualifiziert. Denkbar wäre auch das „Finishing“, im Sinne einer Herstellung dieser Materialien, nachgeschaltet von Spezialbetrieben durchzuführen, bspw. an den jeweiligen Produktionsstandorten der Baustoffindustrie.

Vermarktung: Die Baustoffindustrie würde die Verwendung von RC-Rohstoffen und die damit verbundene Ressourcenschonung auch aktiv bewerben bzw. darüber vermarkten. Baustoffe, denen positive Umwelteigenschaften (Ressourcenschonung) zugeschrieben werden können, können positiv vermarktet werden und wecken das Interesse bei Architekten und Bauherren. Vor allem die Planer, d. h. die Architekten, sind hier von zentraler Bedeutung. Bauausführende Firmen und Bauhandwerk sind dem grundsätzlich positiv eingestellt, sie reagieren jedoch nur auf entsprechende Nachfrage seitens der Bauherren/der Planer. Dies bedeutet aber, dass die Bauprodukte, die RC-Rohstoffe verwenden, auch entsprechend zu erkennen sein müssen. Hersteller müssten dies entsprechend ausweisen bzw. es bedarf möglicherweise auch derartiger Produktlabel. Da eine höhere Ressourceneffizienz von Baustoffen und ihr Einsatz nicht per se

mit unmittelbaren wirtschaftlichen Vorteilen verbunden ist – bzw. im Zweifel auch ein wenig mehr kosten darf – muss die Verwendung für Architekten/Planer im Gesamtpaket sinnvoll sein. So sollte der Einsatz ressourcenschonender Baustoffe die Anforderungen aus Gebäudezertifizierungssystemen erfüllen helfen und die Vermarktung der Immobilie fördern. Dazu gehört auch, dass durch den Einsatz von recyclinggerechten Baustoffen und Bauweisen der Rückbau bzw. Abbruch nach Nutzungsende einfacher und kostengünstiger wird. Entsorgungskosten werden vermindert und können im Zuge der Rückbauplanung besser kalkuliert werden. Hilfreich wäre es, wenn dem Einsatz von ressourcenschonenden Baustoffen, ähnlich wie Beiträgen zum Klimaschutz, eine hohe Bedeutung zugesprochen werden würde.

Bauwerksdokumentation: Grundsätzlich muss recyclinggerechte Planung gestärkt werden. Die Dokumentation der Bauweise (Konstruktionsverbunde) und des Materialbestandes von Gebäuden ist aufgrund der langen Verweilzeit und der großen Vielzahl von Akteuren bei Errichtung und auch Nutzung der Gebäude (Instandhaltung, Sanierung) sehr schwierig. Die neuen Gebäudesteckbriefe bzw. BIM seien zu kompliziert aufgebaut, um eine breite Anwendung zu finden. Dennoch sollen Instrumente der Bauwerksdokumentation erarbeitet werden, um zu hinterlegen, womit gebaut wurde – auch mit Blick auf mögliche zukünftige Schadstoffeinstufungen – und um zu gegebener Zeit den Rückbau zu erleichtern, der derzeit mangels Dokumentation rein diagnostisch erfolge.

TOP 2: Beispiel R-Beton

Diskussion

Status in den Untersuchungsregionen: Obwohl in Berlin der Impuls aus Baden-Württemberg zu R-Beton aufgegriffen wurde und auch hier durch ein prominentes Bauvorhaben der Baustoff im Markt bekannt gemacht wurde, ist die Betonindustrie bis auf ein kleineres Werk am Rande der Stadt nicht auf diesen Baustoff „angesprungen“. Auch im Raum Mannheim/Ludwigshafen ist dies wenig gelungen, obwohl in dieser Region das erste Bauvorhaben umgesetzt wurde. Nach Aussage der Transportbetonindustrie ergeben sich für den Einsatz von RC-Gesteinskörnungen oft keine (bedeutenden) Kostenvorteile. Bislang erfolgten in Berlin auch keine weiteren Ausschreibungen. Die Betonindustrie ist jedoch in vielen Regionen vorbereitet, hat die Rezepturen entwickelt und wartet auf eine entsprechende Nachfrage.

Status in anderen Regionen Deutschlands: Vor allem im Raum Stuttgart sind Betonwerke auf die Produktion von R-Beton umgestiegen. Es wird ein Beton nach Eigenschaft produziert und verkauft, da die Gesteinskörnungskosten mit dem Einsatz von RC-Gesteinskörnung günstiger liegen. Dies resultiert daraus, dass Splitt über größere Distanzen angeliefert werden muss. Trotzdem gibt es hier und auch in anderen Regionen Betonwerke, die nur auf eine gezielte Nachfrage/Ausschreibung reagieren, d. h. den Beton gezielt als R-Beton vermarkten und dies ggf. auch zu einem etwas höheren Preis.

Dokumentation in der Lieferkette: R-Beton muss auf den Lieferscheinen dokumentiert und den Baufirmen kommuniziert werden. Bei der Einführung des Baustoffes in eine weitere Region tragen Hersteller sowie bauausführende Firmen Sorge um mangelnde Akzeptanz bzw. wollen die Pionierleistung der Aufklärung der Akteursgruppen über den neuen Baustoff nicht übernehmen. Der Weg, dies über Demonstrationsprojekte bei öffentlichen Bauvorhaben oder im Rahmen von begleitenden Projekten zu machen, ist zielführend und sinnvoll.

Erfahrungswerte der Berufsgruppen: Grundsätzlich gibt es relativ große Unkenntnis bei Architekten und Tragwerksplanern. Nach allen Erfahrungen zeigt sich, dass Baustoffkunde im Rahmen des Studiums keine große Rolle spielt und in den wenigen Seminaren

Kreislaufwirtschaft, Ressourcenschonung, Rückgriff auf RC-Gesteinskörnung oder Regelwerke für R-Beton keine Rolle spielen. Hier sind die Bundesländer und Berufsverbände gefordert, die Curricula der Studiengänge und in den Ausbildungsberufen entsprechend anzupassen bzw. in großem Umfang Fortbildungsangebote zu machen.

Ausschreibungserfahrung: Austausch und Fortbildung sind auch hinsichtlich Ausschreibung und Vergabe notwendig. Hier gilt es aus guten Beispielen zu lernen, in denen Länder entsprechende Vergabebedingungen oder Ausschreibungsrichtlinien für Landesbetriebe angepasst haben bzw. Kommunen entsprechend bei ihren Bauvorhaben ausschreiben. Ein ressourcenschonender Baustoff bzw. R-Beton kann gezielt ausgeschrieben werden, dies widerspricht nicht dem Vergaberecht. Umweltschutz und Ressourcenschutz haben mit den neuen VOB einen deutlich höheren Stellenwert erhalten, was allerdings in der Praxis noch nicht ausreichend bekannt ist und sich niedergeschlagen konnte. Allerdings gestalte sich die Ausschreibung schwierig, da üblicherweise mehrere Ressorts/Fachabteilungen einzubinden und zu überzeugen sind.

Herstellere Erfahrung: Sowohl im Bereich Transportbeton als auch bei Betonwaren und Betonfertigteilen gibt es Hersteller, die gezielt mit R-Beton werben. Der Einsatz von RC-Gesteinskörnungen bei Betonwaren und -fertigteilen ist durch die Regelwerke gedeckt. Die Umstellung der Produktion auf diese Rohstoffe ist möglich, man kann auch hier von guten Praxisbeispielen lernen. Die Entscheidung für das Anbieten von R-Beton speist sich aus vier zentralen Faktoren: Preise, Mengen, Markt, Qualitäten.

Produktkennzeichnung: Aufgrund der erwarteten positiven Resonanz auf diese Baustoffe ist die Transportbetonindustrie derzeit dabei, ein entsprechendes Label zu entwickeln. Nicht alle Baustoffverbände greifen dies auf. Befürchtet wird, dass nicht in allen Fällen und Regionen eine Umstellung auf RC-Rohstoffe möglich ist (keine ausreichende Verfügbarkeit) und eine Auszeichnung über Label daher zu einem schiefen Bild führen würde. Wie am Beispiel Gips oder auch R-Beton gezeigt, ist die Verwendung von RC-Rohstoffen zudem nicht in allen Fällen ökologisch günstiger. Label sollten auch weg von nur einem Faktor gehen (bspw. ausgezeichnet, da Verwendung von RC-Rohstoffen), so wie es der Begriff Nachhaltigkeit ja auch einfordert.

Eine Auszeichnung bspw. über ein Label sei jedoch wichtig. Dies gibt innovativen Betrieben und engagierten Personen die wichtige Anerkennung des gesellschaftlichen Stellenwertes ihres Handelns. Gute Beispiele zu benennen und zu würdigen ist eine wichtige Triebfeder. Andererseits haben die Bauherren/die Kunden auch nur mit einem Label die Möglichkeit, die Ausschreibung gezielt auf nachhaltige Baustoffe auszurichten. Label sind ein wichtiges Entscheidungskriterium für Ausschreibungs- und Vergabestellen der öffentlichen Hand.

Produktbilanzierung /-bewertung: Ökobilanzen als derzeit einziges Bewertungssystem sind in der Praxis nicht durchzuführen, da es keine Umweltproduktdeklarationen für R-Beton gibt und damit keine für die ökologische Bewertung notwendigen Datensätze. In den Zertifizierungssystemen hat Ressourcenschonung mit Blick auf Primärrohstoffe bisher zudem nicht das notwendige Gewicht. Bei der DGNB hat sich dies mit der Novellierung 2017 jedoch deutlich geändert.

Eine weitere Möglichkeit, den Einsatz von RC-Baustoffen bzw. R-Beton zu honorieren, sei es, diesen für einzelne Bauvorhaben mit einer Art „Ökopunkt“ zu versehen, die auf Konten gutgeschrieben würden und mit denen sich negative Umweltfolgen ggf. auch andernorts als Ausgleichsmaßnahme verrechnen ließen; analog dem Emissionshandel.

Perspektive der Recycler: Für Bauschuttrecycler bedeutet die Herstellung der RC-GK für Betonwerke gegenüber der klassischen Produktion Mehraufwand. Bei ambitionierten Aufbereitungsprozessen wird mehr gefordert, der Aufwand ist aber überschaubar und machbar. Ein Problem ist der Absatz der bei der Aufbereitung anfallenden Feinmaterialien/Brechsande, die nicht in Richtung Beton eingesetzt werden können. Für diese müssen demnach gesonderte Verwertungswege erschlossen werden. Andererseits haben Bauschuttzubereiter gerade bei der Herstellung von GK Typ II den Vorteil, Gesteinskörnung aus Mauerwerk hochwertig und damit auch mit entsprechendem Erlös vermarkten zu können. In aller Regel lassen sich Mauerwerksanteile in qualifizierten Straßenbaustoffen nicht einsetzen, hierzu fehlt es an Akzeptanz auf Seiten der Bauherren, obwohl das Regelwerk (TL Gestein, TL SoB) dies in großem Umfang ermöglichen würde. Inwieweit sich die Umstellung der Produktion in Richtung GK für die Betonindustrie rechnet, muss jeder Bauschuttrecycler unter seinen spezifischen Randbedingungen selbst beantworten. Wichtig ist eine ganzheitliche Sicht über alle Stoffströme hinweg. Im Moment sind Splitt und Kies oft sehr preisgünstig zu erhalten, so dass die Wirtschaftlichkeit nicht so einfach möglich ist. Des Weiteren müssen Verwertungswege für das entstehende Feinkorn ausgelotet werden, da dieses viele Verunreinigungen enthält und überwiegend deponiert werden muss.

TOP 3: Herstellung von RC-Baustoffen für den Hochbau – Entwicklung neuer Produkte auf Basis sekundärer Rohstoffe

Diskussion

Einführung neuer RC-Baustoffe: Nach Rückmeldung aus der Baustoffindustrie, setzt diese auf Beibehalten der üblichen Produkte unter Einsatz von RC-Materialien in Anteilen, d. h. nach der in TOP 1 diskutierten Strategie und nicht auf die Herstellung neuer expliziter RC-Baustoffe. Der Aufwand, Zeit- und Kostenrahmen für die Zulassung von neuen Baustoffen ist zwar vom Einzelfall abhängig, aber nicht einfach, da nationale und EU-Regelungen zu beachten sind. Nach erster überschlägiger Einschätzung in den Diskussionsrunden ist der Aufwand tendenziell unverhältnismäßig. Die Baustoffe müssen zudem für jeden Produktionsstandort einzeln zugelassen werden. Da die Kosten schnell im 6-stelligen Bereich liegen, müsste es sich schon um größere Standorte handeln bzw. größere Produktionslinien. Bei innovativen Baustoffen und Techniken ist zu beachten, dass das Haftungsrisiko größer ist. Generell ist der Einsatz von neuen Baustoffen als „Versuchsobjekt“ außerhalb von Bauprojekten der öffentlichen Hand schwierig.

Anwendungsbereiche: Neue RC-Bauprodukte für den Hochbau seien mit Sicherheit weniger universell und nur für bestimmte Anwendungsbereiche geeignet. Aber auch unter den konventionellen Massen-Baustoffen gibt es vor allem bei der Ziegelindustrie die Philosophie, für jeden Anwendungsfall ein spezielles Produkt bereitzustellen. Ein RC-Baustoff bspw. nur für nicht-tragende Innenwände wäre damit nicht ungewöhnlich. Für Architekten sei es zudem kein Problem, die klassischen und RC-Bauprodukte von verschiedenen Händlern zu beziehen. Baufirmen allerdings bevorzugten einen Vertragspartner je Baustoff.

RC-Quoten: Mit Blick auf RC-Anteile wird eine Lösung vorgeschlagen, die analog Benzinbeimengung zwingend für jeden Baustoff eine Quote an RC-Rohstoffen im Produkt vorschreibt, oder auch folgendes Modell: Ab Investitionssumme X ist ein Baustoffanteil von Y als RC-Baustoff einzusetzen. Dies müsste keine Rückführung von Altmaterialien aus dem eigenen Baustoff (Bsp. Post-consumer-Ziegel in die Ziegelproduktion) sein, sondern könnte sich generell auf den Rückgriff auf sekundäre Rohstoffe beziehen. Mit einem Anteil von 10 % wäre schon viel geholfen.

Anforderung an neue RC-Baustoffe: Für die Kreislaufwirtschaft wäre es wichtig, dass eine Zulassung als Bauprodukt nur erteilt wird, wenn eine grundsätzliche Recyclingfähigkeit gewährleistet ist. Textilbeton, die Nutzung von Carbonfasern aber auch die Verwendung von „mit Dämmstoffen gefüllten“ Baustoffen erfolgte ohne diesen Nachweis und lässt Entsorgungsprobleme erwarten.

Zulassungsmodalitäten: Zulassungsverfahren für neue Bauprodukte werden als wenig transparent und aufwendig beschrieben. Es fehlten genaue Vorgaben wie ein neues Produkt eingeführt werden könne, an denen man sich orientieren und die Anforderungen abarbeiten könne. In Österreich wird dies über einen genauen Anforderungskatalog vom Institut für Bautechnik entsprechend geregelt.

Gefährdungsbewertung: Es sei nicht plausibel, dass die Umweltverträglichkeit hinsichtlich der Schadstoffgehalte und –freisetzungen nur im Falle des Einsatzes von RC-Materialien, nicht jedoch der Primärrohstoffe (z. B. Hintergrundbelastungen vulkanischen Gesteins) von Belang sind. Es stellt sich die Frage, warum vergleichbare Stoffkonzentrationen unterschiedlich bewertet werden und warum nicht eine potentielle Umweltgefährdung, unabhängig von der Herkunft des eingesetzten Materials, als Bewertungskriterium gilt. Dies gilt auch für die GK im Beton. Trotz wissenschaftlicher Erkenntnisse, dass die Freisetzungsraten der Schadstoffe in Boden und Grundwasser insbesondere vom verwendeten Zement und nicht von den Gesteinen abhängig sind, werden erhöhte Umweltaforderungen an rezyklierte GK gestellt als an Primär-GK.

TOP 4: Bauschuttrecycling vor neuen Herausforderungen

Diskussion

Anforderungen an das Inputmaterial: Das erfolgreiche Bauschuttrecycling und die Herstellung von hochwertigen gütegesicherten Baustoffen werden auch zukünftig deutlich von der Inputqualität beeinflusst sein. So wird auch weiterhin eine hohe Selektivität an der Sanierungs-, Rückbau- oder Abbruchbaustelle notwendig sein. Die technischen Möglichkeiten sind begrenzt, vor allem ist der Aufwand durch die notwendige Wirtschaftlichkeit und Konkurrenzfähigkeit der Aufbereitung begrenzt.

Outputqualitäten: Das Bauschuttrecycling ist in der Regel wenig technisiert. Oft handelt es sich um mobile Brecheranlagen. In aller Regel beschränkt sich auch bei stationären Anlagen die Aufbereitung auf Brechen und Sieben. Eine zweistufige Aufbereitung ist eher selten, sehr viele Anlagen verfügen zudem nicht über eine Technik zur Abtrennung von Stör- und Fremdstoffen. Angesichts der wachsenden Heterogenität der Abbruchmaterialien und der Fremdstoffanteile sowie den steigenden Anforderungen an die Qualität und Zusammensetzung der Outputmassen muss eine Sortierung in den Prozess integriert werden. Der Zerkleinerung sollte eine automatisierte Sortierung vorgeschaltet sein - in der Schweiz ist dies bereits üblich. Die Aufbereitungstechnik muss den Aufgabenstellungen angepasst sein. Vielfach ist eine Aufrüstung nötig, v.a. im sensorgestützten Bereich und der Nass-Sortierung. Für Bauschutt ist eine sensorgestützte Sortierung ab 4 mm Korngröße möglich. Die stofflichen Eigenschaften der Outputmassen lassen sich grundsätzlich besser erreichen, wenn die Bauabfälle möglichst sortenrein gewonnen und getrennt gehalten und erst nach der Aufbereitung zu Produkten definierter Zusammensetzung und Eigenschaften „zusammengemischt“ werden.

Nassaufbereitung: Die Nassaufbereitung als Sortierung und Wäsche ist bislang nur in wenigen Anlagen installiert. Es gibt aber verschiedene technische Ansätze, die Erfolg versprechen. Wird das Wasser im Kreis gefahren, muss eine zwischengeschaltete Abwasserreinigung erfolgen, die

gerade hinsichtlich Sulfat noch nicht ausgereift ist. Eine Abwasserreinigung bedeutet auch Schlammmanfall, der bis dato über Deponien entsorgt werden muss. Eine hochtechnisierte Bodenwaschanlage/Nassklassierung rechnet sich unter den heutigen Rahmenbedingungen noch nicht ganz. Die alternativen Entsorgungskosten über Deponien müssten in der Regel noch ein wenig höher liegen bzw. müssen für die so erzeugten Massenströme/Produkte noch hochwertige Verwertungswege erschlossen und damit die Erlössituation verbessert werden.

Sensorgestützte Sortierung: Die optische Sortierung bzw. NIR werden gerade auf die Bauschutttaufbereitung adaptiert. Grundsätzlich ist zukünftig auch eine Positivsortierung möglich, d. h. nicht nur ein Ausschleusen von störenden Anteilen, sondern eine stoffliche Auftrennung zur gezielten Abtrennung gewünschter Stoffe, bspw. das Auslesen von Ziegelanteilen.

Gewerbeabfallverordnung: Bisher ist die Novellierung der GewAbfV noch nicht in der Praxis angekommen. Die Novellierung bietet aber durchaus Chancen für die Kreislaufwirtschaft, auch wenn die Verordnung nicht Bauherren adressiert und erst nach erfolgtem Rückbau/Abbruch greift. Das Land Berlin versucht dieses Defizit der GewAbfV (Zugriff auf Bauherren) durch Novellierung der Bauordnung in den Griff zu bekommen. In der Bauordnung soll die Art und Weise der Entkernung und des Rückbaus vorgegeben werden.

Die GewAbfV gibt Anforderungen an die Aufbereitungsanlagen bzw. die Art der Verwertung vor. Die Länder können definieren, welche Art von Anlagen diese Anforderungen erfüllen. So lässt sich sicherstellen, dass das Material tatsächlich bei ausgewählten und qualifizierten Anlagen angedient werden muss (bspw. güteüberwacht nach Gütesicherung Rheinland-Pfalz); qualifizierte Recyclinganlagen, die höhere Annahmepreise realisieren müssen, treten auf diese Weise nicht in Konkurrenz zu unqualifizierten Billiganbietern. Die Recyclinganlage hat dann auch über ausdifferenzierte Annahmepreise je nach Störstoffanteil etc. die Inputqualität zu steuern ohne Gefahr zu laufen, dass „graue Entsorgungswege“ an der Anlage/an einem qualifizierten Recycling vorbei eingeschlagen werden können.

Auslegung der wirtschaftlichen und technischen Zumutbarkeit: Es bedarf dringend einer Erläuterung seitens der obersten Abfallbehörden der einzelnen Länder, was unter wirtschaftlich zumutbar und technisch möglich zu verstehen ist. Dies muss keinen verbindlichen Charakter haben. Eine Aussage dient als Empfehlung oder fachliche Einschätzung, an der sich in der Praxis orientieren lässt und auf die sich im Streitfall/bei Unklarheit berufen ließe. Dabei ist auch zu klären für welche Akteursgruppen die wirtschaftliche Zumutbarkeit gilt. Es existieren unterschiedliche Auffassungen aus Sicht von Bauherren, Abfallmaklern und Aufbereitungsunternehmen.

TOP 5: Optimierung von Sammlung und Logistik für Bauabfälle

Diskussion

Rückbaupraxis: Der selektive Abbruch mit vorgeschalteter Entkernung der Gebäude ist gelebte Praxis. Je größer das Abbruchvorhaben ist, umso ausdifferenzierter kann dies in der Regel erfolgen. Die Auftrennung innerhalb der Mineralik geht nur im Ansatz, ist beispielsweise oft durch die statische Sicherung begrenzt. Großes Problem sind Konstruktions- und Materialverbunde. Auch steht nicht immer genügend Platz für eine Vielzahl von Containern zur Verfügung. Bei kleineren Bauvorhaben rechnet sich dies auch nicht, da nur kleine Mengen anfallen. Die Wirtschaftlichkeit der Selektivität eines Rückbaus wird wesentlich über die Preise für die Entsorgung auch weniger ausdifferenzierter Materialien bzw. Gemische bestimmt. Die Bauabfälle überwiegend als Gemisch zu entsorgen, wäre auch rein wirtschaftlich gar nicht

machbar. Nicht in allen Regionen sind jedoch die Entsorgungsmöglichkeiten über Deponien und andere Senken so beschränkt, dass sich der höhere Aufwand automatisch rechnet. So sind bspw. für Berlin eher ungünstige Rahmenbedingungen durch billige Senken im Berliner Umland gegeben.

Vollzugshilfen: Was genau technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist, sind in der GewAbfV Öffnungsklauseln, die unbestimmt sind und dringend über Handreichungen/Leitfäden näher beschrieben werden müssen. Der Bauwirtschaftsverband RP hat Vollzugshilfen zur GewAbfV herausgegeben, die nach dessen Einschätzung bundesweit Anklang gefunden haben. Es bedarf noch etwas Zeit, bis die neuen Regelungen bei den Betrieben angekommen sind und der Markt sich entsprechend umstellen wird. Auch die LAGA ist im Moment dabei, Vollzugshinweise zu erarbeiten.

Vollzug: Der Einfluss der GewAbfV ist derzeit gering, da ein Vollzug fehlt. Aus Berlin wird von fehlendem Personal in Berliner Bezirksämtern berichtet. Kontrollen der Baustellen finden nur bei Verdachtsfällen statt und nicht routinemäßig. Dieses Defizit ist den Baufirmen bekannt, es werde entsprechend gehandelt. Durch die unterschiedlichen gesetzlichen Zuständigkeiten innerhalb der Bezirksverwaltungen ist eine Kooperation von unterschiedlichen Kontrollbehörden hier schwer bis gar nicht umzusetzen. Gegenbeispiel ist der Landkreis Konstanz: Hier übernehmen die Kollegen bspw. der Gewerbeaufsicht bei ihren Baustellenkontrollen auch Prüfaufgaben der Abfallwirtschaft – und umgekehrt. Hiermit hat man es geschafft, trotz ebenfalls für Deutschland typischer knapper Personalausstattung eine ausreichend hohe Kontrolldichte zu erreichen. Zudem lernt man „seine Pappenheimer“ recht schnell kennen. Man weiß, bei welchen Abbruchunternehmen erhöhter Prüfbedarf besteht und bei welchen eher nicht. Die Aufsicht wird damit flächendeckend erreicht, auch wenn sich nicht alle Baustellen und schon gar nicht mit eigenem Personal kontrollieren lassen. Als Best Practice sollte dies viel stärker kommuniziert werden.

Qualitätskriterien im Rückbau: Die Qualität des Abbruchs wird aber vor allem vom Auftraggeber bestimmt. Hier lässt sich die Selektivität und der Umgang/der Verbleib der anfallenden Materialien unabhängig von der GewAbfV und ihren Unzulänglichkeiten genau regeln. Leider erfolgen die Ausschreibungen oft undifferenziert und den Zuschlag bekommt der billigste. Um als Bauherr qualifizierte Firmen zu erkennen, kann das RAL-Gütezeichen hilfreich sein. Als Mindestanforderung in der Ausschreibung vorgegeben, hilft es, „die Spreu vom Weizen zu trennen“. Berlin macht derzeit Vorgaben zum Rückbau (Pflicht zur Erstellung eines Rückbaukonzepts) in der Landesbauordnung, um nicht nur Auftraggeber aus der öffentlichen Hand, sondern auch private Bauherren in die Pflicht zu nehmen.

Beispiel Gips: Die getrennte Erfassung von Gips funktioniert schon recht gut. Neben den beiden Anlagen im Raum Halle/Leipzig und Stuttgart entstehen weitere – bspw. Zweibrücken. Die Recyclingwirtschaft stellt sich auf steigende Mengen zum Recycling ein. Grundsätzlich können etwa 95 % des Inputmaterials in die Gipsindustrie vermarktet werden. Input
Aufbereitungsanlage: Gipskartonplatten aus dem Abbruch/Rückbau mit üblichen Anhaftungen wie Dübel, Steckdosen oder Metallträgern. Diese Störstoffe können im Aufbereitungsprozess ausgeschleust werden und beeinflussen die Recyclingfähigkeit nicht. Ungünstig sind mineralische Verunreinigungen, die nicht ausgeschleust werden können und so die Qualität des Produktes mindern. Ein Problem ist, dass der Abfallschlüssel auch Porenbeton zulässt, was in zu hohen Anteilen dazu führt, dass das Material nicht mehr recyclingfähig ist. Die Verwerter versuchen im direkten Kontakt mit den Baustellen das fehlendes Know-how im Abbruch/bei Containerdiensten bezgl. der Recyclingfähigkeit des Materials bzw. der maximal tolerablen Störstoffanteile zu kommunizieren. Kommunikation mit Abfallerzeugern, Sammlern etc. ist

zwingend notwendig, um recyclingfähige Gipsabfälle zu akquirieren; dies wurde in den letzten Jahren durch Außendienstmitarbeiter stark umgesetzt; MUEG bietet eine Abholung an, um Qualitäten zu sichern. Dies sei durchaus erfolgreich, die Qualitäten verbessern sich.

Nachträgliche Sortierung: Trotz GewAbfV werden die Hauptströme wahrscheinlich auch weiterhin Gemische sein. Verbundsysteme können auf Baustellen nicht getrennt werden. Das gilt für den klassischen mineralischen Bauschutt, aber auch bei den übrigen nicht-mineralischen Bauabfällen. Die Technik der Bauschuttzubereiter wird mithilfe einer nachgeschalteten Sortierung von Bauabfällen darauf ausgelegt sein müssen. Aus technischer Sicht ist die Trennung von heterogenen Stoffgemischen durchaus möglich, beschränkt sind die Möglichkeiten aus wirtschaftlicher Sicht. Daher hat die gemeinsame Sammlung von bestimmten Abfallarten, die nachgeschaltet gut sortiert werden müssen, neben der gewünschten sortenreinen Erfassung große Relevanz. Insbesondere im Ballungsraum Berlin herrscht oft Platzmangel, so dass selten mehr als zwei Container für die Erfassung bereitgestellt werden.

Besonders problematische Qualitäten kämen vor allem über kommunale Wertstoffhöfe/Recyclinghöfe. Hier ist dringend eine Weiterqualifizierung des Personals notwendig.

Beispiel Flachglas: Für die Verwertung von Flachglas ist die getrennte Sammlung ab Baustelle zwingend notwendig, da hohe Anforderung an die Sortenreinheit gestellt werden und nur Glasscherben > 8 mm sortiert werden können. Zwei Drittel des aktuellen Scherbenaufkommens wird in der Hohlglasproduktion eingesetzt. In den Niederlanden ist ein Sammelsystem für Flachglas etabliert, das über Verkaufsgebühren finanziert ist. Nach den dem Verband vorliegenden Zahlen sind Qualität und Aufkommen an Flachglasabfällen jedoch mit dem Aufkommen in Deutschland vergleichbar, das über kein derartiges Sammelsystem verfügt. Ein aktuelles Forschungsvorhaben untersucht die Behandlungs- und Verwertungswege von Flachglas, um hier ein wenig Licht ins Dunkel zu bringen. Das hochwertige Recycling scheint aber ganz gut zu funktionieren, für die Produktion von Schaumglas stehen nicht mehr ausreichend Scherben zur Verfügung. Der verstärkte Rückgriff auf primäre Rohstoffe hat die Ökobilanzen von Schaumglas in den letzten Jahren deutlich verschlechtert.

Beispiel Mineralwolle: Auch beim Recycling von Mineralwolle können Störstoffe nur in minimalen Anteilen toleriert werden, was eine gemeinsame Erfassung erschwert. Zur Rückführung in die Schmelze müssen Mineralwollabfälle nicht nur nach Stein- und Glaswolle getrennt werden, sondern tendenziell auch nach Hersteller. Chemische Zusätze, die abhängig von den jeweiligen Technologien und Rohstoffen eingesetzt werden, verhindern den Einsatz in der primären Produktion von Herstellern mit anderen Rezepturen und Rohstoffen. In die Schmelzwannen sollten nur Mineralwollen der eigenen Rezeptur rückgeführt werden. Problematisch für die Logistik sind auch das geringe spezifische Gewicht und die großen Volumina. Derzeit gelangen post-consumer-Abfälle vor allem zur Ablagerung auf Deponien. Für die Zukunft bedarf es Lösungen, die die Transportmöglichkeiten verbessern und die Rückführbarkeit erhöhen lassen. Zu prüfen ist, inwieweit die Bau- und Dämmstoffhersteller nicht mehr in die Pflicht zu nehmen sind, im Sinne Produktverantwortung und Rücknahmesysteme.

TOP 6: Ausgestaltung von Entkernung und Abbruch

Diskussion

Zur Ausgestaltung von Entkernung und Abbruch wurden viele Aspekte schon in TOP 5 benannt.

Qualifizierung: Bauherren sind verpflichtet, eine Schadstoffbegutachtung durchzuführen. In der Praxis zeigen sich jedoch deutliche Qualitätsunterschiede. Es ist dringend notwendig, alle Akteure im Abbruch vor Ort weiter zu qualifizieren und den Bauherren ihre Pflichten deutlich zu machen. Im Vergaberecht ist gefordert, dass die Arbeiten von den Bauherren möglichst genau beschrieben werden sollen. Deshalb ist es sinnvoll, besonders qualifizierte, ausgebildete „Fachberater Abbruch“ miteinzubinden. Der deutsche Abbruchverband bildet seit Jahren entsprechend aus. Seitens der Bauherren wurden gute Erfahrungen mit jenen Fachkräften gemacht. Die Erfahrung zeige auch: Je mehr Geld für die Planung aufgewendet wird, desto reibungsloser vollzieht sich der Abbruch und desto kleiner ist das Risiko seitens der Auftragnehmer und Auftraggeber.

Zertifizierungen der Betriebe: Ausschreibungen sollten unqualifizierte Firmen ausschließen. Die Auszeichnung „Zertifizierter Entsorgungsfachbetrieb“ ist mit einigem Aufwand verbunden. Besser geeignet und auf die Aufgabenstellung zugeschnitten scheint das „RAL-Gütezeichen Abbruch“ zu sein. Dieses Gütezeichen wird vom Abbruchverband unterstützt, es hat einen recht hohen Anspruch an die Qualifizierung der Betriebe, so dass es auch nur etwa 100 zertifizierte Betriebe in Deutschland gibt.

Anreize: Die derzeitigen Entsorgungspreise im Südwesten Deutschlands lassen einen selektiven Rückbau weitgehend zu. Der Mehraufwand, vor allem hinsichtlich Personalkosten im Abbruch selbst, wird durch niedrigere Entsorgungskosten für weitgehend sortenreines bzw. stör- und fremdstofffreies Material mehr als kompensiert. Dies ist ein wichtiger Hebel, insbesondere für die Vielzahl an kleinen Abbruchmaßnahmen. Trotzdem bedarf es auch hier einer guten Beratung für private Bauherren, z. B. durch Containerdienste, die erklären, welche Container notwendig sind und was darüber entsorgt werden darf.

Dokumentationspflichten: In der GewAbfV wird über die oben genannten Aspekte hinaus auch eine Dokumentation gefordert. Auch hier fehlt zur Handhabbarkeit die Präzisierung. Es gilt genau vorzugeben, wie welche Sachverhalte dokumentiert werden müssen und welche Stelle diese Dokumentation zu prüfen hat. Dies kann durch die einzelnen Bundesländer erfolgen und muss nicht verbindlich sein. Wichtig ist aber die Dokumentation der Position/Meinung der obersten Abfallbehörde eines Landes als Orientierung für Bauherren und Abbruchunternehmen.

C Anhang

Dialogforen zu mineralischen Baustoffen (30.11.2018 in Ludwigshafen, 12.12.2018 in Berlin)

C.1 Auswertung der Diskussion

Florian Knappe, Nadine Muchow, Joachim Reinhardt, Corvin Veith

Im Rahmen des oben genannten Projektes wurden im Jahr 2018 zwei weitere Dialogforen durchgeführt, in denen jeweils 6 Themenschwerpunkte zur Kreislaufführung von mineralischen Bauabfällen diskutiert worden sind. Sie dienten dem Austausch und der Vernetzung unterschiedlicher Akteursgruppen, die in der Verwertungskette von mineralischen Bauabfällen beteiligt sind, sowie zur Beleuchtung der Diskussionsinhalte aus unterschiedlichen Blickwinkeln der Bau(stoff)industrie und Entsorgungswirtschaft.

Die vorliegende Auswertung gibt lediglich die Diskussionsstränge in den Dialogforen wieder und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie soll dazu dienen, effektive Stellgrößen für ein verbessertes Stoffstrommanagement zu erkennen und im Fortgang des Projekts zu adressieren.

TOP 1: Stoffstromprognose für Berlin und die Kurpfalz

Prognosen sind schwierig, besonders wenn sie die Zukunft betreffen. (Karl Valentin)

Veränderung der Gebäudesteckbriefe über die Zeit:

Retrospektiv wurden die Gebäudesteckbriefe über die Zeit und die Nutzungsarten entsprechend der vorliegenden Informationen variiert. Es liegen aber bspw. nur Informationen zu Beton, Ziegel und „Mauerwerk“ vor, die erforderliche weitere Aufgliederung innerhalb der verschiedenen Mauerwerksteine erfolgte nach einem festen Schlüssel (bei einigen Baustoffen nach den Absatzzahlen der letzten 5 Jahre). Die Zusammensetzung der Output-Stoffströme ändert sich damit über die Zeit.

Problematisch ist der Blick nach vorne: Hier wurde bis dato vernachlässigt, dass gerade aus den Erneuerungs- und Sanierungsmaßnahmen verstärkt Gipsbedarfe resultieren werden. Der Verband erwartet, dass der Bedarf an Gips im Trockenbau deutlich zunehmen wird. 1/3 der Gipsproduktion findet bereits in der Sanierung Verwendung, und dieser Sanierungsbedarf wird deutlich mehr werden. Ebenfalls nicht berücksichtigt werden konnte, dass sich das Verhältnis der einzelnen Baustoffe in den Absatzzahlen sich ändern konnte oder sich neue Baustoffe auf dem Markt etablieren.

Beschränkte Aussagekraft der prognostizierten Verhältnisse von Input und Output:

Die Botschaft, dass der Bedarf an primären Rohstoffen / Naturmaterialien durch das verstärkte Angebot an Recyclingmaterialien sinken wird, gab es schon vor knapp 20 Jahren. Dies hatte Auswirkungen auch auf die Deponiebedarfsprognosen und führte möglicherweise auch zum derzeit knappen Angebot an Ablagerungskapazitäten. Derartige Schlussfolgerungen lassen sich nur bedingt aus diesen Prognosen und damit auch den vorgelegten Zahlen ziehen. Im Rückblick hat sich auch das Aufkommen an Bauschutt in der Vergangenheit kaum verändert – auch dies eher entgegen der verschiedenen Prognosen.

Prognosegrundlagen für Berlin:

Überrascht hat der prognostizierte deutliche Rückgang der Bautätigkeit bzw. in der Verschiebung von Neubau zu Bestandssanierung die Baustoffnachfrage. Eine recht aktuelle Studie geht für Deutschland von einer eher Seitwärtsbewegung und sogar leichtem Anstieg aus. Berlin hat zudem eine eigene sehr aktuelle Prognose der Bevölkerungsentwicklung und der Wohnflächennachfrage. Es wird geprüft, inwieweit diese im Falle Berlin in Ergänzung zur Standardlösung: BBSR zugrunde gelegt wird. Zudem liegen über die jüngste SKU-Bilanz Zahlen zum Bauabfallaufkommen aus dem Jahr 2016 vor, so dass man die Ausgangsmenge für die Prognose daran auskalibrieren kann.

TOP 2: Diskussion der Fact Sheets

Die Präsentation der Fact Sheets erfolgte entlang der Baustoffe, wobei aus Zeitgründen nicht alle Baustoffe vorgestellt wurden. Alle Fact Sheets wurden den Teilnehmenden jedoch vorab zur Verfügung gestellt, Kommentare und Stellungnahmen sind auch für den Nachgang angeboten worden.

Beton

Nach Auskunft des Verbandes haben die Transportbetonhersteller nicht alle ihre eigenen Rohstoffabbaustätten. Es kommt noch eine schriftliche Ausarbeitung im Nachgang. Nach Einschätzung des Verbandes, können 80 % aller nachgefragten Betonsorten schon heute mit RC-

Gesteinskörnung hergestellt werden. Zu beachten ist, dass auch im Wasser- und Ingenieurbau größere Mengen Beton eingesetzt werden.

Ziegel

Die Ziegelindustrie ist sehr bemüht, für Ziegelgranulat neue Absatzbereiche zu erschließen. Dies sind die Herstellung von hochwertigen Substraten oder bspw. auch die Leichtgranulaten oder Geopolymeren. Die hochwertigen Absatzwege sind auf eine verlässliche Abtrennung der Putze angewiesen. Hierzu gibt es Ansätze gemeinsam mit der Mörtel- und Putzindustrie ein praktikables Verfahren zu entwickeln. Strittig ist, ob das Abtrennen des Putzes möglichst an der Baustelle oder beim Bauschuttzubereiter erfolgen sollte. Die Herstellung von Leichtgranulaten verspricht eine Kombination aus Rückgewinnung des Gipses (Abscheidung SO₂ an der RGR des Drehrohrs) und hochwertige stoffliche Verwertung der Ziegel als Komponente eines Mauerwerkgemisches zur Produktion von Leichtgranulat. Noch kommen Vollziegel in den Rückbau. Weich gebrannte Hintermauerziegel werden die Aufgabenstellung verschieben, Lösungen werden derzeit entwickelt.

Gipshaltige Mörtelanhaftungen sind ein Problem, worum sich auch die Gipsindustrie bemüht. Nach Aussage des Verbandes der Gipsindustrie werden hier im Moment drei Ansätze verfolgt. Optische Sortierung, wobei hier nur dann gute Ergebnisse zu erwarten sind, wenn das Material stark zerkleinert wurde. Thermische Ablösung (s.o.) mit einem aktuellen größeren Forschungsprojekt sowie chemisch unterstützte Ablösung im Nassverfahren, wobei aus den Gipskomponenten Flüssigdünger werden soll.

Kalksandstein

In der Gewerbeabfallverordnung ist Kalksandstein nicht gesondert genannt. Kalksandstein hat zudem keinen eigenen Abfallschlüssel. Die Frage der Getrennthaltung ab Baustelle macht sich jedoch nicht an einem Abfallschlüssel fest, sondern wird dann eingeschlagen, wenn eine getrennte Entsorgung / Verwertung dies finanziell honoriert. Die Pflicht, eine möglichst hochwertige Verwertung anzustreben, ergibt sich zudem aus den gesetzlichen Verpflichtungen, unabhängig vom Abfallschlüssel und den Ausführungen in der Gewerbeabfallverordnung.

Unabhängig von den physikalischen Parametern, stößt der Kalksandstein – analog zum Ziegel – in manchen Regionen auf Vorbehalte seitens der Bauherren und wird als Bestandteil der Baustoffgemische für den Straßenbau (FSS) nicht akzeptiert.

Nach Auskunft des Verbandes liegt der Marktanteil bundesweit im Moment bei etwa 30 %. In die Rezepturen können etwa 10 % KSS-Altmaterialien zurückgeführt werden. Rückgeführtes Material muss auf jeden Fall sortenrein, Gipsputzmörtel darf auf keinen Fall enthalten sein. Kalksandsteine werden mit hohen Rohdichten hergestellt. Höhere Anteile an Bauschuttmaterial im Input würde daher die Qualität und Spezifikation gefährden.

Porenbeton

Das Recycling des Porenbetons wird sich problematisch darstellen. Es gibt erste Ansätze für Aufbereitung und Recycling (bspw. Projekte an der RWB in Bremen). Das Brechen ist mit hohen Staubemissionen verbunden. Quarzsande werden als krebserzeugend betitelt. Diese Emissionen sind daher aus Sicht des Immissionsschutzes problematisch, aber auch aus Sicht des Arbeitsschutzes.

Noch fällt Porenbeton in der Regel als Teil des gemischten Bauschutts zur Entsorgung an. Als Teil der zum Recycling vorgesehenen Gipsfraktion ist Porenbeton nur in geringen Anteilen tolerabel. Der wertgebende Anteil ist zu gering.

Gips

Nach Einschätzung des Verbandes der Gipsindustrie sind mit den derzeit 4 Recyclingstandorten angesichts des Abfallaufkommens ausreichend Kapazitäten vorhanden. Das zarte Pflänzchen „Gipsrecycling“ ist aber gefährdet und dies nicht nur wegen der Diskussion um mögliche Asbest-Verunreinigungen (s.u.).

So ist im Moment noch zu viel günstiger REA-Gips auf dem Markt, der im Zweifel zukünftig auch aus dem Ausland importiert werden kann. RC-Gips ist deutlich aufwändiger herzustellen.

In vielen Regionen ist zudem die Ablagerung auf Deponien noch so günstig (bspw. 15€), dass keinerlei Anreiz zu einer sauberen Trennung ab Baustelle (trockene Bereitstellung ausschließlich recyclingfähigem Gips) gegeben ist. Gips macht auf Deponien Probleme, er lässt sich schlecht einbauen und verursacht bspw. für das Deponiesickerwasser eine hohe chemische Belastung und Gefährdung der Infrastruktur.

Dazu kommen die konkurrierenden Standorte und Anlagen, die eine sonstige Verwertung durchführen. Diese gibt es im gewissen Umfang in Deutschland selbst (Versatzbergwerke, bspw. in Wellen), ein Problem stellt aber insbesondere die Entsorgung in Tschechien dar. Als Abfall zur Verwertung eingestuft (und damit grüne Liste) gelangen diese Abfälle in die Sanierung von Uranschlammteichen. Die Umweltstandards sind schlecht, der Nutzen zweifelhaft. Trotzdem war auf Ebene der EU noch keine Intervention erfolgreich.

Möglicherweise werden jedoch steigende Transportkosten (Personalmangel im Fuhrgewerbe; steigende Mautbelastungen – 40 % mehr zum Jahreswechsel) den Ferntransport zukünftig so verteuern, dass Standorte im Land attraktiver werden. Wobei zu beachten ist, dass für den grenzüberschreitenden Transport ausländische Transporteure zu ausländischen Lohnтарифen transportieren dürfen, d. h. zu Entlohnungen, die 50 % unter den deutschen Lohnstandards liegen.

Noch sind die Qualitätsstandards und damit Anforderungen an die zu recycelnden Gipsabfälle noch nicht ausreichend kommuniziert. Das an den Recyclinganlagen angelieferte Material entspricht nicht immer den geforderten Qualitäten und weist zu hohe Fehlwurfanteile und Verunreinigungen auf. Formgipse sind gewünscht, Porenbeton wird in kleinen Anteilen toleriert. Achtung: Die Recyclinganlagen erhalten nicht nur Abfälle mit 17er Schlüssel, sondern auch aus der Vorbehandlung / Sortierung mit 19er Schlüssel. Dies zeigt, dass ein Hebel auch die Umsetzung der Gewerbeabfallverordnung sein könnte: Vorbehandlungsanlagen müssen Abnahmeverträge mit Gipsrecyclinganlagen nachweisen können, um ordnungskonform betrieben zu werden.

Nach Einschätzung der Gipsindustrie und der Recycler ist ein einheitliches Produktstatus für RC-Material nicht notwendig bzw. zielführend. Der Produktstatus leitet sich zurecht daraus ab, ob die Spezifikationen der jeweiligen Abnehmer erfüllt werden, die sich von Standort zu Standort unterscheiden.

Problem Astbestfasern

Im Moment ist die potenzielle Verunreinigung der Gipsabfallmassen / Gipskartonplatten durch Asbest ein großes Thema geworden. Es handelt sich um Verunreinigungen durch Spachtelmassen, Kleber etc. pp. und damit um eine Problemsituation, die den gesamten Baubereich über alle Baustoffe hinweg betrifft. Hier muss schnellstens eine Regelung und ein Modus Vivendi gefunden werden, um nicht die gesamte Kreislaufwirtschaft für mineralische Bauabfälle zu gefährden. Nach Aussage des Verbandes der Gipsindustrie nutzt die dem Ganzen

zugrunde liegende VDI-Studie alte Zahlen, die zudem aus den USA stammen, wo im Gegensatz zu Europa mit Asbest gebaut wird.

Die erste Recyclinganlage für Gipsabfallmassen ist wohl unter anderem auch aus hieraus resultierenden Absatzproblemen geschlossen worden. In der Anlage der MUEG werden im Rahmen einer werkseigenen Qualitätssicherung bereits umfangreiche Asbestanalysen durchgeführt, obwohl diese extrem teuer sind. Macht das Recycling im Moment unwirtschaftlich, sichert aber die weitere Akzeptanz der Abnehmer für den RC-Gips.

Sollte eine Nulltoleranz gegenüber Asbest beschlossen werden, dürfte in Konsequenz der Rückbau der Gebäude deutlich anders gestaltet werden und die großen Massen über Deponien oder gar untertage entsorgt werden müssen. In Spachtelmassen oder ähnlichen Anwendungen im Baubestand kann Asbest nicht zulässig nachgewiesen werden. Sollen belastete Bauteile identifiziert werden, wird deshalb ein anerkanntes und vorgeschriebenes Beprobungskonzept erforderlich werden.

Es bedarf dringend einer Regelung für die Abfallwirtschaft, die derzeit in verschiedenen Bereichen laufende Diskussion (REACH, Gesundheitsschutz / Arbeitssicherheit beim Abriss/Einbau) aufgreift und daraus Schwellen für zulässige Asbestverunreinigungen für die Abfallwirtschaft ableitet. Am Asbestdialog und einer derartigen Ableitung von Leitfäden für die Praxis o.ä. ist die Entsorgungswirtschaft aber auch die Bauindustrie und Architekten zu beteiligen, was bislang nicht geschah. Das Abschlussgespräch wird im nächsten Jahr stattfinden.

Im Dialog wird von einer erfolgreichen Einzelfalllösung in Hamburg berichtet, dass das Material aus einem Betonbauwerk, bei dem die Abstandhalter und Hülsen aus Asbest (weit unter 0,1 % Massenanteil) gefunden wurden, aufbereitet und eingebaut werden durfte.

TOP 3: Optimierung der Getrennthaltung

Auch wenn Gipsbaustoffe ab Baustelle weitgehend getrennt von den klassischen mineralischen Bauabfällen erfasst werden und damit die Getrennthaltung und Verwertung grundsätzlich günstige Ausgangsbedingungen aufweist, sind noch einige Anstrengungen notwendig. Noch gelangen weit nicht alle Gipsmassen in ein Recycling, noch sind die für ein hochwertiges Recycling notwendigen Qualitäten noch nicht immer erreicht. Es bedarf daher weiterer Optimierungen. Dies kann mit Sicherheit über die Zeit durch bessere Kommunikation und Information zwischen Abfallerzeuger und Abnehmer erreicht werden. Es bedarf aber zusätzlicher wirtschaftlicher Anreize, d. h. entsprechende Verteuerung der Beseitigung über Deponien und das Unterbinden bzw. Beschränken der sonstigen Verwertung auf Massen, die nicht recyclingfähig sind.

Eine Senkung der Annahmepreise an den Recyclinganlagen ist nach Rückmeldung der Industrievertreter nicht möglich, da dies einen höheren Abgabepreis für den RC-Gips bedeuten würde. Der Gipsbaustoff würde teurer werden und möglicherweise weniger konkurrenzfähig. Nach Einschätzung der Gipsindustrie sind Preisgarantien für Gipsrecycler zudem kartellrechtlich problematisch. Nach Ansicht der Gipsindustrie wird alleine der Markt den gewünschten Effekt (Stärkung des Recyclings) regeln. Da REA-Gips mit Abschalten der Kohlekraftwerke als Rohstoff ausfällt und nicht (nur) über verstärkten Naturgipsabbau kompensiert werden kann, wird sich die Erlössituation für RC-Gips entsprechend verbessern.

Diese Einschätzung wird seitens der Recycler nicht geteilt. Es ist bis dato nicht klar, wann die Kohlekraftwerke vom Netz genommen werden. Das große Angebot an REA-Gips kann zudem zukünftig auch über Importe aufrechterhalten werden. Nach Einschätzung der Recycler bedarf es Lösungen, wie sie in bspw. Frankreich, England oder Dänemark bereits praktiziert werden.

Dort werden spürbare Strafsteuern erhoben, wenn recyclingfähiges Material auf Deponien beseitigt wird. Die Beurteilung der Recyclingfähigkeit erfolgt an der Baustelle und damit am Anfallort.

Wie gezeigt werden konnte, sind die Rahmenbedingungen für eine optimierte Getrennthaltung ab Baustelle gegeben. Es gibt keine technischen Hinderungsgründe. Gerade wenn sich die Notwendigkeit zur Getrennthaltung ergibt, wird sie auch praktiziert, wie man neben dem Gips auch bspw. an Mineralwolle erkennen kann. Die Einschätzung in der Diskussion war: es muss Flagge gezeigt werden. Materialien, die recyclingfähig sind, müssen auch einem Recycling zugeführt werden. Die Gewerbeabfallverordnung kann dazu ein wichtiger Hebel sein, wenn deren Vollzug auch entsprechend gesichert wird. Der Markt wird sich darauf sofort einstellen. Entwickelt sich dann auch die Nachfrage aus der Baustoffindustrie nach derartigen Rohstoffen, wird sich auch die Aufbereitungsstrategie wandeln, weg vom einfachen Brechen und Aufbereiten auf den Baustellen.

Dies wurde auch am Beispiel Ziegel aufgezeigt. Hier gibt es bereits eine hohe Nachfrage nach sauberem Ziegelmaterial als Ausgangsmaterial für die Herstellung von hochwertigen Substraten bspw. für die Dachbegrünung, die in einigen Regionen deutlich über dem Angebot liegt. Dachziegel aus Sanierungsbaustellen werden daher in der Regel auch bereits schon getrennt erfasst und verwertet. Nach Rückmeldung aus dem Abbruch, müsste es technisch auch möglich sein, maschinell die Dacheindeckungen zu entfernen und zwar mit den üblichen Longfrontbaggern und entsprechendem Werkzeug. Dies ist aber noch nicht die Regel und gerade auch bei Eindeckungen, bei denen die Ziegel verklammert sind, problematisch. Zudem teuer und zeitaufwendig.

Mauerziegel werden seit längerem v.a. porosiert ausgeliefert, nicht selten mit im Mauerstein integrierten Dämmstoffen. Nach den Erfahrungen bei den anderen Baustoffen (s.o.), könnten dies günstige Rahmenbedingungen für eine Getrennthaltung und zukünftig hochwertige Verwertung sein. Porosierte Ziegel sind wasseraufnahmefähig und damit als Rohstoff für die Substratherstellung eigentlich besser geeignet als bspw. Dacheindeckungen. Die Dämmstoffe sind kraft- und eher nicht materialschlüssig eingebunden, so dass sie sich durch eine geeignete Aufbereitungsstrategie auch wieder im Recycling abtrennen lassen. Dies sind Langsamläufer für ein schonendes Brechen in Kombination mit einer Leichtabscheidung bspw. über Windsichter. Da die Dämmung weit über 50 Vol. % des Inputmassenstroms darstellt und die dargestellte Aufbereitung recht aufwendig ist, werden derartige Abfallmassen mit großer Wahrscheinlichkeit getrennt von den übrigen mineralischen Bauabfällen in separaten Linien aufbereitet werden müssen. Dies erleichtert auch die Preisbildung für die Abfallanlieferung. Eine getrennte Aufbereitung bedeutet aber auch, dass ein Outputstrom aus porosiertem Ziegelmaterial besteht und entsprechend vermarktet (s.o.) werden könnte.

Problematisch sind die Putze, die sich sowohl auf der Innen- als auch auf der Außenseite der Mauersteine befinden. Auch hier werden technische Lösungen entwickelt. Die im Vortrag aufgezeigte Strategie eines Bauschuttrecyclers aus dem Raum Berlin (optische Sortierung) führt zu einer Reinheit von 85 % bei einem Durchsatz von 10-12 t/h. Grundsätzlich ist eine optische Sortierung von mineralischen Materialien deutlich schwieriger als die von Kunststoffen, da verschiedene Materialien die gleiche Farbe und Dichte aufweisen können. Die Ziegelindustrie ist mit der Putzindustrie im Austausch und hier auch mit der Gipsindustrie. Nicht zuletzt wegen der Staubbelastungen werden eher Lösungen beim Bauschuttrecycler gesucht (bspw. Attritionstrommel), ein Entfernen der Putze bereits auf der Baustelle wird als problematisch eingeschätzt.

TOP 4: Ausschreibung / Vergabe / Label

Eine Recyclingwirtschaft ist nur dann erfolgreich, wenn die entsprechende Nachfrage aus dem Markt besteht und ein Absatz gesichert ist. Dies gilt insbesondere für neue Recyclingstrategien mit Outputmassen, für die erst ein Markt entwickelt werden muss. Dies bedeutet, dass Baustoffe, die auf RC-Rohstoffe zurückgreifen, auch als solche erkennbar sein müssen. Nur dann kann in der Beschaffung und Vergabe gezielt darauf abgehoben werden. Die Kennzeichnung ist jedoch nicht einfach möglich.

Von Seiten der Gipsindustrie wird darauf verwiesen, dass für Gipsprodukte aus RC-Materialien derzeit noch keine Strukturen bestehen. Bislang sind die Recyclingmaterialien im Aufkommen so gering, dass noch keine gesicherten Belieferungen in der Form möglich sind, für einzelne Produktionsstandorte genaue RC-Anteile im Produkt bspw. über Label benennen zu können. Ein und dasselbe Produkt kann aufgrund der verschiedenen Produktionsstandorte unterschiedliche Anteile an RC-Material aufweisen. Alle Kriterien des aktuellen Produktes müssen flächendeckend erfüllt werden. Aktuell wäre das mit einem sehr hohen Aufwand verbunden.

Die Mineralwollindustrie kennt die Zertifizierung mit Blauem Engel für 45 % Altglasanteil. Dies war in der Vergangenheit nicht so ganz einfach, da der Rohstoff Altglasscherben aus insbesondere Behälterglas plötzlich begehrt war und drohte, nicht mehr ausreichend zur Verfügung zu stehen.

Es werden drei Ansätze einer Optimierung von Ausschreibung und Vergabe vorgestellt, die alle darauf angewiesen sind, dass der Rohstoffeinsatz für die Baustoffe erkennbar ist. Dies ist bei Transportbeton relativ einfach, da in der Produktion Rezepturen festgehalten werden, die in der Vergabe kommuniziert und belegt werden können. Die für Berlin vorgestellten Leistungsblätter werden zukünftig für eine Vielzahl von Baustoffen Mindestanforderungen auch hinsichtlich des eingesetzten Rohstoffes formulieren, d. h. von den Herstellern entsprechende Nachweise einfordern.

Die Befürchtung, dass damit die Hersteller bezüglich der Produkteigenschaften aus der Gewährleistung entlassen werden, ist nicht begründet. Zentrale Grundlage in Ausschreibung und Vergabe bleiben die Produktanforderungen gemäß den verschiedenen technischen Regelwerken. Die Asphaltindustrie ist für dieses Zusammenspiel ein gutes Beispiel. Hier geben die Kunden teilweise konkrete Rezepturen vor, ohne dass der Asphaltproduzent aus der Produkthaftung entlassen wäre.

Die Praxis aus Berlin zeigt, dass die Planungskosten nicht über Gebühr steigen. Die erzielbaren Einsparungen über die Lebenszykluskosten rechtfertigen zudem zumindest bei den energieverbrauchenden Produkten den Mehraufwand.

Strittig ist die Praxistauglichkeit des dritten vorgestellten Modells, nach dem die Vergabe nach einer Bewertungsmatrix erfolgt, die über den Preis hinaus weitere Kriterien bspw. zum Klimaschutz und Ressourcenschutz enthält. Die Vergabe nach derartigen Matrices wird angreifbarer, die Vergabestellen der öffentlichen Hand sind schon heute mehr als ausgelastet, so dass der damit verbundene Mehraufwand kaum mehr zu leisten wäre.

Speziell für den Baubereich, d. h. die Ausschreibung von Bauleistungen, ist dieser Ansatz nicht praxistauglich. Der Zeitpunkt der Beauftragung kann deutlich später zur Angebotslegung erfolgen. Unterverträge wie insbesondere auch zur Belieferung mit Baustoffen werden erst nach der erfolgten Vergabe geschlossen, so dass Festlegungen zu Lieferanten und Baustoffen bei der Angebotslegung mit höheren Risiken für die bauausführende Firma verbunden sind. Firmen werden zudem mit einer großen Vielzahl an Preisanfragen und Aufforderung zur

Angebotsabgabe konfrontiert, die auch nur zu einem kleineren Teil zum Erfolg führen. Dieser Aufwand ist nur dann zu bewältigen, wenn diese nicht immer schon bspw. mit Lieferverträgen für die Baustoffhersteller und Baustoffhändler hinterlegt werden müssen.

TOP 5: Ausbildung zur Ressourcenschonung

Die These, dass die Ausbildung der Architekten und Bauingenieure deutliche Lücken in Richtung Baustoffkunde und „circular economy“ aufweist und auch nicht durch entsprechende Fortbildungsangebote aufgefangen wird, wird bestätigt. Klar ist, dass es gerade auch wegen der verkürzten Studienzeiten und einer Vielzahl an Ausbildungs- und Fortbildungsnotwendigkeiten schwierig werden wird, dieses Thema verstärkt in die Curricula einzubinden.

Auch die Ausbildung in Bauberufen hinkt hinterher. RC-Branche hat keine Lobby. Die Neue Ausbildungsverordnung, die diejenige aus dem Jahr 1999 ablösen soll, ist seit 3 Jahren in Diskussion. Es dauert wahrscheinlich insgesamt 4 bis 5 Jahre, bis diese beschlossen und eingeführt wird.

Das Fortbildungsgebot ist ein wichtiger Hebel. Zudem bestimmt eigentlich auch die Nachfrage den Markt. Angesichts des allgemeinen Fachkräftemangels kann man derzeit aber nicht wirklich Anreize setzen und bspw. gezielt nur Personen mit bspw. entsprechend ökologischer Qualifikationen und Denke einstellen.

D Anhang

Dokumentation des ersten Dialogforums im Projekt KartAL III zu Basis- und Sondermetallen

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 37 16 35 3230

D1: Hintergrund der vorliegenden Dokumentation

D.1.1.: Aluminium und Magnesium

D.1.2.: Messing und Zink

D.1.3.: Edelstahl

D.1.4.: Zinn

D.1 Hintergrund der vorliegenden Dokumentation

Im Rahmen des Projektes „Kartierung des anthropogenen Lagers III“ wurde ein zweitägiges Dialogforum durchgeführt. Das Ziel war die Kreislaufführung verschiedener Metalle näher zu beleuchten um Hemmnisse im Recycling zu identifizieren und dazu passende Lösungsansätze zu sammeln. Am ersten Tag wurde in einer Gruppe zu Aluminium und Magnesium und in einer zweiten Gruppe zu Messing und Zink diskutiert. Am zweiten Tag lag der Fokus in einer Gruppe auf Zinn und in der zweiten auf Edelstahl.

Ein weiteres Ziel lag im Austausch und der Vernetzung der unterschiedlichen Akteursgruppen, welche Teil der Verwertungskette sind, um ein gemeinsames Verständnis aller Akteure zu erreichen.

Die vorliegende Auswertung gibt die Diskussionsstränge in den Dialogforen wieder und erhebt keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit. Sie soll dazu dienen, effektive Stellgrößen für ein verbessertes Stoffstrommanagement zu erkennen und diese für den Fortgang des Projekts zu adressieren.

Im Folgenden sind zunächst die jeweiligen Diskussionsteilnehmer aufgeführt und anschließend die als Einzelmeinungen angesprochenen Hemmnisse sowie dazu vorgeschlagene Lösungsansätze, sofern in der Diskussion angesprochen. Die Dokumentation der Diskussion ist nicht chronologisch, sondern ist nach den unterschiedlichen Stufen der Verwertungskette gegliedert. Hierbei sind die, auf dem Dialogforum angesprochenen, Haupthemmnisse dargestellt. Auch wenn einzelne Hemmnisse für verschiedene Metalle gelten können, sind sie nur dann dokumentiert, wenn sie Teil der Diskussion waren.

D.1.1 Aluminium und Magnesium

Tabelle 48: Aluminium und Magnesium: Hemmnis und Lösungsansatz

Nr.	Angesprochenes Hemmnis	Vorgeschlagener Lösungsansatz
Produktion		
1	nur Mg: Die Gesetzgebung bezüglich der Gefährlichkeit von Mg ist sehr restriktiv: Probleme bei Transport und Recycling von Mg-Schrotten	Aktualisierung der Gesetzgebung unter Berücksichtigung neuer Erkenntnisse.
2	nur Mg: Die geringen Mengen von Magnesium führen dazu, dass ein Recycling erschwert wird, da die Wirtschaftlichkeit eher bei größeren Volumenströmen gegeben ist. Die Versorgungssicherheit und Preisstabilität sind hier maßgeblich, da beispielsweise die Automobilindustrie nur Werkstoffe einsetzen möchte, deren Verfügbarkeit garantiert ist.	Produktionskapazitäten müssen in Deutschland bzw. Europa geschaffen werden, um die Versorgungssicherheit zu erhöhen. Hierfür müssen die Rahmenbedingungen geschaffen werden.
3	nur Al: In absehbarer Zeit bestehen Kapazitätsengpässe für das Al-Recycling, da der Markt und die Menge des aus dem Lager zurückkommenden Materials wachsen.	Es müssen Rahmenbedingungen geschaffen werden, die ein Investment in neue Anlagen begünstigen, beispielsweise langfristige Planungssicherheit was die Umwelt- und Energiepolitik betrifft.
4	Downcycling wird immer problematisiert, obwohl die Industrie Sekundärstoffe immer in dem Maße einsetzt, das wirtschaftlich darstellbar ist, um Primärmaterial zu substituieren und so Emissionen zu vermeiden.	Downcycling muss im Einzelfall betrachtet und nicht generell als schlecht dargestellt werden.
5	Genehmigungsverfahren dauern zu lange. Dies führt dazu, dass weniger investiert wird und letztlich zu geringeren Recyclingkapazitäten und Anlagen mit älterer Prozesstechnik, da keine neuen Standorte mit neuen Verfahren gebaut werden.	Genehmigungsverfahren müssen beschleunigt, vereinfacht und transparent gestaltet werden.
6	Die Anforderungen an die Qualität der Sekundärmaterialien steigen	Anreize setzen, um mehr Sekundärrohstoffe einzusetzen (beispielsweise CO ₂ -Gutschriften für die Vermeidung von Primärmaterialnutzung).

Nr.	Angesprochenes Hemmnis	Vorgeschlagener Lösungsansatz
	(durch Regulierungen und Verwender-Ansprüche z. B. Automobilhersteller). Folge: weniger Sekundärmaterial in entsprechenden Anwendungen als technisch möglich.	Öffentliche Ausschreibungen könnten die Forderung nach geschlossenen Kreisläufen aufnehmen und so die Hersteller dazu bringen mehr Sekundärmaterial einzusetzen.
7	Diskrepanz zwischen Genehmigungsverfahren zwischen den Bundesländern. Dies ist u. a. standortabhängig sowie abhängig von der jeweils zuständigen Amtsperson.	
8	Die Rahmenbedingungen sind ungünstig um zu investieren, da keine langfristige Investitionssicherheit gegeben ist (beispielsweise was die Energiepolitik betrifft).	Langfristige Rechts- und Investitionssicherheit muss geschaffen werden, indem die Politik ihre Zukunftspläne beispielsweise in der Energiepolitik transparent darstellt.
Verarbeitung		
9	Bei der Herstellung von Produkten wird nicht an das spätere Recycling gedacht. Dies führt zum Einsatz von Kompositen, welche nur schwer recycelbar sind.	Design for Recycling muss in die Praxis gebracht und nicht nur als Floskel genutzt werden. Die Produktverantwortung der Hersteller muss gestärkt werden. Hersteller müssen dann selbst Verwertungsverfahren für ihre in Verkehr gebrachten Produkte planen.
Sammlung & Aufbereitung		
10	Arbeitsintensive Abfallbehandlung (z. B. aufgrund Erfordernis manueller Sortierung) werden exportiert, da eine Behandlung in Deutschland ökonomisch nicht darstellbar ist.	
11	Die Bürokratie auf verschiedenen Ebenen (Europa, Deutschland, Bundesländer, Regierungsbezirke) ist teilweise sehr inhomogen und abhängig von den zuständigen Personen. Mögliche Folge: lange Bearbeitungszeiten & ungewisser Ausgang der Genehmigungsverfahren; Verzögerung bei Schrotttransporten über nationale Grenzen.	Elektronische Bürokratie mit e-Formularen entwickeln. Zudem sollten grenzüberschreitende Transporte innerhalb der EU vereinfacht werden, da diese für grün notifizierte Schrotte unverhältnismäßig kompliziert sind.

Nr.	Angesprochenes Hemmnis	Vorgeschlagener Lösungsansatz
12	Eine bessere Sortiertechnik ist notwendig um Schrotte besser trennen und damit recyceln zu können. Legierungsbestandteile gehen sonst öfter verloren, da kein passgenauer Schrotteinsatz möglich ist.	
13	Die Deklarationspflicht und die damit verbundenen Anforderungen zum Umgang mit gefährlichen Abfällen führt in der Praxis zu erheblichen Aufwendungen beim Transport, da nicht genug Kapazitäten für den Transport von gefährlichen Abfällen vorhanden sind.	
14	Die Sammlung von EOL-Schrotten muss verbessert werden, da hier Verluste auftreten	
15	Das Recycling ist teilweise wirtschaftlich nicht darstellbar.	Für das Recycling von EOL-Schrotten könnten CO ₂ -Gutschriften vergeben werden um die Rahmenbedingungen zu verbessern. Subventionen sind ebenfalls möglich, werden allerdings kritisch gesehen, da sie nur als „Starthilfe“ dienen sollten und nicht als Dauerinstrument. Zudem müssen praxistaugliche EoW-Regularien erstellt werden.
16	Beim Export von beispielsweise E-Schrotten (deklariert als Gebrauchtgeräte) fehlen Kontrollen, welche einen illegalen Export wirkungsvoll unterbinden können. Dieser Schrott steht dem Recyclingkreislauf in Deutschland nicht mehr zur Verfügung. Zudem sind bei Kontrollen die Spielregeln unklar, da auch hier Definitionen nicht genau sind und somit zu Problemen führen (beispielsweise ist Staub nicht wissenschaftlich definiert und somit auslegungsfähig).	Es müssen klare Spielregeln für Kontrollen geschaffen werden. Transparente Definitionen von beispielsweise Größe (z. B. bei Staub) müssen festgelegt werden. Das Gefahrenpotenzial von Abfällen muss wissenschaftlich eingeschätzt werden (beispielsweise sind Schrotte, egal welcher Metallart, mit einer Größe unter 1 mm in BW und BY per se gefährliche Abfälle).
17	Es bestehen Engpässe bei der Transportkapazität von Metallschrotten, die ein „A-Schild“ benötigen.	Die Entfernung der Pflicht das „A-Schild“ beim Transport von Metallschrotten zu nutzen, würde die Logistik vereinfachen und Transportkapazitätsengpässe verhindern.

Nr.	Angesprochenes Hemmnis	Vorgeschlagener Lösungsansatz
18	Das Wassergefährdungspotenzials von Metallpartikeln < 1 mm (ohne Berücksichtigung der Metallart) verhindert ein Recycling und ist nicht wissenschaftlich begründet.	Die Regulierung des Wassergefährdungspotenzials von Metallpartikeln < 1 mm muss geprüft werden (abhängig von der Metallart).
19	Das Recycling von Metallstäuben ist nicht wirtschaftlich darstellbar.	Verfahren zum Recycling von Staub müssen erforscht werden. Dies müsste über die EU-Ebene gefördert werden. Die hier entwickelten Verfahren müssten bei der Implementierung in die Praxis ebenfalls finanziell unterstützt werden.
Handel		

D.1.2 Messing und Zink

Tabelle 49: Messing: Hemmnis und Lösungsansatz

Nr.	Angesprochenes Hemmnis	Vorgeschlagener Lösungsansatz
Übergeordnet		
1	Kreislaufwirtschaft ist energieintensiv, damit aber nicht per se schlecht. Die positiven Effekte zur Schonung weiterer Ressourcen und der Bereitstellung von Sekundärmaterialien werden zu wenig herausgestellt. Es bedarf eines breiteren Konsenses, wenn Kreislaufwirtschaft gewollt ist.	Berücksichtigung positiver Beiträge des Recyclings in der zukünftigen Ausgestaltung des Emissionshandels.
2	Arbitrage aufgrund des Welthandels spielt eine große Rolle und erschwert die Lenkung von Stoffströmen in die ressourceneffizientesten Prozesse und Anlagen.	
3	Cu-Raffinadepreise sind werttreibend und bestimmen Verwertungspfad des Messings	
Produktion		
4	Europäische Stoffpolitik (z. B. REACH) ist stark geprägt von Gefährdungsprinzip mit der Folge, dass die Einbringung von Stoffen in Produkte untersagt	Prozess auf EU-Ebene zur besseren Harmonisierung der Stoff-, Produkt und Abfallrechtsbereiche intensivieren.

Nr.	Angesprochenes Hemmnis	Vorgeschlagener Lösungsansatz
	wird (z. B. Blei als Legierungselement zur Erreichung bestimmter technischer Eigenschaften wie Verspanbarkeit). Die Frage der tatsächlichen Gefährdung aufgrund von Exposition wird vernachlässigt. Neben wirtschaftlichen Einbußen werden damit die zukünftigen Recyclingpotenziale des Abfallstroms negativ beeinflusst.	
		Verarbeitung
5	Abfallrechtliche Einstufung emulsionsbehafteter Späne ist nicht allen Akteuren in der Verwertungskette eindeutig bewusst.	Klärung abfallrechtlicher Einstufung emulsionsbehafteter Späne und deutliche Kommunikation.
		Sammlung & Aufbereitung
6	Oberflächenbehandelte Materialien hemmen das Recycling, z. B. verchromtes Messing (Thermoskannen, Sanitärarmaturen, Fittings) kann nicht direkt umgeschmolzen werden.	
7	Verbundwerkstoffe hemmen das (zukünftige) Recycling: Beispiel Kunststoffrohre (Trinkwasserversorgung) mit eingepressten Metallfittings sind nur schwer zu trennen.	
8	Vergleichsweise hohe Transportkosten reduzieren den Anreiz aufwendig zu trennen (Abgabe von Kleinmengen unrentabel).	
		Handel

Tabelle 50: Zink: Hemmnis und Lösungsansatz

Nr.	Angesprochenes Hemmnis	Vorgeschlagener Lösungsansatz
		Übergeordnet
1	Die Datengrundlage bzgl. Produktionszahlen nach Anwendungsfeldern liegt vor,	

Nr.	Angesprochenes Hemmnis	Vorgeschlagener Lösungsansatz
	kann aber aus Datenschutzgründen nicht publiziert werden (zu wenige Betriebe in Deutschland).	
		Produktion
2	Europäische Stoffpolitik schafft Unsicherheiten und Kosten: Cadmiumfrachten im Abfallstrom lassen sich nur mit hohem Aufwand ausschleusen und sind ein Hemmnis für das Recycling.	
3	Recycling über das Wälzrohrverfahren (in Form von Wälzoxid) ist wichtig, es gibt keine alternativen Verfahren zur Rückgewinnung von Zink aus Stäuben.	
		Verarbeitung
		Sammlung und Aufbereitung
4	Die Sortierung von Altschrotten ist massengesteuert, d.h. manuelle Sortierung nach Einzelfractionen findet aus Kostengründen nicht statt. Verluste müssen daher in Kauf genommen werden.	
		Handel

D.1.3 Edelstahl

Tabelle 51: Edelstahl: Hemmnis und Lösungsansatz

Nr.	Angesprochenes Hemmnis	Vorgeschlagener Lösungsansatz
		Übergeordnet
1	Die Wahrnehmung der Akteure in der Sekundärrohstoffwirtschaft ist oft negativ (hoher Energieverbrauch, Lärm und Luftschadstoffe der Werke etc.). Die positiven ökonomischen und ökologischen Beiträge sind im	Imagekampagne starten, nicht nach innen in die Wirtschaft, sondern mit großer gesellschaftlicher Breitenwirkung.

Nr.	Angesprochenes Hemmnis	Vorgeschlagener Lösungsansatz
	Image der Kreislaufwirtschaft zu wenig verankert.	
2	Ein optimiertes Stoffstrommanagement erfordert Verwertungsbetriebe in Deutschland. Die Auslagerung von Recyclingprozessen – ob als Folge politischer Rahmenbedingungen oder ökonomischer Überlegungen – führt zur Verschlechterung des Recyclingkreislaufs.	Pioniere der Recyclingwirtschaft müssen politisch und gesellschaftlich gestärkt werden. Ideal wäre eine Form wirtschaftlicher Rückversicherung, um den „Mut zum Scheitern“ bei der Erprobung neuer Verfahren zu fördern.
3	Die Klimapolitik wird stark von der Logik des Emissionshandels geprägt. Für die Betriebe der Sekundärrohstoffwirtschaft, die dem Emissionshandel unterliegen, bedeutet dies in erster Linie Belastungen, ohne dass positive Beiträge zur Ressourcenschonung (Vermeidung ressourcenintensiver Primärprozessrouten) in der Betrachtungslogik Berücksichtigung finden.	Berücksichtigung positiver Beiträge des Recyclings in der zukünftigen Ausgestaltung des Emissionshandels.
4	Zunehmend strenge Compliance-Anforderungen hemmen Zusammenarbeit in der Branche.	
5	Europäische Stoffpolitik: Die Frage, welche Stoffe/Elemente aufgrund möglicher Gesundheitsgefährdung in Produkten nicht mehr eingesetzt werden dürfen, bewirkt unsicheres Umfeld für Planung und Investitionen.	Bessere Absprache und Außenkommunikation der politischen Fachressorts für Stoffpolitik, Produktpolitik und KrW-Politik bzgl. der jeweiligen Konsequenzen und Zusammenhänge.
Produktion		
6	Der Verlust bestimmter Legierungselemente muss produktionsbedingt in Kauf genommen werden. Technische Maximallösungen sind meist ökonomisch nicht darstellbar.	
7	Deutliches Potenzial bei der Metallrückgewinnung aus Schlacken, Aschen und Stäuben.	Stärkung der Forschung in diesem Bereich.

Nr.	Angesprochenes Hemmnis	Vorgeschlagener Lösungsansatz
8	<p>Bislang herrscht eine zu geringe Wahrnehmung.</p> <p>Klarheit bei der Einstufung von emulsionsbehafteten Späne und Emulsionen selbst: tropfende Späne sind abfallrechtlich kein gefährlicher Abfall. Emulsion aus Kühlschmierstoffkonzentrat ist oft nicht gefährlich.</p>	<p>Bessere Deklaration von Kühlschmierstoffen (z. B. biologisch abbaubar) sowie „Abtropfen“ der Späne am Anfallort durch entsprechende technische Maßnahmen.</p>
Verarbeitung		
9	<p>Möglichkeiten von Metall-3D-Druck (Stahldruck) entwickeln sich dynamisch, zukünftiges Recycling wird noch nicht bedacht.</p>	<p>Verstärkte F&E zum zukünftigen Recycling in diesem Bereich.</p>
Sammlung und Aufbereitung		
10	<p>Komplexe Consumer Good bzw. Metal Goods werden nicht ausreichend aufgeschlossen und korrekt detektiert. Es kommt zu Verlusten von Cr-Stahl über die Fe-Recyclingroute.</p>	
11	<p>Geringe Vergütung aufgrund von niedrigen Weltmarktpreisen hemmt die Anwendung technisch aufwendiger Detektionsverfahren.</p>	
Handel		
12	<p>Anforderungen steigen: Die Verfügbarkeit und damit Sortierung spezifischer Edelstahlschrotte wird zukünftig anspruchsvoller.</p>	
13	<p>Kommunikation zwischen Anwender (Stahlwerk) und Aufbereiter kann verbessert werden.</p>	<p>Politik kann/muss helfen.</p>

D.1.4 Zinn

Tabelle 52: Zinn: Hemmnis und Lösungsansatz

Nr.	Angesprochenes Hemmnis	Vorgeschlagener Lösungsansatz
Übergeordnet		
1	Allen beteiligten Stakeholdern entlang der Kette fehlt ein gemeinsames Ziel um das Recycling zu erreichen.	Ziele zur Erreichung des Recycling müssen definiert werden. Die (finanzielle) Verantwortung der beteiligten Akteure muss bestimmt werden (z. B. Produktverantwortung), um festzustellen wer an welcher Stelle einen Beitrag leisten muss (z. B. Bau und Unterhalt eines Zwischenlagers). Die Randbedingungen müssen eingestellt werden beispielsweise über finanzielle Förderung eines Zwischenlagerbaus.
Produktion		
2	Es bestehen Vorurteile bei Elektrotechnikproduzenten bezüglich des Einsatzes von Sekundärzinn, weil dies in der Vergangenheit Probleme verursacht hat, welche mit der heutigen Technik und der erzielten Reinheit des Sekundärzinns nicht mehr bestehen.	Es können Studien erstellt werden, die widerlegen, dass der Einsatz von Sekundärzinn problematisch ist. Ebenso können Demonstrationsvorhaben durchgeführt werden, welche die Vorurteile in der Praxis ausräumen. Eine weitere Möglichkeit ist einen führenden Hersteller von Elektrotechnik zu überzeugen Sekundärzinn einzusetzen, so dass andere darauf vertrauen können, dass dies keine Probleme verursacht.
3	Niedrige Umwelt- und Sozialstandards in den rohstoffproduzierenden Ländern sorgen dafür, dass der Preis auf Grund dieser niedrigen Standards niedrig bleibt (auf Kosten von Umwelt und Gesundheit der Bevölkerung vor Ort). Dies hat zur Folge, dass sich ein Recycling nicht immer rechnet, da der Preis des Sekundärmaterials über dem Preis des Primärmaterials liegt und somit kein Absatz des Produktes unter wirtschaftlichen Bedingungen möglich ist.	
4	Volatile Metallpreise führen dazu, dass Recycler schlecht für die Zukunft planen können und in Anlagen investieren, die sich nicht wirtschaftlich betreiben lassen, weil der Preis fällt und das Recycling zu einem Zuschussgeschäft wird. Eine	

Nr.	Angesprochenes Hemmnis	Vorgeschlagener Lösungsansatz
	Insolvenz auf Grund solcher Investitionen ist möglich.	
	Verarbeitung	
	Sammlung und Aufbereitung	
5	Eine schlechte Erfassung führt dazu, dass wertvoller E-Schrott nicht recycelt werden kann und das darin enthaltene Zinn verloren geht. Zudem wird die gesetzliche Quote nicht erfüllt was Vertragsstrafen zur Folge haben kann.	Eine Möglichkeit die Erfassung zu verbessern besteht darin, die Straßensammlung (analog zu Sperrmüll) zu verbieten, da hier Elektrogeräte von fremden Personen vor der Sammlung entfernt werden können und somit dem Recyclingkreislauf entzogen werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Sammlung über verschiedene Anreize zu optimieren. Hierbei spielt die Kommunikation mit dem Konsumenten eine entscheidende Rolle. Dieser muss informiert werden wie und wo er seine Elektrogerät am besten abgibt und diese Abgabe sollte einen möglichst geringen Aufwand haben, da ein hoher Aufwand dazu führt, dass Konsumenten die Elektrogeräte über den Restmüll entsorgen. Hierbei müssen auch Hersteller in die Pflicht genommen werden, welche für das Produkt verantwortlich sind und eigentlich die ordnungsgemäße Sammlung und Verwertung mitverantworten.
6	Bauteile werden immer ärmer an Metallen. Dies führt dazu, dass ein Recycling unattraktiv wird, da die im Schrott enthaltenen Metalle nicht die Kosten des Recyclings decken können.	Ein integratives (ganzheitliches) Recycling ist notwendig um alle Metalle rückzugewinnen zu können, da ein „Cherry-Picking“ (beispielsweise die Rückgewinnung der Goldfraktion) dazu führen kann, dass die Rückstände dieser Rückgewinnung deutlich schwerer recycelbar sind.
7	Zinn ist in Produkten immer mit anderen Metallen gekoppelt und stellt keine Hauptfraktion dar. Dies führt dazu, dass das Recycling von Zinn immer in Kopplung mit der Rückgewinnung von anderen Metallen (beispielsweise Gold) stattfindet und der Fokus darauf liegt.	
8	Die gezielte Separierung von Zinn aus Elektroschrott ist derzeit nicht wirtschaftlich darstellbar. Es existieren verschiedene, beispielsweise hydrometallurgische Verfahren, um Zinn direkt von der Leiterplatte zurückzugewinnen, diese sind aber zu teuer um die	Die Produktverantwortung muss gestärkt und die Hersteller müssen stärker in die Pflicht genommen werden, um das Recycling wirtschaftlich gestalten zu können und beispielsweise um über Sicherheitsleistungen für den Bau und Unterhalt ein Abfalllager bereitstellen zu können.

Nr.	Angesprochenes Hemmnis	Vorgeschlagener Lösungsansatz
	<p>Kosten über den Erlös des gewonnen Zinns zu decken.</p>	
9	<p>Es bestehen Hemmnisse bei der Genehmigung eines Lagers zur Speicherung von zinnhaltigen Abfällen (z. B. Schrotte oder Schlämme), da hier die Finanzierung gesichert sein muss um keine Altlasten entstehen zu lassen. Die Lagerung, beispielsweise in Form einer Monodeponie, würde dazu dienen, die Abfälle so lange zwischenzulagern bis eine Rückgewinnung des Metalls technisch und wirtschaftlich darstellbar ist (beispielsweise da der Preis des Metalls gestiegen ist oder die Rückgewinnung günstiger durchgeführt werden kann).</p>	
10	<p>Beim Export von E-Schrotten (deklariert als Gebrauchtgeräte) fehlen Kontrollen, welche einen illegalen Export wirkungsvoll unterbinden können. Dieser Schrott steht dem Recyclingkreislauf in Deutschland nicht mehr zur Verfügung.</p>	
11	<p>Für den Transport von gefährlichen Abfällen als Stückgut (beispielsweise E-Schrott in Gitterboxen) gibt es Kapazitätsengpässe, da sich die Logistikbranche hierfür nicht ausreichend zertifizieren lässt. Der erhöhte Zertifizierungsaufwand für die Logistikunternehmen kann nicht über höhere Transportpreise gedeckt werden, da die Margen im Recycling zu gering sind.</p>	
12	<p>Die Bürokratie auf verschiedenen Ebenen (Europa, Deutschland, Bundesländer, Regierungsbezirke) ist teilweise sehr inhomogen und abhängig von den zuständigen Personen. Dies kann zu langen</p>	

Nr.	Angesprochenes Hemmnis	Vorgeschlagener Lösungsansatz
	<p>Bearbeitungszeiten führen, einen ungewissen Ausgang von Genehmigungsverfahren zur Folge haben oder den freien Transport von Schrotten über nationale Grenzen hinweg behindern.</p>	
13	<p>Für Lagermetall bei dessen Bearbeitung Späne entstehen, können stoffpolitische Entscheidungen (beispielsweise das Verbot von Blei) dazu führen, dass ein Recycling erschwert wird. Es kann ein Zielkonflikt vorhanden sein: Ausschleusung von Schadstoffen vs. Recycling.</p>	<p>Ein Dialog zwischen Recyclern und Stoffpolitikern muss initiiert werden, um den Stoffpolitikern einen Praxiseinblick zu geben und darzustellen, was bestimmte Entscheidungen (z. B. Stoffverbote) im Recyclingkreislauf für Folgen haben können.</p>

E Anhang

Dokumentation 2. Dialogforum zu Basis- und Sondermetallen im Projekt KartAL III (04./05.12.2018 Hüttenmagazin Duisburg)

E.1: Hintergrund der vorliegenden Dokumentation

E.2: Faktenchecks der behandelten Metallsysteme

E.3: Stoffstromprognostik

E.4: Lösungsräume für ein optimiertes Stoffstrommanagement

E.1 Hintergrund der vorliegenden Dokumentation

Im Rahmen des Projektes „Kartierung des anthropogenen Lagers III“ wurde ein zweitägiges Dialogforum im Landschaftspark Duisburg-Nord durchgeführt. Das Ziel der Veranstaltung bestand darin, den aktuellen Arbeitsstand im Projekt vorzustellen und die Hinweise der Teilnehmenden zur weiteren Be- und Überarbeitung einzuholen. Weiterhin soll mit dem Format ein offener Dialog zwischen Wirtschaft, Verbänden und Umweltbundesamt zur Kreislaufführung von Metallen befördert werden.

An beiden Tagen des Dialogforums wurden folgende inhaltliche Tagesordnungspunkte behandelt, an denen sich die vorliegende Auswertung orientiert:

- ▶ Faktenchecks der im Projekt behandelten Metallsysteme
- ▶ Stoffstrommodellierung der Metallsysteme im Anthropogenen Lager
- ▶ Hemmnisse und Lösungsansätze für ein verbessertes Stoffstrommanagement

Die Dokumentation gibt die als Einzelmeinungen geäußerten Aspekte und die daraus resultierenden Diskussionsstränge in den Dialogforen wieder. Die Dokumentation ist nicht chronologisch und erhebt keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit.

E.2 Faktenchecks der behandelten Metallsysteme

Der Entwurf aller Faktenchecks wurde vorab allen Teilnehmenden zugesandt. In der Veranstaltung wurde jeder Faktencheck vorgestellt und diskutiert. Die vorliegende Dokumentation fokussiert auf übergreifende Hinweise zur textlichen und grafischen Darstellungsform und sowie zu ergänzende Erläuterungen. Diese Änderungsvorschläge betreffen alle Faktenchecks gleichermaßen. Metall-spezifische Hinweise z. B. zum jährlichen Mengenaufkommen oder Stand der Technik werden hier nicht gesondert aufgelistet. Die dazu eingesammelten Hinweise der Teilnehmenden oder Kommentare per E-Mail bzw. durch persönliche Gespräche werden direkt im Faktencheck geändert und mit den Hinweisgebern abgestimmt.

E.2.1 Konzept Anthropogenes Lager erläutern

Angeregt wird, das Konzept des Anthropogenen Lagers im Faktencheck kurz vorzustellen und die damit verbundenen Bilanzgrenzen darzustellen. Das betrifft insbesondere die Nicht-Berücksichtigung von Produktionsabfällen (Neuschrotte) und kurzlebigen Konsumgütern mit Verweildauern kleiner 1 Jahr, da deren Lagergröße kaum Änderungen erfährt.

Weiterhin sollte auf Anwendungen und Prozesse hingewiesen werden, die zu dissipativen Verlusten führen. Exemplarisch das Beispiel von Zink in Autoreifen: Zink wird in nicht-metallischer Form als chemische Verbindung in der Reifenherstellung eingesetzt. Es kommt aufgrund von Reifenabrieb zu dissipativen Verlusten, zudem werden die chemischen Zinkverbindungen aufgrund geringer Anteile nicht rückgewonnen. Ebenfalls qualitativ dargestellt werden sollten weitere chemische Verwertungswege, z. B. die Verwendung von Zinkoxid in der chemischen Industrie z. B. für Pflegeprodukte oder zur Reifenproduktion.

Es sollte auf den doppelten Nutzen von Metallrecycling hingewiesen werden: sichert die Rohstoffversorgung und spart den Einsatz von Primärrohstoffen. Daher versuchen Betreiber von Schmelzwerken zunächst immer, möglichst viel Inputmaterial über Schrotte abzudecken.

E.2.2 Zeitliche Veränderung aufgrund technischer Veränderung berücksichtigen

Es wurde darauf hingewiesen, dass die Faktenchecks immer nur eine Momentaufnahme in Anwendung und Verwertung des Metallsystems darstellen. Darauf sollte hingewiesen werden. Durch aktuelle Trends wie Digitalisierung und Elektromobilität verändern sich Einsatzbereiche und damit verwendete Metalle und Legierungen zurzeit gravierend. Damit wird sich auch die Zusammensetzung des Materialrückflusses in der Zukunft deutlich verändern.

Wo möglich, sollten die Faktenchecks aktuelle Trends einer veränderten Metallnachfrage qualitativ beschreiben (insb. Elektromobilität).

E.2.3 Hinweis zu Statistiken bzgl. Produzentenländer vs. Handelsländer

Die aktuelle Darstellungsform der Handelsflüsse lässt keine Differenzierung in Produzenten- oder Handelsländer zu. Insbesondere bei hohen Mengenflüssen aus wenigen Ländern sollte ein differenzierender Hinweis für ein besseres Verständnis mit aufgenommen werden. Diese Ergänzungen sind insbesondere in der Diskussion um Rohstoffabhängigkeiten von Bedeutung. Es sollte vermieden werden, dass aufgrund der Darstellung der Handelsflüsse falsche Rückschlüsse seitens der Leser / Nutzer gezogen werden (z. B. fälschlicherweise Interpretation hoher Rohstoffabhängigkeit, wenn Metall über Handelsland Niederlande in großem Umfang importiert wird).

E.2.4 Unterschiedliche Schrottqualitäten

Für die Effizienz des Recyclings ist die Qualität des aufbereiteten und sortierten Schrottes entscheidend. Daher macht es Sinn, für eine Optimierung des Stoffstrommanagements, am Beginn der Verwertungskette anzusetzen, um eine möglichst sortenreine Erfassung anzustreben. Der gesamte Bereich „Qualitäten von Schrotten“ ist bislang zu wenig in den Faktenchecks thematisiert. Es kann der Eindruck gewonnen werden, Schrott ist gleich Schrott.

Hier sollte metallspezifisch differenziert werden und mit Fokus auf schwierige EoL Schrotte ein Eindruck für die unterschiedliche Schrottqualitäten gegeben werden.

E.2.5 Grafische Darstellung Verwertungswege

Es wurden metallsystemübergreifend Vorschläge zur Optimierung der grafischen Darstellung der Verwertungswege gemacht. Diese betreffen drei Aspekte:

- ▶ Zusammenfassen der möglichen Aufbereitungsaggregate (Groß- & Kleinschredder, Scheren, Brecher, händische Sortierung, Presse etc.) und vereinfachte grafische Darstellung. Bei der vereinfachten Darstellung des Verwertungssystems sollte also auf einen allgemeinen Begriff zurückgegriffen werden, wie beispielsweise „Vorbehandlung“.
- ▶ Die Transition „Deponie“ als möglicher Verbleib neben Export und Sekundärschmelze ist nicht treffend. Der Weg sollte allgemeiner „Sonstige Verwertung“ genannt werden. Hierunter fällt dann z. B. auch Müllverbrennung (MVA) sowie Bergversatz.
- ▶ Der Begriff „Sekundärschmelze“ ist für den Edelstahlkreislauf unüblich, Schrotte gehen direkt in den Primärprozess ein. Das sollte entsprechend begrifflich berücksichtigt werden, z. B. durch „Metallschmelze“.
- ▶ Bedeutung von Metallhändlern herausstellen: es sollte eine bessere Verortung und Darstellung von Metallhändlern als Akteur gesucht werden. Faktisch ist jeder Recyclingbetrieb auch Händler und umgekehrt, jeder Händler ist in bestimmter Form auch Aufbereiter. Das heißt, an praktisch allen Stellen des Systems treten Metallhändler in Aktion.

E.3 Stoffstromprognostik

Da die Berechnungen zur Stoffstromprognostik noch nicht abgeschlossen sind, konnten beim Dialogforum nur Teilergebnisse präsentiert werden. Folgende Hinweise zu den präsentierten Berechnungen wurden gegeben:

- ▶ Sektordefinition: Begriff „technische Gebäudeausstattung“ ist besser verständlich als „technische Infrastruktur“. Der Begriff „massiv“ ist stoffpolitisch besetzt für Materialien mit einer Stärke ab 1mm. Als Alternative den Begriff „homogen“ verwenden.
- ▶ Sektor Fahrzeuge: Binnenschiffe und Gebrauchtteilemarkt (Wiederverwendung) mitberücksichtigen, zumindest in der schematischen Darstellung.
- ▶ Die grafische Darstellung darüber, welche rechnerische Materialmenge Sekundärhütten in Deutschland zugeführt werden kann, sollte die aktuellen Kapazitäten der jeweiligen Metallschmelzen in Deutschland gegenübergestellt werden. In der Praxis ist der Export von sortiertem Schrott hoch, weil in Deutschland zum Teil keine entsprechenden Kapazitäten (mehr) vorhanden sind. Dennoch ist die Ausweisung / Darstellung theoretischer Sekundärmengen hilfreich, um aufzuzeigen, dass durch das anthropogene Lager in

Deutschland ein hohes Potenzial freiwerdender Mengen vorhanden ist, das aufgrund der Rahmenbedingungen in Deutschland nicht vollumfänglich genutzt werden kann.

- ▶ In oben genanntem Zusammenhang steht auch der Vorschlag, die Mengen nach Deutschland importierter Schrotte in der Ergebnisdarstellung qualitativ zu berücksichtigen. Aufgrund unterschiedlicher Schrottqualitäten werden in der Realität erhebliche Schrottmengen exportiert, während Sekundärschmelzen in Deutschland ihren Input über Schrottimporte decken.
- ▶ Falls im Abschlussbericht Sankey-Diagramme zur Verdeutlichung von Stoffflüssen verwendet werden, sollte auf missverständliche Farbgebung (wie rote Pfeile für Exporte) verzichtet werden.

E.4 Lösungsräume für ein optimiertes Stoffstrommanagement

E.4.1 Schnittstelle Abfallrecht und Chemikalienrecht

Die Diskussion um Hemmnisse und Lösungsansätze wurde eingeleitet durch eine Präsentation von Rechtsanwalt Dr. Simon Meyer zur Abgrenzung der Rechtsbereiche Abfallrecht (Kreislaufwirtschaftsgesetz etc.) und Chemikalienrecht (REACH²³ Verordnung und CLP²⁴ Verordnung). Auf Basis der anschließenden Diskussion, lassen sich folgende zentralen Probleme ableiten, die aus Sicht der Praxisakteure, die Zukunftsfähigkeit des Metallrecyclings in Deutschland einschränken.

Als weniger problematisch werden die aktuell gültigen Regelungen des Abfallrechts angesehen (Einstufung und Umgang mit gefährlichen und nicht-gefährlichen Abfällen, Einstufung als Nebenprodukt etc.). Deutlich kritischer werden dagegen die Regelungen des Chemikalienrechts und die aktuellen Entwicklungen in diesem Bereich gesehen. Wird aus Abfall ein Produkt (z. B. Sekundärrohstoff, der zur Herstellung neuer Erzeugnisse eingesetzt wird), gelten die Regelungen von CLP und REACH und damit auch eine Bewertung, des vom Stoff ausgehenden Risikos zur Schädigung menschlicher Gesundheit oder der Umwelt.

- ▶ Unter REACH erfolgt eine Stoffsicherheitsbewertung, für die Daten erhoben und bewertet werden. In diesem Zusammenhang werden sowohl Daten dokumentiert, die zur Einstufung und Kennzeichnung nach CLP genutzt werden, als auch (unter REACH) die gesundheits- und umweltbezogenen Grenzwerte ermittelt. Die Bewertung des Risikos für Gesundheit und Umwelt eines Stoffs ergibt sich sowohl aus dem stoffinhärenten Gefährdungspotenzial und sowie der stoffbezogenen Exposition. Die stoffbezogene Exposition wird über quantitative Untersuchungen der Dosis-(Konzentrations-) Wirkungs-Beziehungen ermittelt.

23 Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Agentur für chemische Stoffe, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission, ABl. L 396 vom 30.12.2006, S. 1

24 Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006, ABl. L 353 vom 31.12.2008, S. 1,

Grundsätzlich sollen dabei alle relevanten Expositionspfade berücksichtigt werden (z. B. Gefahr durch Hautkontakt, Gefahr durch Inhalation etc.) Stoff- und Verwendungsabhängig kann entschieden werden, bestimmte Expositionswege mit Begründung von der Stoffsicherheitsbewertung auszunehmen. Praxisakteure schildern, dass für die Bewertung von Metallen, der Expositionspfad „Inhalation von Stäuben“ für die Bewertung zugrunde gelegt wird. Da Metalle häufig in Legierungsform verwendet werden und dabei eine feste chemische Stoffverbindung vorliegt, führe die Gefährdungsbewertung über die Inhalation von Stäuben zu einer unrealistischen Bewertung, die Stoffe in Metallverbindungen benachteilige.

- ▶ Aus Sicht einiger Praxisakteure haben die Expertengremien, die für die Stoffbewertung zuständig sind, nur „ihren Rechtsbereich“ im Blick und seien nicht oder zu wenig aufgeschlossen für einen Diskurs mit den betroffenen Praxisakteuren. Bei dieser Aussage ist zu beachten, dass im Rahmen der Stoffbewertung ein öffentliches Konsultationsverfahren durchzuführen ist, in dem interessierte Akteure wie Verbände, Unternehmen oder auch Einzelpersonen Gelegenheit haben, belastende sowie entlastende Erkenntnisse zum Stoff mitzuteilen²⁵. Es wäre demnach zu prüfen, in welchem Umfang sich die betroffene Recyclingwirtschaft in bisherige Zulassungsprozesse eingebracht hat und welche Rückmeldungen zu den Einlassungen gegeben wurden.
- ▶ Aus Sicht einiger Praxisakteure erfolge die Ableitung von Grenzwerten für zulässige (Rest) Konzentrationen in Anwendungen nicht ausreichend nach wissenschaftlichen Methoden, sondern häufig willkürlich und wenig transparent.
- ▶ REACH sieht vor, dass bei einem wissenschaftlich begründeten Verdacht auf bestimmte stoffstrombezogene Risiken, jeder EU-Mitgliedsstaat einen Stoff zur Aufnahme in die SVHC Kandidatenliste vorschlagen kann (engl. Substance of Very High Concern, SVHC). Dadurch ergeben sich noch keine Anwendungsbeschränkungen, aber Kommunikationspflichten nach REACH Art. 33. Anwendungsverbote folgen, sobald der Stoff in die Liste der zulassungspflichtigen Stoffe aufgenommen wird (REACH Annex XIV) und das dort angegebene Datum (sunset date) abgelaufen ist. Hierbei wird unterschieden, ob für ein Stoff ein Anwendungsverbot ohne Ausnahmeregelung ausgesprochen wird oder ob ein verwendungsspezifisches „Verbot mit Erlaubnisvorbehalt“ erfolgt. Bei letzterem kann durch die Stoffverantwortlichen (Hersteller) ein Zulassungsantrag (Ausnahmeregelung) gestellt werden, wenn vor der Inverkehrgabe oder Verwendung nachweisen wird, dass die Risiken aufgrund der Stoffanwendung angemessen beherrscht werden oder dass der sozioökonomische Nutzen die Risiken überwiegt. Eine Gestattung des Zulassungsantrags wird allerdings zeitlich befristet ausgestellt. Darin sehen die Praxisakteure ein erhebliches unternehmerisches Risiko, da befürchtet wird, dass für Investitionen keine Rechtssicherheit bestehe und stets befürchtet werden muss, dass die Zulassungsgenehmigung wieder entzogen wird.

²⁵ Art. 59 Abs. 4, Art. 58 Abs. 4 REACH. Zum Begriff der „interessierten Kreise“ <http://echa.europa.eu/de/about-us/partners-and-networks/stakeholders> (6.2.2014).

- ▶ Kommt aufgrund von wissenschaftlichen Belegen der Verdacht auf bestimmte stoffstrombezogene Risiken auf, kann jeder EU-Mitgliedsstaat den betreffenden Stoff zur Aufnahme in die SVHC Kandidatenliste vorschlagen. Aus Sicht einiger Praxisakteure wird die Regelung dazu missbraucht, um wirtschaftspolitische Interessen einzelner EU-Mitgliedsländer durchzusetzen. So wird die Vermutung ausgedrückt, dass Vorschläge zur Aufnahme bestimmter Stoffe als SVHC insbesondere von den europäischen Ländern gemacht werden, deren Wirtschaftsunternehmen diese Stoffe nicht verarbeiten und daher von einem möglichen Verbot nicht betroffen wären.
- ▶ Als aktuelle Beispiele wurde die Diskussion zur möglichen Einstufung von Titandioxid und Kobalt im Rahmen von CLP erwähnt.
 - Titandioxid ist ein anorganischer, kristalliner, weißer Feststoff, der vor allem als Pigment in Lacken, Farben und Kunststoffen verwendet wird. Zur möglichen Einstufung von Titandioxid gibt es zwei Vorschläge: Kategorie 1B – wahrscheinlich krebserzeugend und Kategorie 2 – Stoff mit Verdacht auf krebserzeugende Wirkung. Eine Entscheidung wird von REACH-Regelungsausschuss erwartet. Im Fall einer Einstufung in Kategorie 2 müssten Produkte mit einem TiO₂ Gehalt von über ein Prozent als gefährlicher Abfall eingestuft werden.
 - Kobalt ist Legierungsbestandteil von allen Edelstählen. Hier lautet der Vorschlag eines EU-Mitgliedsstaats die Absenkung des Grenzwerts von 0,1 auf 0,01 Prozent vor, Sollte sich dieser Vorschlag durchsetzen, sehen die beteiligten Praktiker darin große Hemmnisse für das zukünftige Metallrecycling.
- ▶ Ein Ansatz zur Überwindung der zusammengefassten Hemmnisse wird in erster Linie durch einen besseren Dialog zwischen den zuständigen Behörden, Gremien und Praxisakteuren gesehen. Dem Umweltbundesamt kommt dabei eine Vermittlerrolle zu, da dieses nur für die Umweltbewertung zuständig ist. Zentraler Ansprechpartner ist die BAuA mit der dort angesiedelten, koordinierenden Bundesstelle für Chemikalien (BfC).

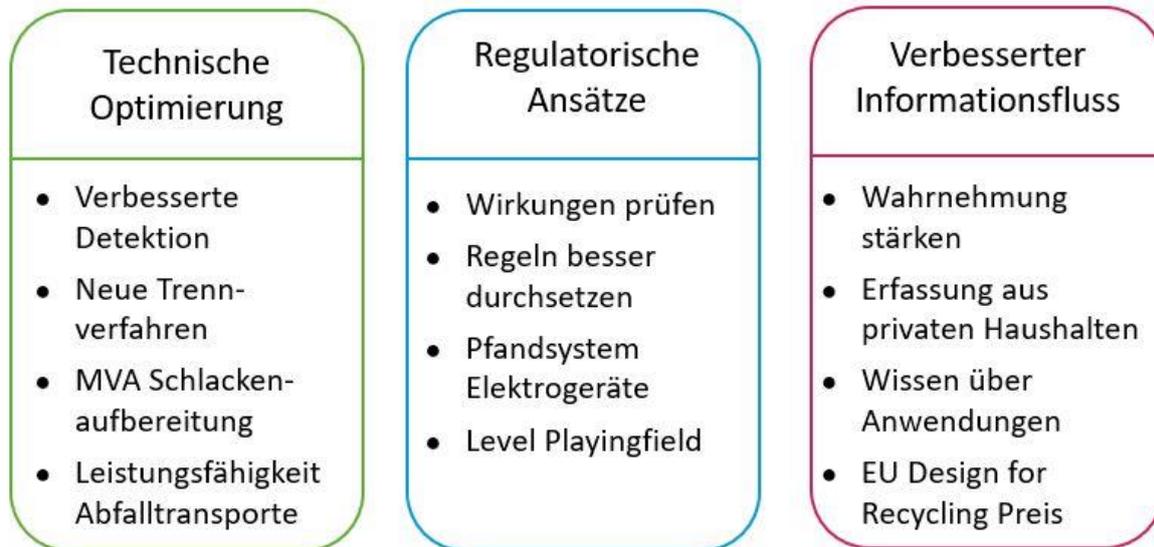
E.4.2 Auswertung der vorgeschlagenen Lösungsraume und die Bewertung der Teilnehmenden

Die Hinweise und Anregungen aus dem ersten Dialogforum und bilateraler Konsultationen wurden hinsichtlich möglicher Lösungsansätze aufgegriffen und in den folgenden drei Themenbereichen „Technische Optimierung“, „Regulatorische Ansätze“ und „Verbesserter Informationsfluss“ zusammengefasst. Die darin jeweils enthaltenen Lösungsansätze wurden vom Öko-Institut vorgestellt und erläutert (siehe Anlagen). Anschließend wurden die Teilnehmenden des Dialogforums gebeten, ein Stimmungsbild hinsichtlich der Relevanz (für ein optimiertes Stoffstrommanagement) mittels Klebepunkten abzugeben. Wie aus der folgenden Fotodokumentation hervor geht, gab es Lösungsansätze, die mehrheitlich als relevant oder kaum relevant eingeschätzt wurden. Gleichzeitig gab es Lösungsansätze, die sehr unterschiedlich bzgl. ihrer Relevanz eingeschätzt wurden. Dabei sind Unterschiede zwischen den beiden Workshoptagen zu erkennen; allerdings müssen hierbei die unterschiedlichen

Teilnehmerzahlen und die in unterschiedlicher Tiefe diskutierten Metallsysteme (Tag 1: Al, Mg, Zn, Messing; Tag 2: Edelstahl, Sn) berücksichtigt werden.

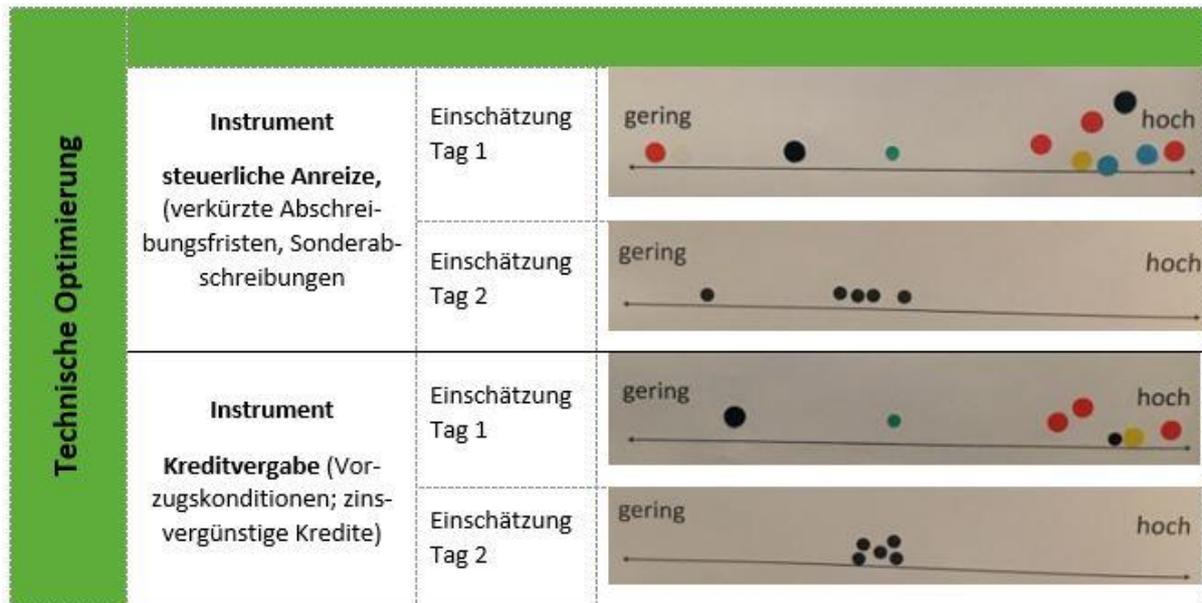
Das Projektteam wird das abgegebene Stimmungsbild in der weiteren Bearbeitung des Vorhabens angemessen berücksichtigen

Abbildung 87: Hemmnisfelder und Lösungsansätze zur Verbesserung des Recyclings



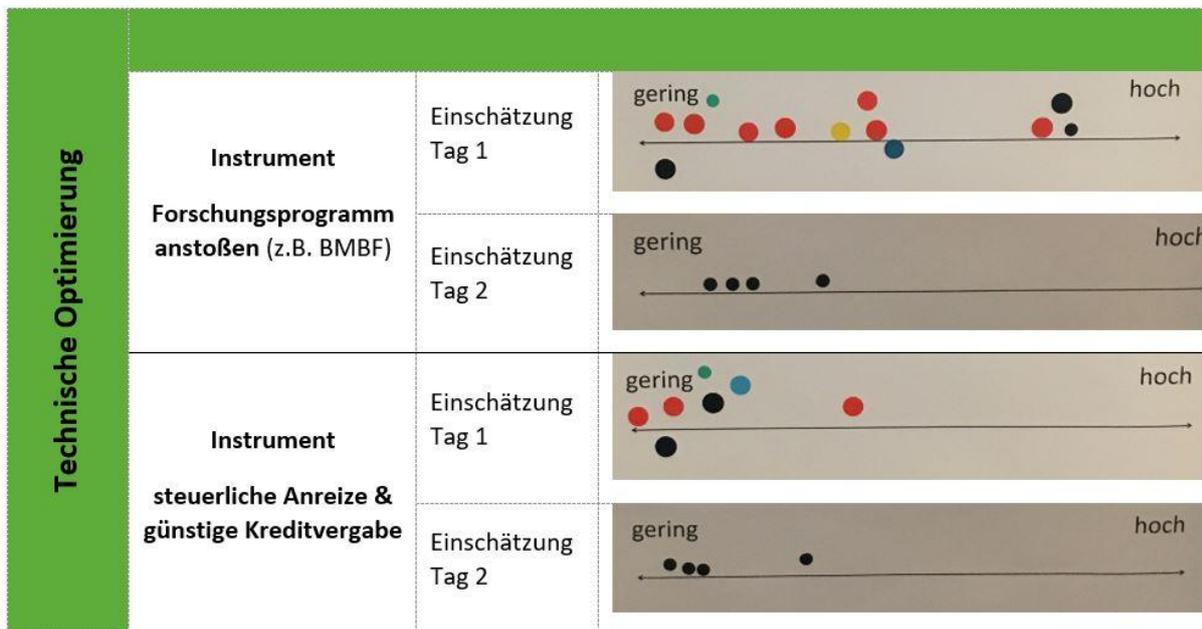
Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 88: Ansatzpunkt 1: Verbesserte Detektion: Förderung neuer Sortiertechnologien wie XRT, XRF, LIBS



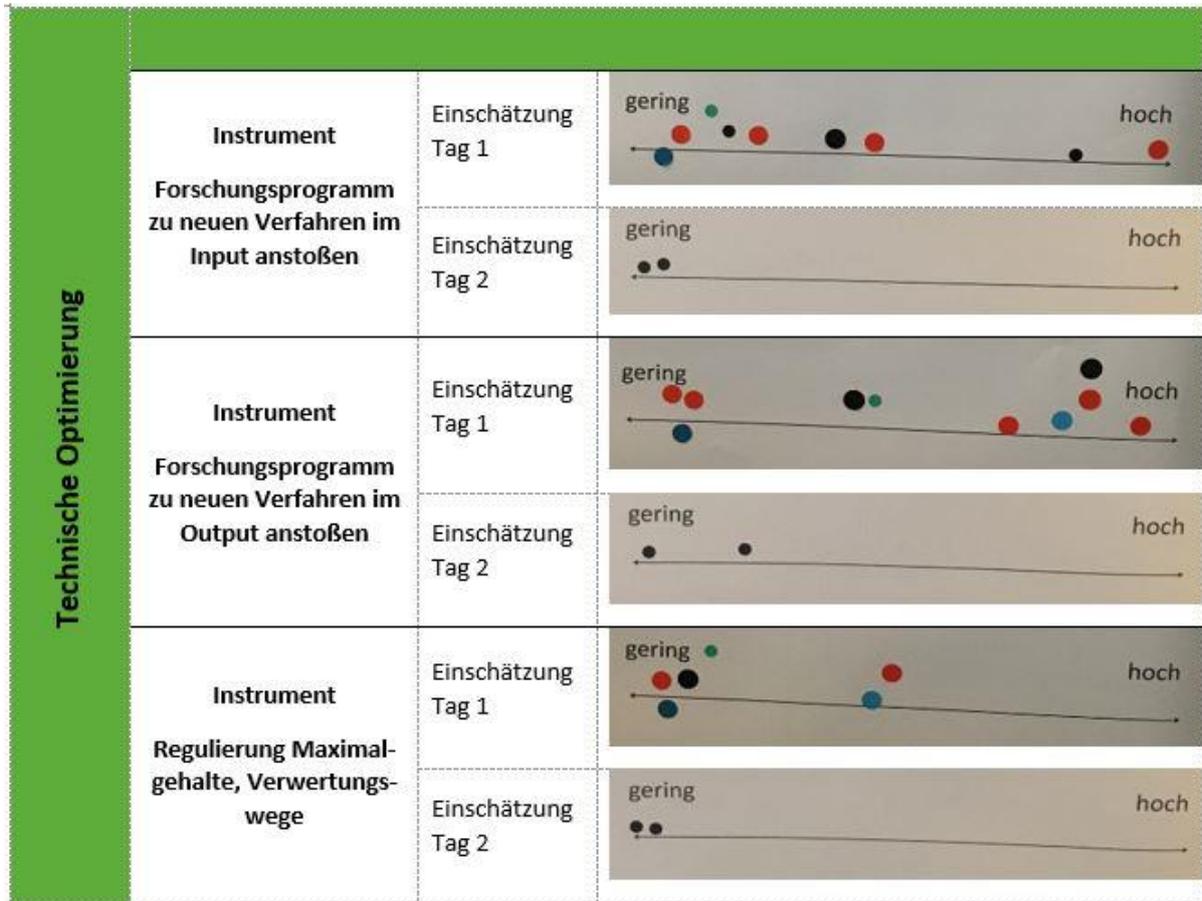
Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 89: Ansatzpunkt 2: Entwicklung neuer Verfahren zur Entfernung von Beschichtungen



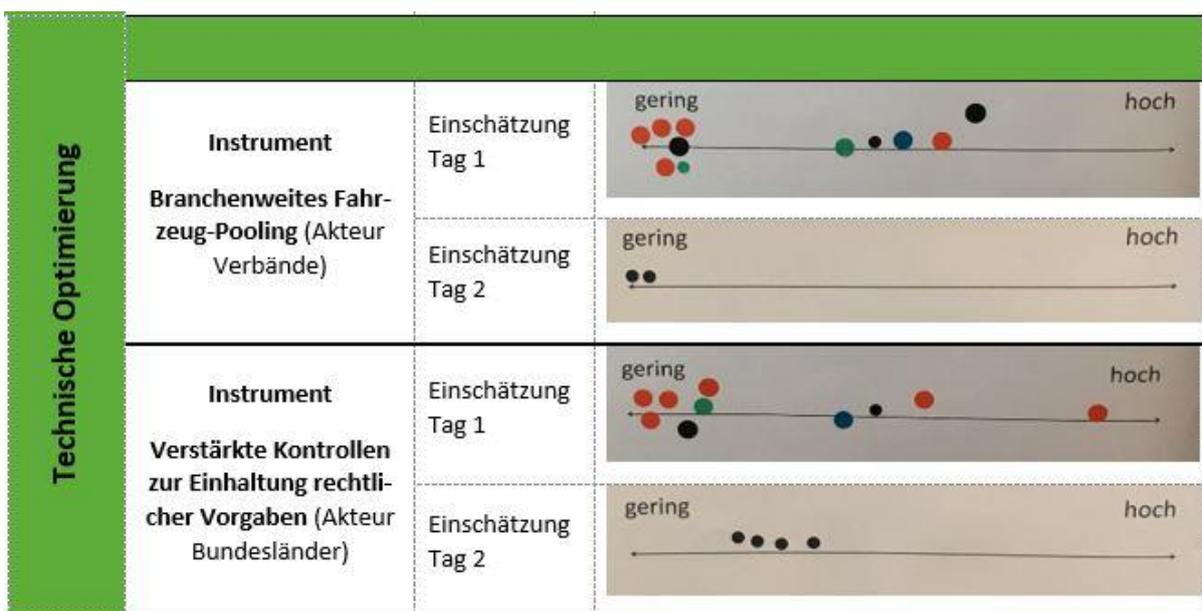
Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 90: Ansatzpunkt 3: MVA Schlackenaufbereitung: Neue Verfahren für Input und Output & Vorgaben (Maximalgehalte, Verwertungsoptionen)



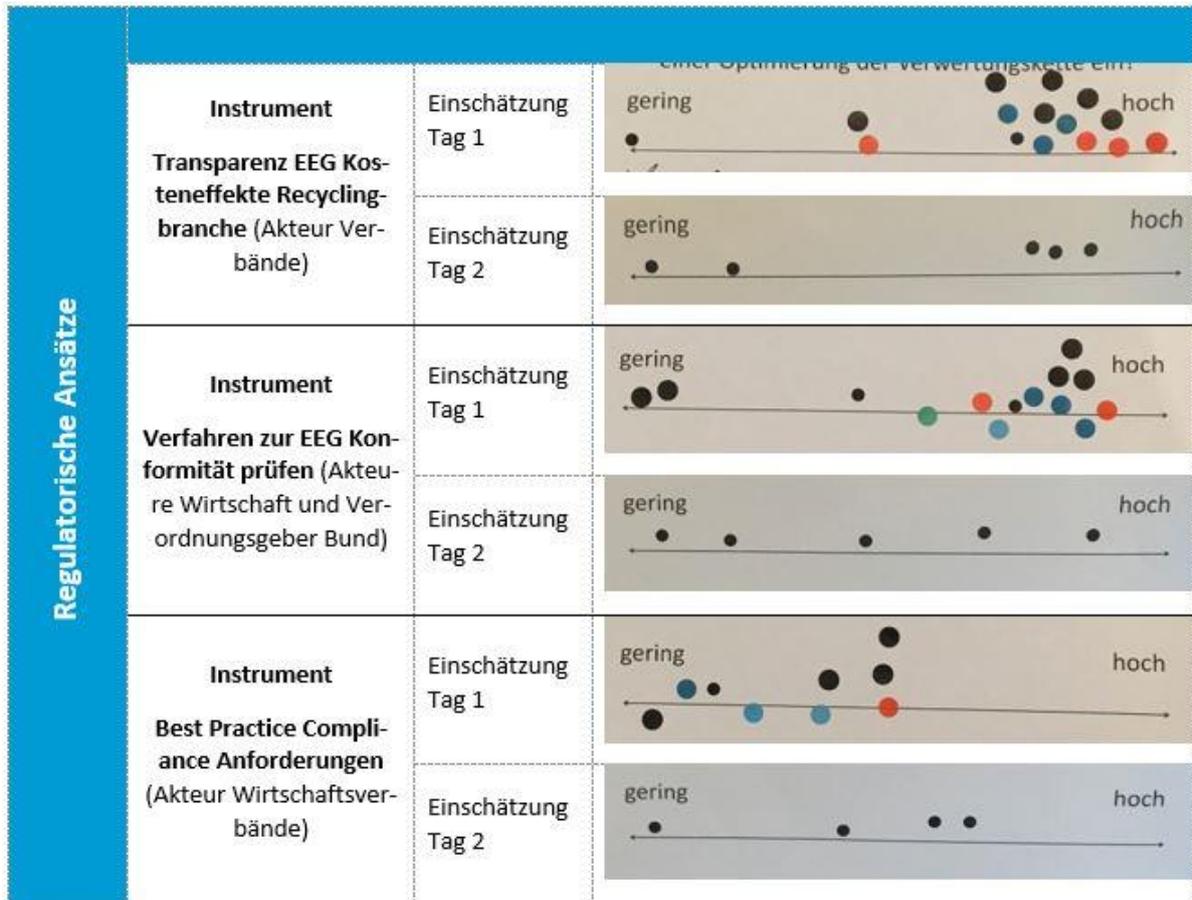
Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 91: Ansatzpunkt 4: Nutzung und Leistungsfähigkeit Abfalltransporte (für Produktionsabfälle) steigern



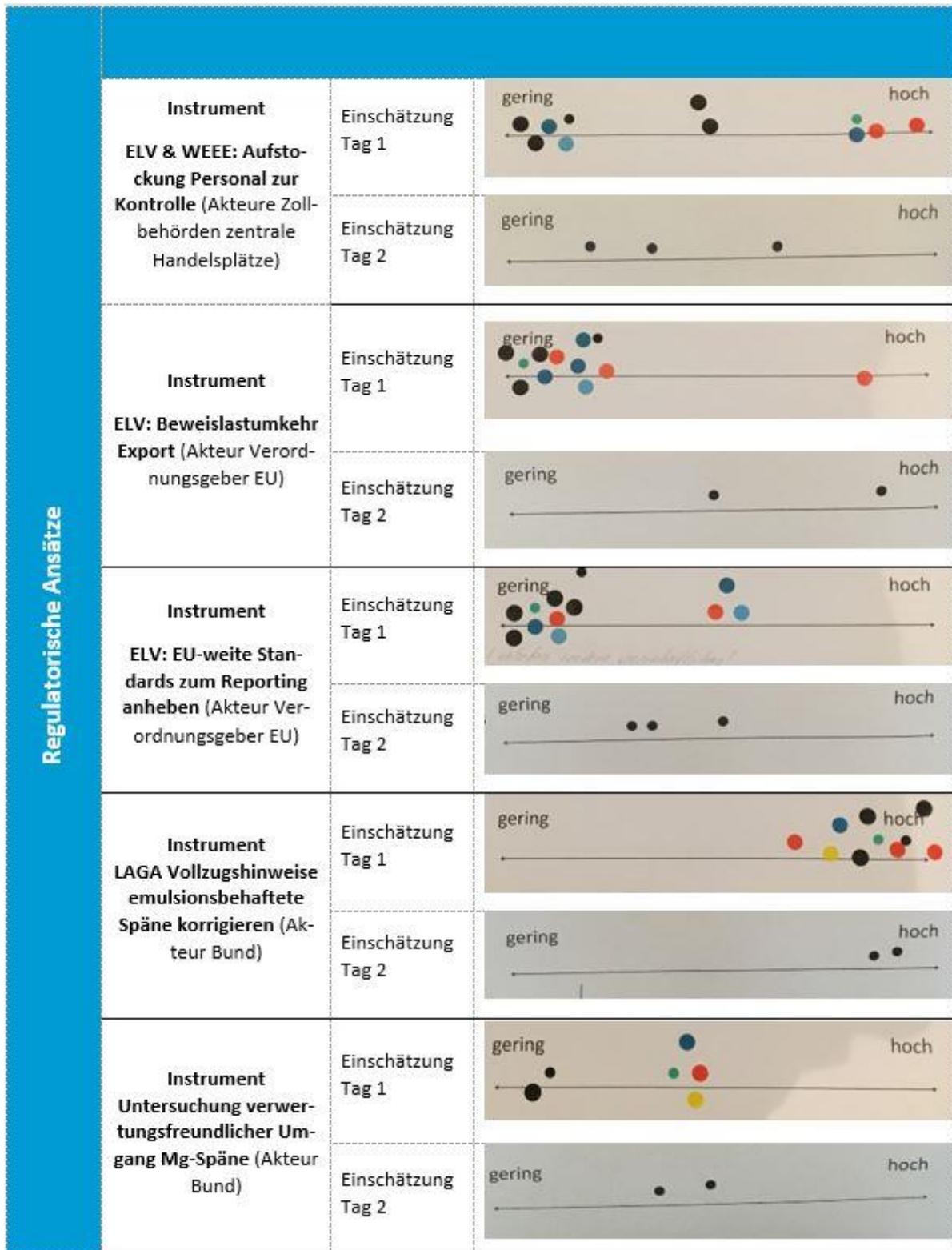
Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e.V.

Abbildung 92: Ansatzpunkt 1: Wirkung bestehender Regelungen prüfen



Quelle: eigene Darstellung Öko-Institut e. V.

Abbildung 93: Ansatzpunkt 2: Bestehende Regelungen besser durchsetzen



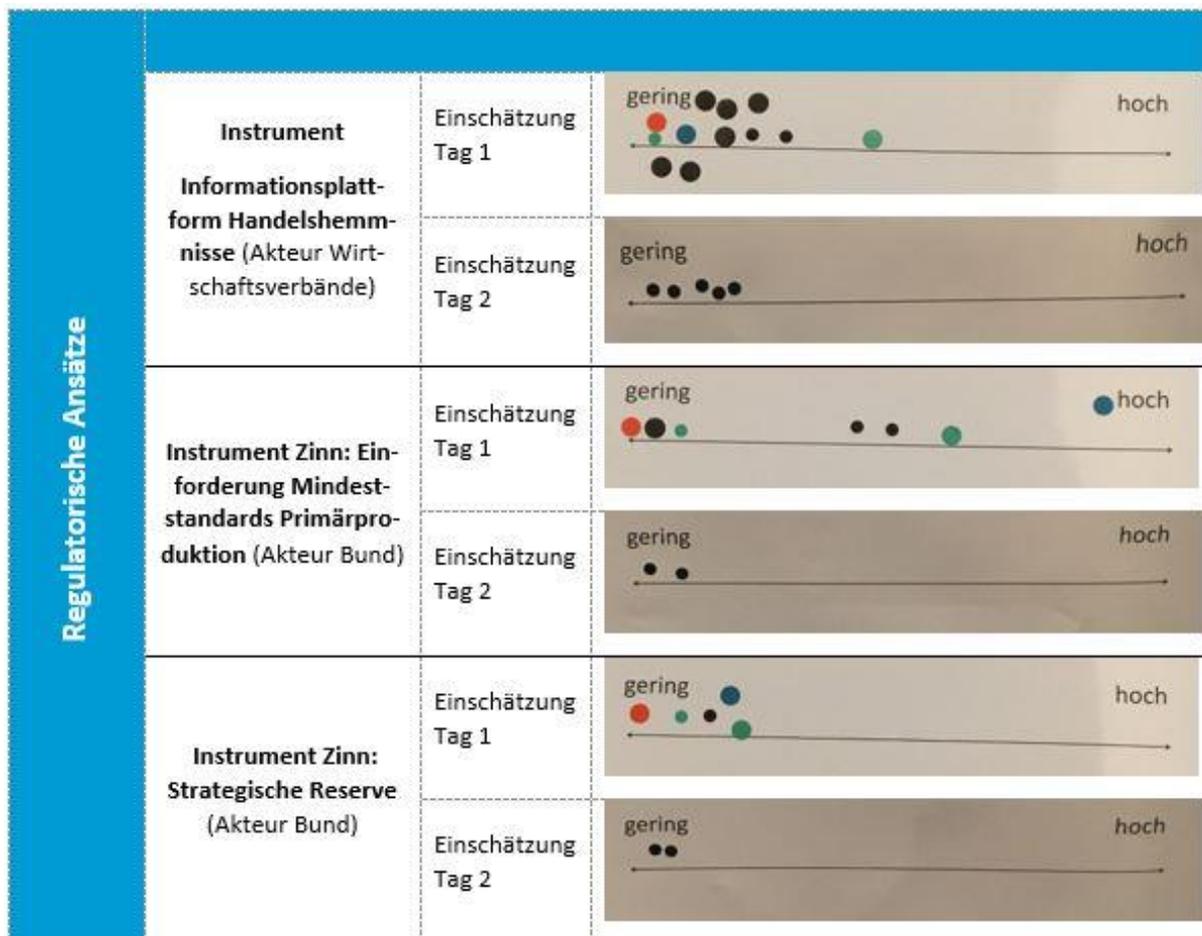
Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e. V.

Abbildung 94: Ansatzpunkt 3: Pfandsystem Elektrogeräte



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e. V.

Abbildung 95: Ansatzpunkt 4: Level Playingfield



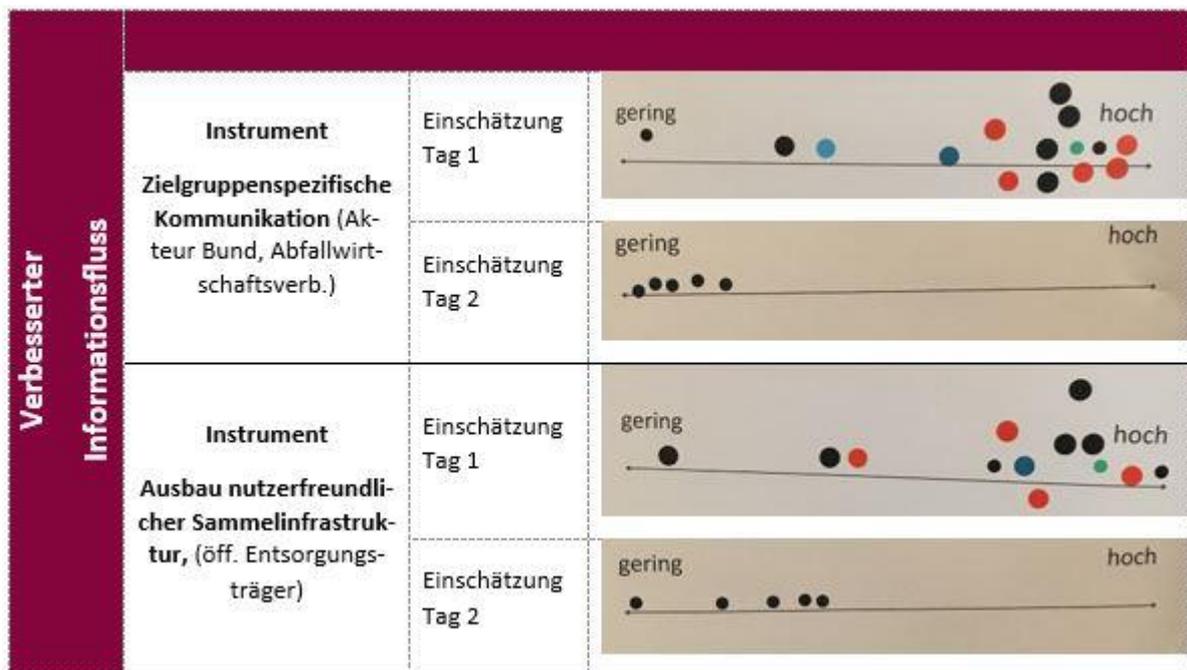
Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e. V.

Abbildung 96: Ansatzpunkt 1: Öffentliche Wahrnehmung stärken



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e. V.

Abbildung 97: Ansatzpunkt 2: Erfassung aus privaten Haushalten steigern



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e. V.

Abbildung 98: Ansatzpunkt 3: Wissen um Anwendungsbereiche ausbauen



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e. V.

Abbildung 99: Ansatzpunkt 4: EU Design für Recycling Preis



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut e. V.

F Anhang

Dokumentation KartAL III Abschluss Symposium – 2. Juli 2019

Abschluss Symposium zum Refoplan-Vorhaben

„KartAL III – Kartierung des Anthropogenen Lagers III –

Etablierung eines Stoffstrommanagements unter Integration von Wertungsketten zur qualitativen und quantitativen Steigerung des Recyclings von Metallen und mineralischen Baustoffen“

(FKZ 3716353230)

Datum: 2. Juli 2019 von 10 bis 16 Uhr

Ort: Kalkscheune Berlin, Johannisstr. 2, 10117 Berlin

F.1 Begrüßung und Einführung KartAL III Projekt

Herr Bleher vom Öko-Institut erläuterte als Projektleiter die spezifischen Forschungsfragen und Arbeitsschwerpunkte des Vorhabens und stellte den Tagesablauf vor.

Mit dem Forschungsvorhaben soll das Wissen über das Anthropogene Lager in Deutschland gesteigert werden. Unter dem Konzept des Anthropogenen Lagers wird der in langlebigen Gütern und Produkten gebundene Materialbestand sowie die damit verbundenen aktuellen und zukünftigen Veränderungen verstanden. Die aus dem Anthropogenen Lager frei gesetzten Materialien (durch Abriss oder Rückführung Abfallerfassungssysteme) bilden eine wichtige Quelle zur Sekundärrohstoffgewinnung und damit Reduktion der Ressourceninanspruchnahme. Die Verbesserung des Wissens über das Anthropogene Lager umfasst die Identifikation der beteiligten Akteure, die in der Praxis relevanten Verwertungswege und Beiträge zur möglichen Optimierung der Kreislaufwirtschaft.

Die Bearbeitung der betrachteten Materialströme wurden zwischen den Projektpartnern aufgeteilt. Während des Projektteams des Öko-Instituts insgesamt sieben Basis- und Sondermetalle untersucht, betrachtete das Team des ifeu Instituts neun mineralische Bau- und Abbruchabfälle.

Im Rahmen des Projekts wurden insgesamt sechs Dialogveranstaltungen durchgeführt. In diesen wurden gemeinsam mit Praxisakteuren die aktuelle Verwertungssituation sowie Hemmnisse und mögliche Verbesserungsansätze diskutiert.

Das Wissen über die im Fokus stehenden Materialien wurde zu sog., Faktenchecks zusammengetragen und in kompakter und leicht verständlicher Form aufbereitet und richten sich in erster Linie an eine interessierte Öffentlichkeit. Die Faktenchecks sind unter: [https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining/das-anthropogene-lager frei verfügbar](https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining/das-anthropogene-lager-frei-verfuegbar).

Für alle Materialien wurde eine Mengenstromprognostik berechnet, die Aussagen macht, mit welchen Abfallmengen und Qualitäten bis 2030 (Baumineralik) und 2040 (Metalle) in Deutschland zu rechnen ist. Dabei wurden auch mögliche Auswirkungen durch die Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen berechnet.

Die im Projekt entwickelten Lösungsansätze zur Verbesserung des Stoffstrommanagements resultieren aus dem umfassenden Dialogprozess mit den Akteuren der Praxis. Dabei wurden die für eine Umsetzung besonders relevanten Akteure und Handlungsschritte benannt.

F.2 Ressourcenschutz durch Urban Mining: Projektreihe KartAL & Rechenmodell DyMAS

Herr Müller erläuterte für das Umweltbundesamt (UBA) als Auftraggeber des Vorhabens dessen Einbettung in eine Reihe von UBA-Vorhaben zur „Kartierung des Anthropogenen Lagers“ (bislang KartAL I-IV). Ziel dieser Projektreihe ist es, ein besseres und tieferes Verständnis des Anthropogenen Lagers in Deutschland zu erhalten und dazu beizutragen, das anthropogene Lager als Kapitalstock zu bewirtschaften und die darin gebundenen Materialien möglichst umfassend wiederzugewinnen. Herr Müller erläuterte hierzu die Motivationen des Urban Mining als Gesamtstrategie.

F.3 Zentrale Projektergebnisse nach Materialsystem

Mitglieder des Projektteams von Öko-Institut und ifeu stellten zusammenfassende Ergebnisse zu den beiden im Vorhaben untersuchten Materialsystemen „Mineralische Bau- und Abbruchabfälle“ sowie „Basis- und Sondermetalle“ vor.

Dabei wurden sowohl die Ergebnisse der Mengenstromprognostik, als auch die erarbeiteten Lösungsansätze für ein verbessertes Stoffstrommanagement vorgestellt.

Für das Materialsystem „Mineralische Bau- und Abbruchabfälle“ wurden die Ergebnisse für den Untersuchungsraum Berlin vorgestellt. Im Projekt wurde zusätzlich die Region Kurpfalz bilanziert. Die Ergebnisse dazu werden sich im Abschlussbericht finden. Für beide Regionen wurde ein Betrachtungszeitraum bis 2030 angelegt.

Für das Materialsystem „Basis- und Sondermetalle“ wurde als Betrachtungsraum Gesamtdeutschland und ein Betrachtungszeitraum bis 2040 angelegt.

Im Folgenden werden zunächst die Rückmeldungen zu den Präsentationen am Vormittag sowie anschließend die Diskussionsergebnisse der vertiefenden Workshops am Nachmittag unterteilt nach den beiden Materialsystemen vorgestellt.

F.4 Baumineralik

F.4.1 Rückmeldungen auf die Vorstellung der Projektergebnisse

Zur besseren Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse und der Berechnungsmethode der Massenflüsse im Stoffstrommodell wurde um die Angabe von konkreten Annahmen (z. B. Entwicklung Baukonjunktur) gebeten. Diese werden im Abschlussbericht ausführlich dargestellt und erläutert. Eine bilaterale Absprache im Nachgang des Abschluss Symposiums ist vorab möglich.

Die zur Berechnung des Materialbestandes zugrunde gelegten Gebäudesteckbriefe bilden einen bundesweiten Durchschnitt ab, so dass regionale Besonderheiten zwangsläufig nicht ausreichend berücksichtigt werden können. Z. B. Mauerwerk wurde anhand der Daten aus der Bautätigkeitsstatistik der letzten fünf Jahre für die Modellregionen in Ziegelmauerwerk und

Kalksandstein differenziert, wonach in Berlin Kalksandstein überwiegt. Für den Modellraum Berlin könnte das daher zu Verzerrungen im Bereich des Bestandes und zukünftigen Aufkommens von ziegelhaltigen Materialien führen. In Berlin wurde in der älteren Vergangenheit deutlich mehr Ziegelmauerwerk errichtet als in anderen Regionen Deutschlands. Datensätze oder Zahlen zur Anpassung stehen jedoch nicht zur Verfügung, dies wurde im Rahmen der Projektarbeit geprüft.

Bei Sanierungsmaßnahmen sind weniger die klassischen Wandbaustoffe betroffen, sondern in der Regel eher der Innenausbau. Über die konstant fortgeschriebene Sanierungsrate im Stoffstrommodell, die prozentual auf die gesamten Baustoffe umgelegt wird, wird dies aktuell nicht berücksichtigt.

F.4.2 Workshop am Nachmittag

Als Impulsvortrag wurden zu Beginn des Workshops die aktuellen Recycling- und Verwertungsquoten für die Fraktionen Boden und Steine, Bauschutt und Straßenaufbruch vorgestellt und auf die offenen Potenziale zur Kreislaufwirtschaft verwiesen. Insbesondere die jährlich über 100 Millionen t Boden und Steine, die als bergbaufremdes Material in obertägigen Rekultivierungsmaßnahmen und im Deponiebau, ohne eine vorherige Behandlung, entsorgt werden, stellen ein großes Potenzial dar. Wie das Projekt jedoch zeigte, lassen sich Böden in ihren unterschiedlichen Kornabstufungen auch als Rohstoff für die Baustoffindustrie verstehen und damit in den Wirtschaftskreislauf zurückführen. Eine Kreislaufwirtschaft bedeutet eine gezielte Bewirtschaftung von Abfallmassen in ihren wertgebenden Eigenschaften analog konventioneller Rohstoffe. Die abfallwirtschaftlichen Systeme müssen Rohstoffe für die Bauwirtschaft zur Verfügung stellen, die in Zusammensetzung und Eigenschaften den Spezifikationen der Baustoffindustrie entsprechen. Um die Kreislaufwirtschaft weiter zu optimieren, muss das Bewusstsein gestärkt werden, dass etablierte Baustoffmärkte nur dann auf sekundäre Rohstoffe zurückgreifen, wenn diese spezifische Eigenschaften vorweisen. In der Aufbereitungsstrategie der Abfälle müssen diese Anforderungen Berücksichtigung finden. Dies gelingt nur im Zusammenspiel und im Austausch aller an der Entsorgung beteiligten Akteure.

Als Schwerpunktthemen für den Workshop wurden

- a) die Anforderungen und die Umsetzung der Gewerbeabfallverordnung
- b) die unterschiedlichen Vorgehensweisen bei öffentlichen Vergabeverfahren zur Stärkung des Einsatzes von RC-Baustoffen

genannt. Vorab wurde den Teilnehmenden jedoch die Möglichkeit eingeräumt, offene Fragen oder Diskussionspunkte aus der Vormittagsveranstaltung aufzugreifen. Daraus ergaben sich folgende Diskussionsstränge:

Wiederverwendung von Bauteilen: Entsprechend der Abfallhierarchie ist die Wiederverwendung von Bauteilen zu fördern. Das Projekt betrachtete die Abfälle jedoch auf Ebene der einzelnen Baustoffe und nicht in Ihrer Funktion als Bauteil. Daher ist eine vorgelagerte Wiederverwendung nicht thematisiert worden und wird auch im Abschlussbericht nicht aufgegriffen.

Schadstoffe: Schadstoffgehalte wurden bei der Modellierung der Verwertungswegen innerhalb der Stoffstromanalyse über Erfahrungswerte in der Aufbereitung (z. B. Schadstoffe reichern sich im Feinanteil an) und bekannte Schadstoffproblematiken (z. B. anhaftende Gipsputze am Mauerwerk) berücksichtigt. Eine Quantifizierung oder Differenzierung nach einzelnen

Schadstoffen konnte nicht vorgenommen werden. Das Stoffstrommodell dient als grobe Richtschnur. Die Schadstoffproblematik wird im Abschlussbericht in der Hemmnisanalyse aufgegriffen. Bezüglich der vorgestellten Verwertungsquoten und dem sich daraus ergebenden Potenzial für die einfach verwerteten Massen, wurde auf die Notwendigkeit verwiesen, dass schadstoffbelastete Böden (\geq Z.2) keinem anderen Absatzweg als dem Deponiebau zugeführt werden können, da keine Akzeptanz und kein Markt vorhanden sind.

Abfalltransport und Logistik: Je mehr Fraktionen auf einer Baustelle getrennt bereitgestellt werden, desto mehr Transporte und Transportkilometer sind für die Entsorgung nötig. Dies verursacht neben höheren Emissionen auch höhere Kosten. Diese könnten durch die geplante CO₂-Steuer weiter in die Höhe getrieben werden. Eine Befreiung von dieser Steuer für abfallrechtliche Transporte sollte nach Auffassung einiger Teilnehmenden diskutiert werden. Ebenso die Ausweitung der Förderung zum Umstieg auf Elektromobilität, die bislang nur von kommunalen Entsorgungsunternehmen in Anspruch genommen werden kann. Gegenstimmen sprachen sich für eine Verteuerung der Transporte aus. Bis dato ist das Problem der Kreislaufwirtschaft eher, dass billige eher unqualifizierte Entsorgungslösungen über große Distanzen attraktiv sein können, da Transporte insbesondere als Rückfrachten sich zu wenig in der Kostenbilanz niederschlagen. Teure Transporte stärken die Aufbereitung. Beispielhaft wurde das Mautsystem in der Schweiz genannt, das für LKW ab 3,5 t eine Schwerverkehrsabgabe auf allen Straßen verlangt (nicht nur auf Bundesstraßen und Autobahnen). Die Höhe der Abgabe richtet sich nach den gefahrenen Kilometern, dem zulässigen Gesamtgewicht sowie der Emissionsklasse des LKWs und erhöht die Transportkosten in erheblichem Umfang.

Deponiesteuer: Das Recycling wird durch die Verteuerung der Beseitigung auf der Deponie gestärkt. Dies ist in Ländern, die eine solche Abgabe bereits eingeführt haben, belegt.

Gipsrecycling: Nach dem Bericht eines Betreibers einer Gipsrecyclinganlage konnte durch den Dialog mit Behörden auf Länder-, Bundes- und EU-Ebene eine relevante Mengensteigerung innerhalb der letzten 6 Monate erreicht werden. Diese Erfahrungen decken sich nicht mit den Erfahrungen eines Betreibers aus einem anderen Bundesland. Hier zeigt die Landesverwaltung wohl wenig Bewusstsein für das Thema Gipsrecycling.

Verpflichtendes Entsorgungskonzept: Über das Landesabfallgesetz plant Baden-Württemberg die Einführung der Pflicht zur Vorlage eines Entsorgungskonzeptes für größere Abbruchvorhaben. Das Konzept muss die zu erwartenden Abfallfraktionen und den geplanten Entsorgungsweg benennen. Ausreichend ist die Angabe der Art der Entsorgung (z. B. Recycling) und nicht die spezifische Anlage. Der Abbruch sowie das Konzept müssen von der Behörde **vorab** genehmigt werden. Der Nachweis, dass der Abfall tatsächlich dem angegebenen Entsorgungsweg zugeführt worden ist, kann z. B. über Lieferscheine und Entsorgungsverträge erbracht werden. Im Landkreis Konstanz wird dieses Konzept bereits umgesetzt. Zuspruch erhielt der Vorschlag, weil so vorgegeben werden könnte, dass bspw. Decken und Wände getrennt rückgebaut werden müssten.

Teil A: GewAbfV

Es wurden folgende Themen unter den Teilnehmenden diskutiert:

LAGA Mitteilung 34; technisch möglich/wirtschaftlich zumutbar: Der dringende Bedarf einer eindeutigen Definition dieser Begriffe wurde von allen Teilnehmenden bekräftigt. Die Bewertung im Einzelfall ist einem Sachbearbeiter nicht zuzumuten, die Angreifbarkeit wäre groß. Aus der Praxis wird berichtet, dass Preisunterschiede ab 1 € dazu führen, dass Abfälle statt

einem Recycling einer Beseitigung zugeführt werden. Abbruchunternehmen bezeichnen die Argumentationsschiene „Kein Platz, daher technisch nicht möglich.“ als sehr bequem. Angesichts der getrennten Erfassung von Mineralwolle in BigBags und der getrennten Bereitstellung von Gipsabfällen erscheint die Argumentation als wenig nachvollziehbar. Technisch nicht möglich dürfte darüber hinaus nur im Ausnahmefall relevant sein, mit entsprechendem Aufwand ist technisch fast alles möglich. Entscheidend ist daher die Beurteilung der wirtschaftlichen Zumutbarkeit und hierzu bedarf es dringend einer einfachen und klaren Handlungsanweisung für den Vollzug. Die LAGA Mitteilung³⁴ liefert hierzu relativ präzise Erläuterungen hinsichtlich der Getrennterfassung sowie der Aufbereitungs- und Verwertungspflicht von Gemischen, welche allerdings im Vollzug der Behörden erst noch Berücksichtigung finden müssen. In diesem Zusammenhang ist die fehlende Verbindlichkeit der LAGA M 34 problematisch.

Vorerkundung/Schadstoffgutachten: Zum Ausschluss einer Asbestbelastung der Abfälle fordern die Verbände eine Erkundungspflicht für die Bauherren. Der Nachweis der Asbestfreiheit muss dann eine Freischaltung für die gesamte weitere Entsorgungskette bedeuten. Dies wurde der Bundesregierung kommuniziert. Zwingend nötig ist dafür eine kurzfristige Regelung, wie Asbestfreiheit definiert ist und welche Analysemethoden zur Bestimmung geeignet sind.

Für die Erstellung eines detaillierten und umfassenden Schadstoffgutachtens (auch als Teil eines Entsorgungskonzeptes) wären im abzubrechenden Gebäude umfassende Eingriffe (Teilerstörungen der Gebäudesubstanz) nötig. Die Schadstoffbelastung vollständig zu erfassen ist im Grunde nicht möglich. Zu diskutieren ist weiterhin, ob die Einstufung nach AVV in Abfallschlüsselnummern ausreichend ist oder ob eine präzisere Einordnung nötig ist. Für Großbauvorhaben ist die Erstellung eines Schadstoffgutachtens weit verbreitet.

Selektiver Rückbau: Bauherren sollten ausschließlich auf lizenzierte und zertifizierte Fachunternehmen zurückgreifen (Entsorgungsfachbetrieb oder RAL-Gütezeichen, eventuell noch weiter ausgebaut).

Umsetzung Abfallhierarchie: Zur Steigerung der Recyclingquote könnten die Sortier- und Aufbereitungsanlagen stärker in die Pflicht genommen werden. Für die Behörden wäre es mit überschaubarem Aufwand möglich, die Entsorgungswege für einzelne Stoffströme zu prüfen. Werden Abfallarten einer Beseitigung zugeführt, obwohl ein Recyclingverfahren etabliert ist, könnte die Annahme von Abfällen mit bestimmten Schlüsselnummern untersagt werden.

Insgesamt müssen die Zugriffsmöglichkeiten von Abfall- und Umweltbehörden gestärkt werden. Regulatorische Maßnahmen, wie die GewAbfV, greifen häufig zu spät, nämlich wenn der Abfall bereits angefallen ist. Abfallvermeidende und qualitätssteigernde Maßnahmen müssten beispielsweise über das Baurecht Gültigkeit erlangen, so dass Anforderungen bereits vor der Baumaßnahme verbindlich gestellt werden können.

Teil B: Ausschreibung und Vergabe

Aufgrund der offenen Diskussionsrunde zu Beginn des Workshops und der regen Diskussion über die Anforderungen und Umsetzung der GewAbfV, stand nur ein verkürztes Zeitfenster zur Vorstellung (s. Anhang) und Diskussion des Themas zur Verfügung. Beiträge wurden zu folgenden Fragestellungen gegeben:

Verpflichtende Vorgabe zum Einsatz von RC-Baustoffen: Vertragspartner von öffentlichen Auftraggebern ist nicht der Baustoffproduzent, sondern die bauausführende Firma. Somit hat jeder Anbieter die Möglichkeit, über die Wahl des Baustofflieferanten einen Baustoff mit RC-Anteil zu beziehen. Eine vergabewidrige Bevorzugung einzelner Unternehmen bei der

verbindlichen Forderung nach dem Einsatz von RC-Baustoffen, findet somit nicht statt. Die Rechtssicherheit und der politische Druck könnte mit Übernahme der Grundanforderung 7 „Nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen“ nach Anhang 1 der EU-Bauproduktenverordnung in die Landesbauordnungen erhöht werden. Diese schreibt schon heute vor:

„Das Bauwerk muss derart entworfen, errichtet und abgerissen werden, dass die natürlichen Ressourcen nachhaltig genutzt werden und insbesondere Folgendes gewährleistet ist:

- a) Das Bauwerk, seine Baustoffe und Teile müssen nach dem Abriss wiederverwendet oder recycelt werden können;
- b) das Bauwerk muss dauerhaft sein;
- c) für das Bauwerk müssen umweltverträgliche Rohstoffe und Sekundärbaustoffe verwendet werden.“

Als Teil einer EU-Verordnung sind diese Vorgaben bereits verbindlich und müssen von allen EU-Staaten in vollem Umfang umgesetzt werden. Dies gilt nicht nur für öffentliche Auftraggeber, sondern auch für private Bauherren. Anreize, die den Einsatz von Baustoffen mit RC-Anteil weiter fördern, können über Steuervergünstigungen (bspw. reduzierter MwSt.-Satz) geschaffen werden.

Vermarktung von Baustoffen: Für einzelne Baustoffe muss diskutiert werden, ob die gezielte Vermarktung und Bewerbung des RC-Anteils sinnvoll sind. Alternativ gilt die Substitution bis zu einem bestimmten Anteil weiter als standardisiertes Produktionsverfahren. Für Massenbaustoffe wäre in der Summe die Rückführung von größeren Abfallströmen wahrscheinlich. Vereinzelt wenden Transportbetonwerke diese Verkaufsstrategie heute schon an. Der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung wird gemäß Vorgabe des Regelwerkes auf dem Lieferschein ausgewiesen, der Verkauf erfolgt jedoch als ein Beton nach Eigenschaften.

Verfügbarkeit von rezyklierten Gesteinskörnungen: Die Verfügbarkeit ist regional sehr unterschiedlich, insgesamt jedoch unzureichend. Versorgungsstrukturen sind noch nicht ausreichend etabliert. Erfahrungen aus Berlin zeigen, dass nach Auffassung der Bauschuttrecycler einem erhöhten Aufwand bislang kein wirtschaftlicher Vorteil entgegensteht. Mit dem in Berlin bereits beschlossenen verbindlichen Einsatz von R-Beton für bestimmte Hochbauprojekte, können sich diese Rahmenbedingungen aber ändern, da die Preiskonkurrenz zu Beton mit natürlicher Gesteinskörnung als Zuschlag aufgehoben worden ist. Höhere Erlöse werden somit möglich. Der aktuelle Bedarf von 5 Millionen t Zuschlag für die Betonproduktion in Berlin pro Jahr, kann in absehbarer Zeit nicht über rezyklierte Gesteinskörnung aus dem Berliner Raum gedeckt werden. Als weiteres Hemmnis wurden die zur Verfügung stehenden Flächen für Lager und Produktion genannt. Bestehende Anlagen könnten häufig keine weiteren Vorhalteflächen bereitstellen oder zusätzliche Doseure für rezyklierte Körnungen nachrüsten. In diesem Zusammenhang ist zu prüfen, ob seitens der Genehmigungsbehörden die Inbetriebnahme neuer Anlagen im städtischen Raum mit kurzen Transportwegen erleichtert werden kann.

F.5 Basis- und Sondermetalle

Im Folgenden ist die Aufteilung zwischen Vormittag und Nachmittag aufgehoben und die Diskussionsbeiträge entsprechend der inhaltlichen Reihenfolge der Gesamtpräsentation zugeordnet. Die Rückmeldungen und Diskussionsbeiträge lassen sich in die Kategorien

- d) Anmerkungen und Hinweise zu den Mengenströmen und Szenarien und

e) Diskussionsbeiträge zu den Lösungsansätzen zusammenfassen.

F.5.1 Rückmeldungen auf die Vorstellung der Mengenstromprognostik und Szenarien Metalle

Zu **Sektor 6 – Fahrzeuge**: Die der Berechnung angenommene Materialzusammensetzung von Elektro-Pkw wurde kontrovers diskutiert. Auf Basis von Literaturangaben (Burnham 2012²⁶ ergänzt um weitere Quellen für spezifische Mengen für Messing, Zinn, Zink und Seltene Erden) wird seitens des Öko-Instituts von einer Zunahme von Gusslegierungen (für Motor- und Batteriegehäuse) bei E-Pkw gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ausgegangen. Seitens der Teilnehmenden wurde entgegnet, dass durch die Elektromobilität eher Knetlegierungen in der Bedeutung zunehmen werden und dies in der Berechnung zu berücksichtigen ist.

Zu **Sektor 4 – Energieerzeugungsanlagen**: Es wurde darauf hingewiesen, dass der Ausbau von Windkraftanlagen aufgrund verschiedener Hemmnisse (z. B. planerische Vorgaben wie Abstandsregelungen, Einwände von Bürgern etc.) aktuell schleppend verläuft. Damit wurde die Frage verbunden, ob und wie dies in der Modellierung berücksichtigt wird. Antwort: Die Annahmen zum Ausbau von EE-Anlagen basieren auf dem Netzentwicklungsplan 2030 der Bundesnetzagentur in der aktuellsten Fassung von 2019.

Zu **Sektor 9 – Maschinen**: Der Sektor wurde über eine generische ökonomische Einheit („Minibagger“) bilanziert. Da der Zuwachs im Bestand bis 2040 (140 %) sehr ambitioniert erscheint, kam der wichtige Hinweis, hier für die Szenarien noch eine Inflationsrate zu berücksichtigen. Nach Rückfragen zum Export von Maschinen unterstrich das Öko-Institut, dass in die Szenarien nur der tatsächliche Verbleib von Gütern (hier Maschinen) in Deutschland in die Berechnung der Szenarien zum anthropogenen Lager eingeflossen ist. Das heißt, die neu produzierten und dann exportierten Maschinen wurden in der Berechnung ausgeblendet.

Zu **Modellierungsansatz und gemachten Annahmen**: Der Materialinput in den Maschinenbausektor wird auf das Finanzvolumen der Gesamtproduktion des Sektors umgelegt. Um eine greifbare Stückzahl zu haben wird das Volumen durch 30 000 € geteilt (dem wird eines generischen Minibaggers). Der Export von neuen Maschinen wird über die Statistik des VDMA und der dort gezeigten Inlandsmarktversorgung direkt herausgerechnet. So werden nur die tatsächlich in Deutschland verbleibenden Maschinen abgebildet.

Die **Rückgewinnungsquote aus der Müllverbrennung** von 56 % für Aluminium, Edelstahl und Messing wurde als zu konservativ eingeschätzt, ebenso 0 % für Zinn. Das Öko-Institut verwies auf neue Daten der Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland (ITAD), ist aber offen für eine bilaterale Klärung dieser Punkte.

Es wurde nachgefragt, wie mit **Datenunsicherheiten in der Modellierung** umgegangen wurde. Dazu erläuterte Herr Bleher, dass die getroffenen Annahmen mit Experten rückgespiegelt wurden. Für die Berechnung im Modell können nur einzelne Werte genutzt werden. Diese wurden präsentiert. Spannbreiten können in der Dokumentation angegeben werden.

²⁶ Burnham, A.: Updated Vehicle Specifications in the GREET Vehicle-Cycle Model. Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory, July 2012.

Abschließend wurde die von den Teilnehmenden geteilte Einschätzung gegeben, dass es sich bei den gezeigten Mengenströmen/Szenarien nur um möglichst qualifizierte Annahmen handeln kann und selbst bei Industriefachverbänden keine valideren Daten vorliegen. Daher werden die Mengengerüste/Szenarien als relevanter Beitrag für die Debatten um Urban Mining und Kreislaufwirtschaft eingestuft.

Die Projektpartner stellten klar, dass bei den Zukunftsszenarien, die auf Umsatzentwicklungen der Branche basieren, nur die Bedienung des deutschen Marktes, also ohne Exporte, betrachtet wurde.

Die Projektpartner erläuterten auf eine Nachfrage die Begrifflichkeiten der WEEE- und Fahrzeugexporte: Der Begriff „WEEE“-Exporte sei eigentlich nicht richtig, da er nicht nur Abfälle, sondern auch Gebrauchsgüter umfasse. Unter die „Fahrzeugexporte“ sei auch der unbekannte, statistisch nicht belegte Fahrzeugverbleib gezählt worden. Auch wenn ein Teil davon in Deutschland bleibe und möglicherweise teilweise hier recycelt werde, wurde dies dennoch aufgrund der völligen Intransparenz der Stoffströme als Export und damit Verlust für den Bilanzraum Deutschland gewertet.

F.5.2 Diskussionsbeiträge zu den Lösungsansätzen

Herr Dr. Bulach und Herr Bleher (Öko-Institut) stellten die Lösungsansätze zur weiteren Optimierung der Recyclingsysteme für die betrachteten Basis- und Sondermetalle vor.

Ansätze zur technischen und organisatorischen Optimierung

Zu „Verbesserte Detektion von Schrotten“: Der Vorschlag einer Förderung zur Einführung besserer Sortiertechnologien in automatisierten Sortierprozessen wie XRT, LIBS oder XRF fand grundsätzliche Zustimmung bei den Teilnehmenden. Es wurde jedoch darauf hingewiesen, dass hohe Mengendurchsätze bei den entsprechend ausgestatteten Sortieranlagen unabdingbar sind, um die relativ hohen Investitionskosten refinanzieren zu können. Derzeit werden die Ressourcenschonungspotenziale neuer Sortiertechniken in einem weiteren vom Umweltbundesamt geförderten Forschungsprojekt wissenschaftlich untersucht.

Zu „Pooling Transportdienstleistungen / Digitalisierung“: Es wurde klargestellt, dass es bei den beobachteten knappen Kapazitäten um Gefahrgut-Transporte, nicht gefährliche Abfälle geht. Ein Diskussionsbeitrag begrüßte den Bündelungsansatz und verwies gleichzeitig auf die Beachtung des geltenden Rechtsrahmens, der für die Erfassung bestimmter Abfälle gilt (z. B. ElektroG). Der Lösungsansatz „digitale Innovationsprozesse in der Recyclingbranche stärker fördern“ wird als relevant eingeschätzt. Allerdings berichten Teilnehmende von deutlichen Vorbehalten der stark mittelständisch geprägten Recyclingbranche. Es erfolgt der Hinweis, dass mit der Idee eines Pooling-Ansatzes für Transportfahrzeuge eher die Unternehmen der Branche statt ganzer Verbände adressiert werden sollten.

Regulatorische Ansätze

Zu „Regelungen Altfahrzeuge“: Rückfragen bzw. Anmerkungen erfolgten bezgl. des Vorschlags „Verbindliche Einführung der Anlaufstellenrichtlinien Nr. 9 zur Verbringung von Altfahrzeugen“ in die EG-Altfahrzeugrichtlinie sowie Beweislastumkehr beim Export von Altfahrzeugen hinsichtlich der Grauzone Export Altfahrzeug/Gebrauchtfahrzeug in Nicht-OECD-Länder. Es wurde die Frage gestellt, ob die exportierten Fahrzeuge und deren Metalle nicht auch außerhalb Europas recycelt werden. Die Teilnehmenden verständigen sich darauf, dass es nicht um eine Verringerung des legalen Gebrauchtfahrzeugexports, sondern um die Unterbindung der

Diffusion von Fahrzeugen in „dunkle Kanäle“ gehen muss, da hier nicht immer gute Rückgewinnungsquoten und schon gar nicht akzeptable Umwelt- und Sozialstandards garantiert werden können. Es wurde darum gebeten, zu präzisieren, welche Regelungen genau aus den Anlaufstellen-Leitlinien Nr. 9 verbindlich gemacht werden sollen. Eine Teilnehmerin sah eine Änderung des Fahrzeug-Zulassungsrechts als wirksame Maßnahme gegen den unbekanntem Fahrzeugverbleib.

Zum Vorschlag „Technische Standards für Post-Schredder-Technologien (PST)“ regte eine Teilnehmerin an, hierbei nicht nur Schredderleichtfraktion, sondern auch Schredderschrotte und Schredderschwerfraktion mitzuadressieren. Ein Ansatz könnte außerdem eine Beschränkung der Metallgehalte der Schredderleichtfraktion sein. Ein Teilnehmer betonte, dass das Thema bzgl. der Versorgungssicherheit der hiesigen Aufbereitungs- und Recyclinganlagen sehr wichtig ist.

Zu „Regelungen Elektrogeräte“: Hinsichtlich des Lösungsansatzes „Standard CENELEC EN 50625 (zur Sammlung, Logistik und Behandlung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten) in WEEE Richtlinie als rechtlich bindend aufnehmen“ ergab sich eine kontroverse Debatte zwischen Teilnehmenden und viele Gegenargumente gegen den Lösungsansatz. Von einer Seite wird argumentiert, dass die deutsche Entsorgungsfachbetriebsverordnung – EfbV einen ausreichenden Rahmen darstellt, der gestärkt werden sollte. Von anderer Seite wird das Praxisbeispiel angeführt, dass insb. für Kunden aus dem europäischen Ausland nationale Standards (d. h. EfbV) keine Bedeutung haben und die Einhaltung nach europäischen Standards nachgefragt wird. Daher wird eine europäische Harmonisierung unterschiedlicher Regelungen als strategische Aufgabe verstanden. Die Begründung des Öko-Instituts, durch die Einführung der Behandlungsanforderungen mit Auditierung durch einen Sachverständigen den informellen Sektor besser zu kontrollieren, wurde durch mehrere Teilnehmende widerlegt: Der informelle Sektor beachtet keine Standards wie die CENELEC-Standards. Außerdem ist es unnötig, für Audits auf eine Industrienorm zurückzugreifen, da das ElektroG bereits eine jährliche Zertifizierung der Erstbehandlungsanlagen für Elektroaltgeräte durch geeignete Sachverständige vorsieht. Drittens sieht eine Teilnehmerin inhaltliche Schwächen der CENELEC-Standards, die gegen eine 1:1-Übernahme in die WEEE-Richtlinie sprechen. Z. B. wird das Ziel der Ressourcenschonung weitgehend nicht verfolgt und die angewendete Grenz- und Zielwertmethodik erfasst nur einzelne Indikatorschadstoffe, weswegen eine Ergänzung von qualitativen Verfahrensbedingungen wichtig wäre.

Verbesserter Informationsfluss

Zum Punkt Vorgeschlagene **Ausweitung von Depotcontainern** zur Erfassung von Elektronikschrott aus Privathaushalten gab es eine kritische Rückmeldung, da auf die mögliche Brandgefahr durch enthaltende Lithium-Ionen-Batterien hingewiesen wurde.

Zustimmung gab es für den Vorschlag eines „**Runden Tisches Chemikalienrecht / Kreislaufwirtschaft**“. Es wurde darauf verwiesen, dass seitens der Deutschen Gesellschaft für Abfallwirtschaft (DGAW) der Arbeitskreis „Chemisierung des Abfallrechts“ zu dieser Problematik gegründet wurde. Dieser Prozess sollte mitberücksichtigt werden.

F.6 Zusammenführung der Ergebnisse und Abschlussstatements

F.6.1 Zusammenführung der Ergebnisse

Die wichtigsten Punkte der Diskussionen in den Nachmittagsworkshops wurden für das Plenum zusammengefasst. Es wurde die konstruktive Diskussionskultur der Debatten unterstrichen.

F.6.2 Abschlussstatement des Vertreters des GDA - Gesamtverband der Aluminiumindustrie

Der Vertreter des GDA unterstrich den Wert des Vorhabens und hob das gute Gesprächsformat und die gute Gesprächskultur im Vorhaben hervor. Er ermunterte das Umweltbundesamt in dieser Richtung weiterzuarbeiten. Von Seiten der Industrieverbände etc. gibt es vergleichbare Projekte auf europäischer oder gar globaler Ebene. Alle diese Projekte müssen derzeit – wie dieses Vorhaben - mit qualifizierten Annahmen arbeiten. Daher können Daten/Annahmen dieses und anderer Vorhaben mit Bezug Deutschland dazu verwendet werden, Ergebnisse von Projekten auf europäischer Ebene oder globaler Ebene abzugleichen.

Er betonte, dass bei den erarbeiteten Ergebnissen und skizzierten Lösungsansätzen nicht vergessen werden darf, dass als Grundlage Annahmen vorliegen. Dies ist wichtig, wenn Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Als Basis für verpflichtende Vorgaben sind diese nicht geeignet, da eine Vielzahl von Annahmen mit entsprechenden Unsicherheiten zugrunde liegen. Er wünschte sich die Realisierung eines Runden Tisches im Bereich Metallrecycling zu den Schnittstellen Chemikalien-/Stoffrecht, wie vom Öko-Institut empfohlen. Weiterhin unterstützte der Vertreter des GDA den Ansatz, über Optimierungspotenziale, zum Beispiel im Hinblick auf die Sortierung, zu sprechen (Einsatz moderner spektroskopischer Verfahren) und sah Vorschläge im Bereich steuerlicher Ansätze positiv. Abschließend unterstrich er – bei allen noch möglichen Optimierungen – seinen Stolz über das bereits erreichte im Sektor Aluminium- und Metallrecycling in Deutschland.

F.6.3 Abschlussstatement Vertreter Senatsverwaltung Umwelt, Klima und Verkehr Berlin

Der Vertreter der Senatsverwaltung sah durch das UBA-Vorhaben eine sehr große Übereinstimmung mit der Politik des Berliner Senats im Bereich Ressourcen. Er verwies auf den Koalitionsvertrag, der eine Entkopplung des Ressourcenverbrauchs von der Wirtschaftsentwicklung vorsieht. Eine Stärkung der Vollzugsbehörden im Bereich Kreislaufwirtschaft ist ebenso ein wichtiger Baustein wie die öffentliche Beschaffung als wichtiger Faktor und Vorbildfunktion. So soll bei größeren Bauvorhaben wie beim Schulbau der Einsatz von RC-Beton und ein hoher Anteil Holzbauweise vorgeschrieben werden. Das Abfallwirtschaftskonzept Berlin (derzeit in der Entwurfsfassung) fordert die Schaffung von insgesamt 30 neuen Stellen, die sowohl auf Bezirks- als auch auf Senatsebene den Vollzug der GewAbfV sicherstellen sollen. Eine Stärkung des selektiven Rückbaus beim Gebäudeabbruch über die Landesbauordnung sowie Unterstützung beim Aufbau dezentraler Annahmestellen für Gipsabfälle sind weitere Beispiele für die Aktivitäten der Ressourcenpolitik des Landes Berlin.

Der Vertreter der Senatsverwaltung kündigte schließlich eine Ressourcenschonungsstrategie des Landes Berlin an, die noch ausgearbeitet werden muss.

F.7 Verabschiedung der Teilnehmenden

Zum Abschluss der Veranstaltung dankte das Umweltbundesamt und der Projektleiter allen Beteiligten für die konstruktive Diskussion und gute Unterstützung des Vorhabens.